



รายงานฉบับสมบูรณ์  
โครงการการพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดุ  
เครื่องประดับและงานสร้างสรรค์  
Development of Gold-like Shape Memory Alloy  
for Materials and Jewelry Product

ผศ. ดร. สายสมร นิยมสรวนุญ

ผศ. ดร. ชุตินันต์ จันทร์เมือง

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

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

รหัสโครงการ 2558A10802398

สัญญาเลขที่ ๑๕๐/๒๕๕๘

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดุ  
เครื่องประดับและงานสร้างสรรค์

Development of Gold-like Shape Memory Alloy  
for Materials and Jewelry Product

ผู้วิจัย

ผศ. ดร. สายสมร นิยมสรวนุ

ผศ. ดร. ชุติมันต์ จันทร์เมือง

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

สิงหาคม ๒๕๖๐

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา ๑๕๐/๒๕๕๘ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิจัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และขอบคุณ Department of Lithospheric Research, Faculty of Earth Sciences, Geography and Astronomy และ Research Group Physics of Nanostructured Materials, Faculty of Physics, University of Vienna และ Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Germany สำหรับการอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องโฟกัสไอออน빔และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอำนวยการ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ในการเอื้อเฟื้อสถานที่และนิสิตผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้วิจัย

## **Acknowledgment**

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 150/2558).

Thanks to Department of Lithospheric Research, Faculty of Earth Sciences, Geography and Astronomy and Research Group Physics of Nanostructured Materials, Faculty of Physics, University of Vienna for the FIB and TEM facilities. The authors also would like to thank Faculty of Gems, Burapha University (Chanthaburi campus) for providing a casting machine and basic research facilities.

Authors

## บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์ (Development of Gold-like Shape Memory Alloy for Materials and Jewelry Product) รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A10802398 เลขที่สัญญา 150/2558 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 300,000 บาท (สามแสนบาทถ้วน) ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี (ระหว่าง ๑1 ตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม 2560)

### บทคัดย่อ

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาดที่สามารถจำรูปร่างก่อนการถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูปกลับไปเป็นเหมือนเดิมได้ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปมาระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ในระหว่างการให้ความร้อนและการเย็นตัว โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลักนั้นมีข้อดีประการหนึ่งในเชิงเศรษฐกิจเนื่องจากมีราคาถูกกว่าโลหะระบบ Ni-Ti และยังมีที่น่าสนใจคุณสมบัติทางกลและความร้อน โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาโลหะผสมจำรูป 2 ระบบ คือ Cu-Zn-Al ที่ส่วนผสมเจือด้วยอินเดียม 0.1–1.0 wt% และโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส 1.5-3.5 wt% โดยการหล่อแบบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (lost-wax หรือ Investment casting) ด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวดเหนียวนำ โดยการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 1,100 °C และอุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 650 °C โดยศึกษาสมบัติของโลหะผสมจำรูปด้วยการตรวจวัดและทดสอบดังนี้ การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความสามารถในการจำรูปด้วยการทดสอบการดัดงอ ศึกษาความสามารถต่อการต้านทานการหมอง วัดความแข็งด้วย ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุของโลหะผสมจำรูป ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การวิเคราะห์เคมีด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ และศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบปริมาตรร้อนและรีดเย็น

จากผลการทดลองวิจัยพบว่าโลหะผสมจำรูปที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มีความสามารถในการจำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืนรูปจะลดลงตามลำดับเมื่อจำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์เป็นเฟสหลัก และยังคงมีเฟสของออสเทนไนต์ โลหะผสมที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียมจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่ประมาณ 213 HV โดยโลหะผสมที่เจือด้วยอินเดียม ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% มีค่าความแข็งประมาณ 204 HV การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟสหลักมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการ

กระจายตัวอยู่ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแผดขนาดเล็ก ลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และพบแนวรอยเลื่อนในโครงสร้าง โดยแนวรอยเลื่อนและระนาบดังกล่าวมีการเรียงตัวใน 2 ทิศทางต่างกัน ทำมุม  $90^\circ$  และ  $55^\circ$  กับแนวเส้นรอยต่อของระนาบแผด ซึ่งการปรากฏของระนาบแผดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ เนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่ามีการเสียรูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ ทำให้ชิ้นงานสูญเสียความสามารถในการจำรูป

สำหรับโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส พบว่า โลหะที่เจือแมงกานีส 2.0 wt% (Al 5.5 wt.%) มีค่าการคืนรูปสูงที่สุด คือสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ 100 % เมื่อปริมาณ Al ลดลงเป็น 5.0wt% มีการคืนรูป 82% และเมื่อ Al ลดลงเป็น 4.0wt% มีการคืนรูปน้อยที่สุด คือ 42 % ส่วนอัตราส่วนผสมที่มี Al 6.0wt% ขึ้นไป ไม่สามารถดัดงอชิ้นงานได้เนื่องจากชิ้นงานมีความเปราะ แสดงว่าถ้า Al เพิ่มขึ้น (%Mn ลดลงไป ไม่เกิน 1.5wt%) การคืนรูปจะคืนได้มากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มตั้งแต่ 6.0wt% ขึ้นไป จะเปราะไม่สามารถดัดงอได้

#### ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ในระยะเวลาของการรับทุนวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้มีเข้าร่วมเสนอผลงานวิชาการในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติจำนวน 2 ครั้ง คือ

**Chanmuang, C., Kummerdphonpittaya, B., Juntakool, O. and Niyomsoan, S. (2016).** Microtexture of Cu-based shape memory alloys. 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, May, 2016. Program and Abstract, pp. 230.

**Niyomsoan, s., Vongchaisri, K. and Chanmuang, C. (2017).** Study of Cu-based shape memory alloys from an investment casting process. The 2<sup>nd</sup> National and International Conference of Creative Multi-disciplinary Studies for Sustainable Development, Bangkok, Thailand, July, 2017. Proceeding, p. 20–27.

จากการศึกษาและวิจัยในโครงการสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์ เพื่อเป็นข้อมูลด้านผลึกวิทยาและโครงสร้างจุลภาคจากการเจือด้วยธาตุอินเดียม เป็นองค์ความรู้และประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับวัสดุทางเลือกสำหรับผลิตเครื่องประดับต่อไป

#### ข้อเสนอแนะ

สำหรับการผลิตโลหะจำรูปเสมือนทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์นี้ สิ่งที่ควรระวังคือการควบคุมการผลิตระหว่างการหลอมโลหะ ทั้งส่วนผสมโลหะและเวลาในการหล่อ เนื่องจากมีการสูญเสียสังกะสีในรูปแบบเขม่าในระหว่างการหลอม และควรต้องมีการคนโลหะหลอมตลอดเวลาเนื่องจากฟิล์มของอะลูมิเนียมจะคลุมผิวของน้ำโลหะหลอม อาจทำให้การหล่อโลหะไม่สมบูรณ์ และหากส่วนผสมผิดพลาด โลหะจะสูญเสียความสามารถในการการคืนรูปได้

## บทคัดย่อ

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาดที่สามารถจำรูปร่างก่อนการถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูปกลับไปเป็นเหมือนเดิมได้ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปมาระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ในระหว่างการให้ความร้อนและการเย็นตัว โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลักนั้น มีข้อดีประการหนึ่งในเชิงเศรษฐกิจเนื่องจากมีราคาถูกกว่าโลหะระบบ Ni-Ti และยังมีความน่าสนใจคุณสมบัติทางกลและความร้อน โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al เจือด้วยอินเดียม 0.1–1.0 wt% และโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส 1.5–3.5 wt% โดยการหล่อแบบแม่พิมพ์ซีผึ้ง (lost-wax หรือ Investment casting) ด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวดเหนียวหนา โดยการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 1,100 °C และอุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 650 °C โดยศึกษาสมบัติของโลหะผสมจำรูปด้วยการตรวจวัดและทดสอบดังนี้ การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความสามารถในการจำรูปด้วยการทดสอบการดัดงอ ศึกษาความสามารถต่อการต้านทานการหมองวัดความแข็งด้วย ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุของโลหะผสมจำรูป ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การวิเคราะห์เคมีด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ และศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบรีดร้อนและรีดเย็น

จากผลการทดลองวิจัยพบว่าโลหะผสมจำรูปที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มีความสามารถในการจำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืนรูปจะลดลงตามลำดับเมื่อจำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu–20.8wt%Zn–5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์เป็นเฟสหลัก และยังคงมีเฟสของออสเทนไนต์ โลหะผสมที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียมจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่ประมาณ 213 HV โดยโลหะผสมที่เจือด้วยอินเดียม ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% มีค่าความแข็งประมาณ 204 HV สำหรับโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส พบว่า โลหะที่เจือแมงกานีส 2.0 wt% มีค่าการคืนรูปสูงสุด คือสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ 100 % การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟสหลักมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแฝดขนาดเล็กลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และพบแนวรอยเลื่อนใน ซึ่งการปรากฏของระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ เนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่าการเสียรูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ ทำให้ชิ้นงานสูญเสียความสามารถในการจำรูป

## Abstract

Shape Memory Alloys (SMAs) are one group among smart materials. They can remember their original shape and return to a pre-deformed shape after being heated. Shape memory effect derives from a martensitic transformation induced by stress and/or temperature change. Cu-based SMAs provide a more economical alternative compared with Ni-Ti due to their low cost, variety of interesting mechanical and thermal properties. In this work, the Cu-Zn-Al alloy with 0.1–1.0 wt%In and Cu-Al-Mn alloys with 1.5–3.5 wt%Mn were investigated. The alloys were prepared into shapes by lost-wax casting technique with melting temperature at 1100 °C and mold temperature at 650 °C. Shape memory effect, annealing behavior and microstructure were studied. Optical microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy X-ray Diffraction Spectroscopy (EDS) were used for microstructural characterization. It can be concluded that the microstructure of as-cast alloy contained  $\alpha$ -phase texture surrounded by matrix phase. EDS revealed that the  $\alpha$ -phase was enriched with Cu, while Al was more soluble in the matrix phase. The needle-like martensitic texture was found only in the matrix. This texture provided the hardness to reach a maximum at 213 HV in the Cu–20.8wt%Zn–5.8wt%Al alloy. For the alloys containing In, the maximum hardness was 204 HV in the sample containing 0.5 wt%In. For the Cu-Al-Mn alloys, the samples obtained 100% strain recovery in the sample with 2.0 wt%Mn. The hardness and shape memory effect increased with decreasing Mn. Transmission Electron Microscope (TEM) revealed the twin in all samples. It was indicated that the martensitic deformation was accommodated by micro-twinning with the angle of 90° and 55°. These twins were one requirement for shape recovery of the SMAs. However, it was found in the result that the mechanical rolling affected the martensitic texture, and diminished the shape memory effect.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทสรุปผู้บริหาร	ii
บทคัดย่อ	v
Abstract	vi
สารบัญ	vii
สารบัญรูป	ix
สารบัญตาราง	xi
<b>บทที่ 1 ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม</b>	<b>1</b>
1.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	1
1.1.1 โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลัก	3
1.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องมือชั้นสูง	4
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	7
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	8
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	8
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	9
<b>บทที่ 2 กระบวนการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>12</b>
2.1 วัสดุและอุปกรณ์	12
2.1.1 โลหะ	12
2.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนซีผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง	12
2.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมปูน การหล่อโลหะและการตัดตัวอย่าง	13
2.1.4 เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	14
2.2 ขั้นตอนการทดลอง	17
2.2.1 การเตรียมส่วนผสม	17
2.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	17
2.2.3 ขั้นตอนทดสอบการคืนรูป	19
2.2.4 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปเชิงกล	20
2.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการหมอง	20

2.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็ง	20
2.4.1 การขัดชิ้นงาน	20
2.4.2 การวัดความแข็ง	21
2.5 การศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	21
	<b>หน้า</b>
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
2.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม	21
2.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	23
<b>บทที่ 3 ผลและอภิปรายผล</b>	24
3.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	24
3.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูป	25
3.2.1 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Zn-Al	26
3.2.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn	30
3.3 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป	30
3.4 ความสามารถในการต้านทานการหมอง	30
3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง	34
3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ	34
3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ	35
3.6 การวัดความแข็ง	37
3.6.1 การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ	37
3.6.2 การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Al-Mn	39
3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	43
<b>บทที่ 4 สรุปผลโครงการวิจัย</b>	46
4.1 สรุปผลโครงการวิจัย	46
4.2 ผลงานอื่น ๆ	47
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	48
<b>ภาคผนวก</b>	50

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al	17
2.2	โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Al-Mn	17
3.1	การทดสอบความสามารถในการคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
3.2	อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร	27
3.3	อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร	29
3.4	อัตราการคืนรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn	30
3.5	การเปลี่ยนแปลงสีในตัวอย่างทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง	31
3.6	ค่าสีในระบบ CIE ของทองแดงบริสุทธิ์	31
3.7	ค่าความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ	37
3.8	ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Zn-Al หลังทดสอบการจำรูป	38
3.9	ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Al-Mn หลังทดสอบการจำรูป	39
3.10	การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่าง 0.3 wt% In	42
3.11	การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่างต่าง ๆ	42
3.12	การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดแนวแผ่น A และ B	45

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	Hysteresis loop ของโลหะผสมจำรูป	2
1.2	การเปลี่ยนโครงสร้างระหว่างมาเทนไซต์และออสเทนไนต์ในโลหะผสมจำรูป	2
1.3	การเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะ Cu-Zn-Si	3
1.4	โครงสร้างมาเทนไซต์ของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al-Ti	4
1.5	ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอนหลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 77.30Cu-13.60Zn-8.99Al	5
1.6	ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอนหลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 78.30Cu-12.80Zn-8.84Al-0.10Ti	5
1.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงข้อบกพร่องแบบเส้นในเฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag	6
1.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงโครงสร้างผลึกแฝดภายในเฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag	7
1.9	แผนวิธีดำเนินการวิจัย	11
2.1	โลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง	12
2.2	วัสดุและอุปกรณ์หลักสำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนซีผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง	13
2.3	(a) ปูนหล่อเครื่องประดับ (b) เบ้าโลหะและฐานยาง และ (c) คีมจับและมีดผ่าตัดในการผ่าแม่พิมพ์ยาง	14
2.4	เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น	15
2.5	เครื่องมือขั้นสูงในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเตรียมตัวอย่าง	16
2.6	ชิ้นงานเทียนซีผึ้ง	18
2.7	ลักษณะเบ้าปูน	19
2.8	ต้นโลหะหลังหล่อ	20
2.9	การทดสอบการคืนรูป	20
2.10	การเตรียมตัวอย่างพอยล์บางด้วยด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม	23
2.11	ชิ้นงานพอยล์บางสำเร็จ	23
3.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	24
3.2	ภาพร่างมุมในการทดสอบการดัดงอ	25
3.3	การดัดงอชิ้นงานเพื่อทดสอบการคืนรูป	25
3.4	เส้นกราฟแนวโน้มค่าความแตกต่างของสี	33
3.5	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ	34

รูปที่		หน้า
3.6	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5%In หลังขึ้นรูปทางกล	35
3.7	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ	36
3.8	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังตัดงอและให้ความร้อน	37
3.9	ลักษณะรอยกุดจากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์	36
3.10	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมดภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (แถวซ้าย) และอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (แถวขวา) ที่ส่วนผสมต่างๆ	39
3.11	บริเวณการวิเคราะห้ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในตัวอย่างเจือด้วยอินเดียม 0.3 wt%	40
3.12	Bright-field TEM โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5In สภาวะหลังหล่อ เปรียบเทียบมุมในการเอียงตัวอย่าง	42
3.13	โครงสร้างจุลภาคและแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่ของโลหะผสมจำรูป 0.5%In สภาวะหลังหล่อ	43

## บทที่ 1

### ทฤษฎีและบทบทวนวรรณกรรม

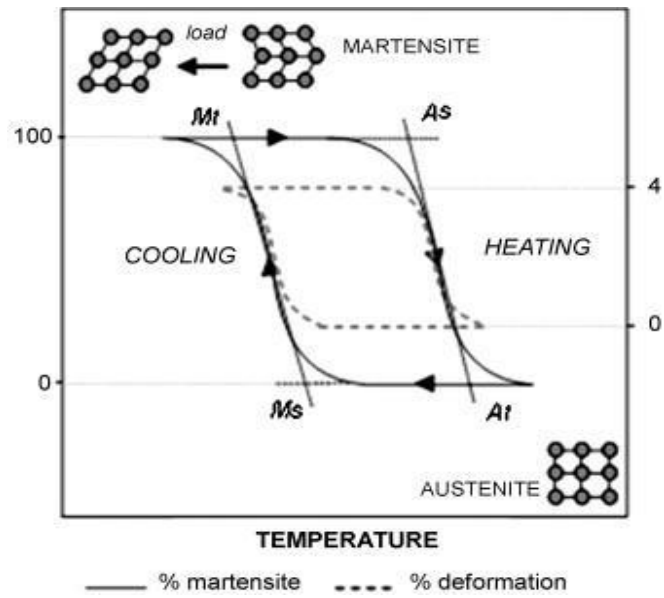
#### 1.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) คือ โลหะที่สามารถจำรูปร่างก่อนการถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูปกลับไปเป็นเหมือนเดิมได้ ซึ่งโลหะผสมจำรูปจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

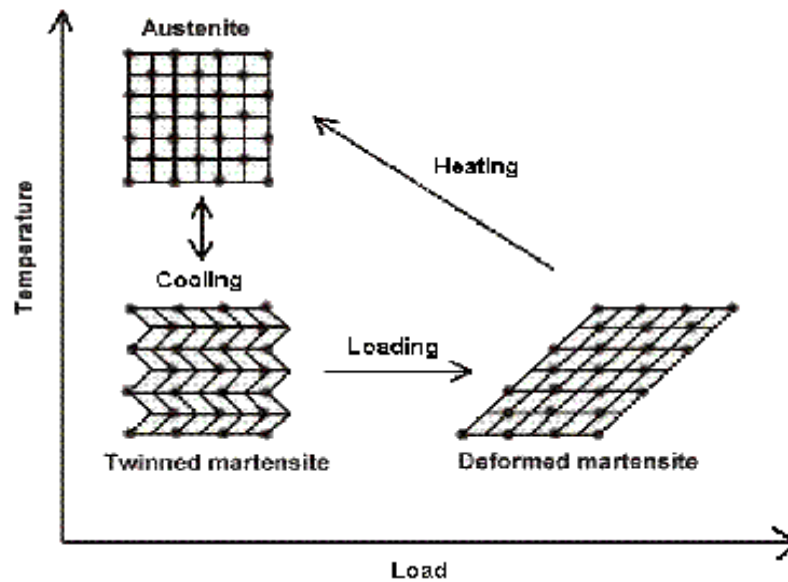
- 1) โลหะผสมจำรูปกลุ่มไทเทเนียมเป็นหลัก เช่น ไทเทเนียมนิกเกิล (Ni-Ti) โดยมีส่วนผสม Ti : Ni เท่ากับ 50 : 50 โลหะในกลุ่มนี้จึงมักใช้ทำกรอบแว่นตา ข้อต่อที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมอากาศยาน และเรือเดินสมุทร นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น ตัวกรองลิ่มเลือด ลวดจัดฟัน เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของมนุษย์
- 2) โลหะผสมจำรูปกลุ่มทองแดงเป็นหลัก เช่น ทองแดง-สังกะสี-อะลูมิเนียม (Cu-Zn-Al) ทองแดง-อะลูมิเนียม-นิกเกิล (Cu-Al-Ni) โดยส่วนผสมต่าง ๆ จะมีทองแดงเป็นธาตุหลัก และมีการเติมธาตุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับทองแดง ตัวอย่างการใช้งานของโลหะกลุ่มนี้ เช่น ทำโครงยกทรง อุปกรณ์ปรับปริมาณน้ำร้อนอัตโนมัติในฝักบัวอาบน้ำ เป็นต้น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปมาระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เมื่อโลหะผสมจำรูปเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้อง โครงสร้างของโลหะผสมจะเป็นมาเทนไซต์ (Mf) เมื่อทำการดัดงอโลหะผสมดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ (As) และเมื่อให้อุณหภูมิที่เหมาะสมตามส่วนผสมนั้น ๆ แก่โลหะผสมจำรูป จะมีผลให้โครงสร้างเริ่มเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ให้และโครงสร้างกลับมาเป็นมาเทนไซต์เหมือนเดิม

จากรูปที่ 1.1 Mf (Martensite finish) จะเป็นโครงสร้างเริ่มต้นคือโครงสร้าง ณ อุณหภูมิห้องของโลหะผสมจำรูปจะเป็นโครงสร้างของมาเทนไซต์และเมื่อโลหะได้รับการแปรรูปด้วยการดัดงอ โครงสร้างจะเริ่มเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์ As (Austenite start) คือการเริ่มต้นเป็นออสเทนไนต์จนกระทั่งโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์ Af (Austenite finish) เมื่อให้ความร้อนกับโลหะหรือ อุณหภูมิที่โลหะจะคืนรูป การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้โครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์เปลี่ยนกลับมา เป็นมาเทนไนต์ในที่สุด ซึ่งโครงสร้างจะเริ่มเป็นมาเทนไนต์ที่ Ms (Martensite start) และกลายเป็นมาเทนไนต์ที่สมบูรณ์อีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1.2



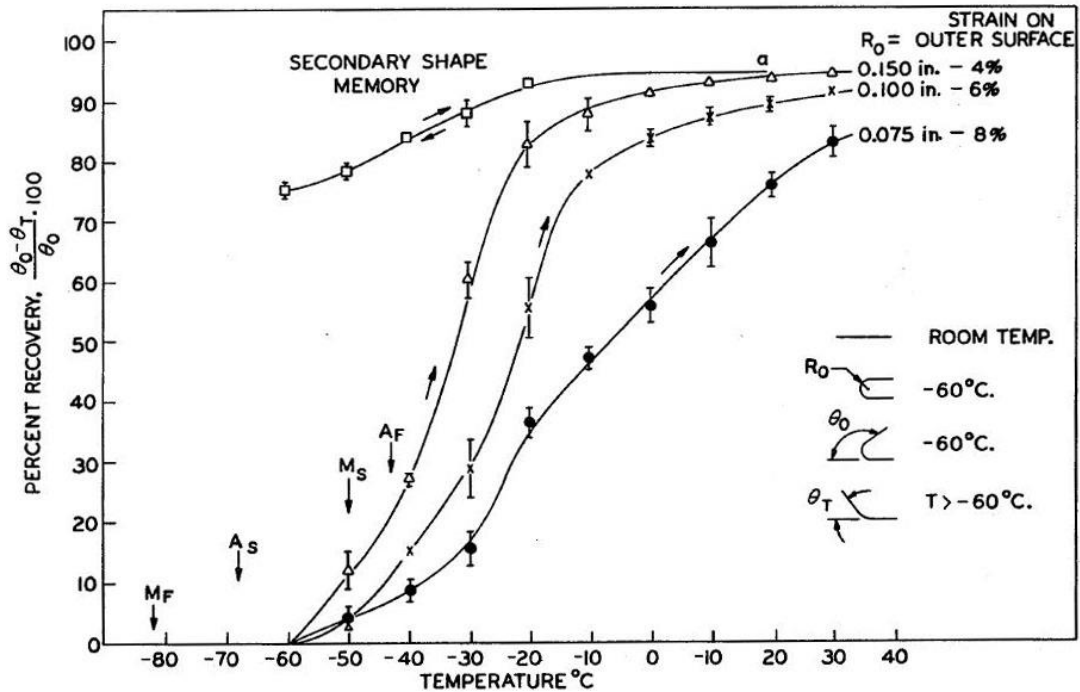
รูปที่ 1.1 Hysteresis loop ของโลหะผสมจำรูป (Nespoli และคณะ, 2010)



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนโครงสร้างระหว่างมาเทนไซด์และออสเทนไนต์ในโลหะผสมจำรูป (phase transformation, 2560)

### 1.1.1 โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลัก

Pops และ Johnson (1978) ได้ศึกษาโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Si ที่ส่วนผสมอยู่ในช่วง 62-65wt%Cu 35-38wt%Zn และ 0.3-0.5wt%Si พบว่าโครงสร้างจะรวมกันอยู่ในรูปแบบเบต้าเฟส องค์ประกอบที่ใช้ในการทดลองของรายงานนี้ ประกอบด้วย กลุ่มที่ (1) ใช้ 62.19wt%Cu-37.37wt%Zn-0.44wt%Si มีการคืนรูปเมื่อให้อุณหภูมิที่ประมาณ  $-55 \pm 20$  °C หรือกลุ่มที่ (2) ใช้ 63.20wt%Cu-36.18wt%Zn-0.46wt%Si มีการคืนรูปเมื่อให้อุณหภูมิที่ประมาณ  $13 \pm 20$  °C แสดงดังรูปที่ 1.3 เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิที่เหมาะสม

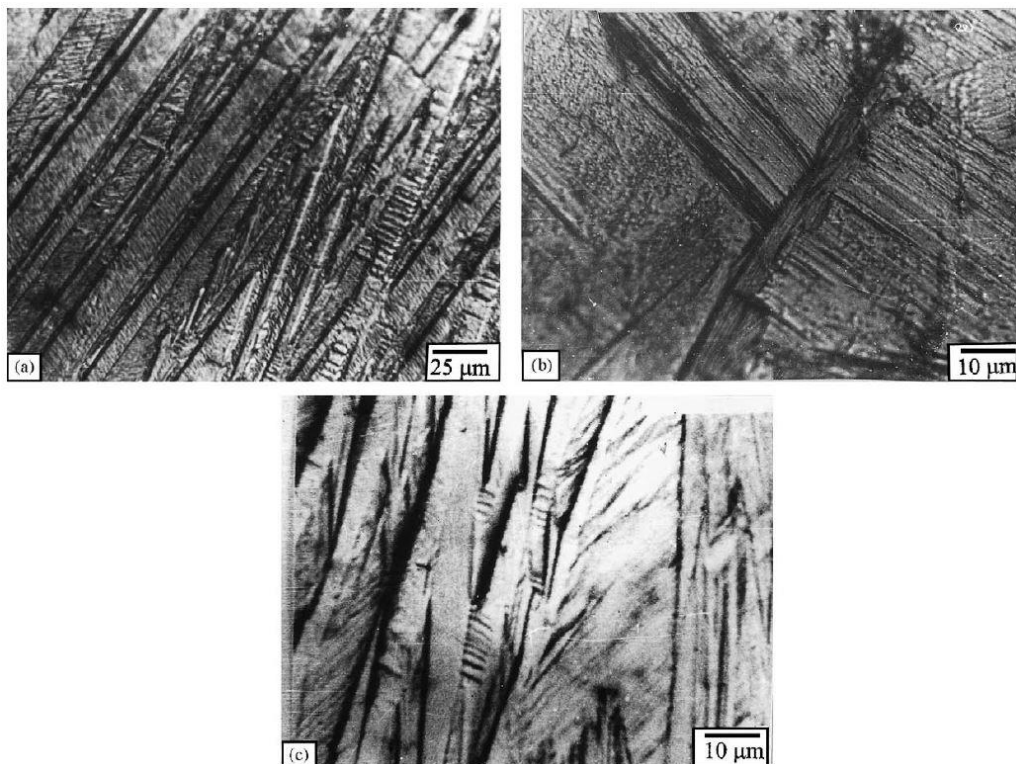


รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะ Cu-Zn-Si (Pops และ Johnson, 1978)

Hodgson (1990) ได้ทำการศึกษอุณหภูมิที่โลหะผสมจำรูปสามารถคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ และส่วนผสมที่แตกต่างกันหลากหลายชนิด พบว่าอุณหภูมิในการคืนรูปโลหะผสมรูปมีช่วงอุณหภูมิการคืนตัวที่ต่างกันขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ตามส่วนผสม ซึ่งนิเกิลไทเทเนียมมีช่วงของอุณหภูมิการคืนตัวที่น้อยกว่าและเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสามารถให้ได้หลากหลายจึงเป็นที่นิยมในการใช้ และอุณหภูมิการคืนรูปของ Cu-Zn-Al มีช่วงกว้างตั้งแต่  $-180$  °C ถึง  $200$  °C ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าแต่มีค่าวัสดุที่ถูกกว่าหาได้ง่ายจึงเป็นโลหะผสมจำรูปที่สามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ และสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพความแข็งแรงด้วยการเพิ่มเติมธาตุอื่นเข้าไปได้ เพื่อให้อุณหภูมิในการคืนรูปสูงขึ้นได้



โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al นั้น แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.4a และโครงสร้างดังกล่าวจะยังปรากฏเห็นได้ชัดถึงแม้จะมีการเจือด้วยธาตุเจือต่างๆ เช่นผลของการเจือด้วยธาตุ Gd (Wen Xu, 2008), Ti (Bhuniya และคณะ, 2005a), Zr (Bhuniya และคณะ, 2005b; Stipcich และ Romero, 2017) ทั้งนี้ธาตุเจือมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมาเทนไซต์เมื่อโลหะได้รับอุณหภูมิและการแปรรูป ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการตกตะกอนที่ต่างกัน โดยพบว่าการเจือด้วย ธาตุ Zr มีผลให้มีการตกตะกอนในโลหะจำรูป Cu-Zn-Al มีปริมาณมากขึ้นและอุณหภูมิในการตกตะกอนต่ำลง ดังนั้นโลหะจึงมีการบ่มแข็ง (age hardening) ที่เร็วกว่าโลหะที่ไม่ได้เจือ Zr โดยตะกอนดังกล่าวเห็นได้ชัดเจนที่สภาวะหลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C (รูปที่ 1.4b) และรูปที่ 1.4c แสดงลักษณะการเรียงตัวแบบมีทิศทางของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่อุณหภูมิ 300 °C การเจือด้วย Ti ทำให้เกรนของมาเทนไซต์มีขนาดเล็กลง (grain refinement) ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของโลหะ

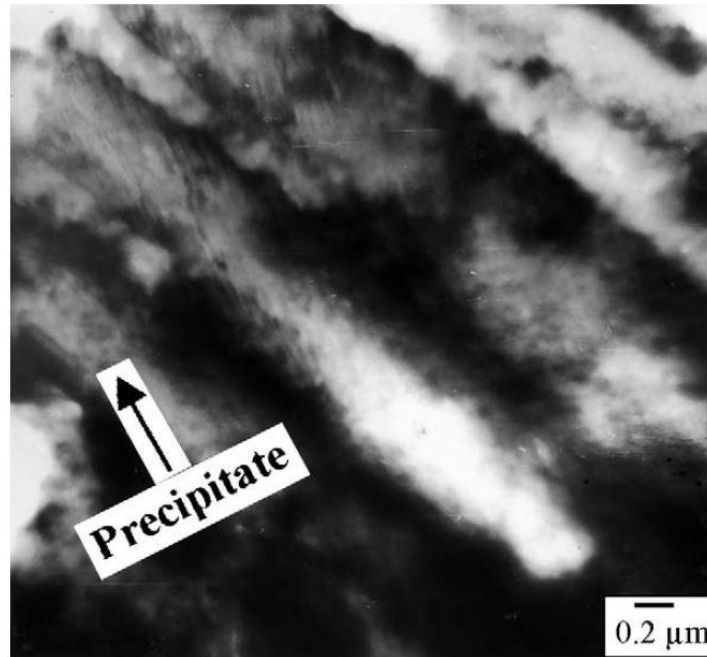


รูปที่ 1.4 โครงสร้างมาเทนไซต์ของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al-Ti (a) การเรียงตัวของโครงสร้างเม็ดหลังจากบ่มที่ 75 °C (b) การเกิดตะกอนหลังบ่มที่ 250 °C (c) การเปลี่ยนแปลงลักษณะของมาเทนไซต์หลังบ่มที่ 300 °C (Bhuniya และคณะ, 2005b)

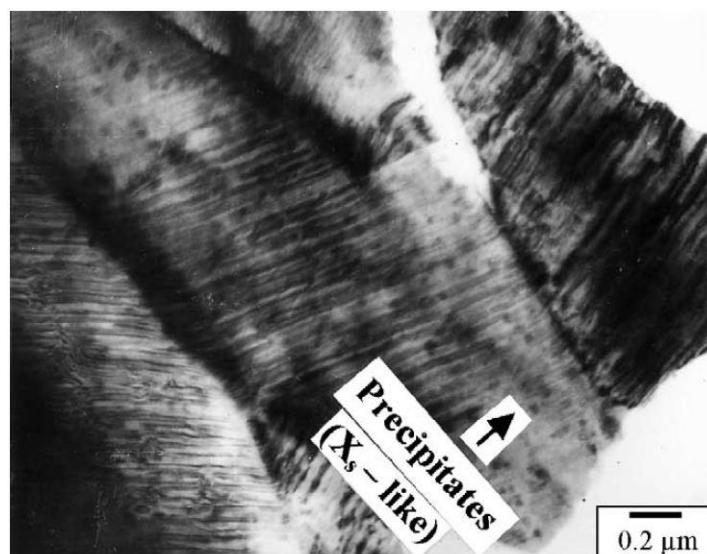
### 1.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องมือขั้นสูง

จากการศึกษาโลหะผสมจำรูปที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) แสดงให้เห็นถึงผลของธาตุเจือต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม เช่น ลักษณะตะกอนในโครงสร้างที่แตกต่างกันของ

มาแทนไซต์ที่เจือและไม่เจือ Ti โดยโลหะที่เจือด้วย Ti จะพบตะกอนขนาดเล็กของ  $\text{Cu}_2\text{AlTi}$  ในโครงสร้างมาแทนไซต์ที่มีขนาดเล็กและมีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันมากกว่า เมื่อเทียบกับโลหะผสมที่ไม่ได้เจือ Ti ดังแสดงในรูปที่ 1.5 และ 1.6



รูปที่ 1.5 ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอนหลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 77.30Cu-13.60Zn-8.99Al (Bhuniya และคณะ, 2005a)



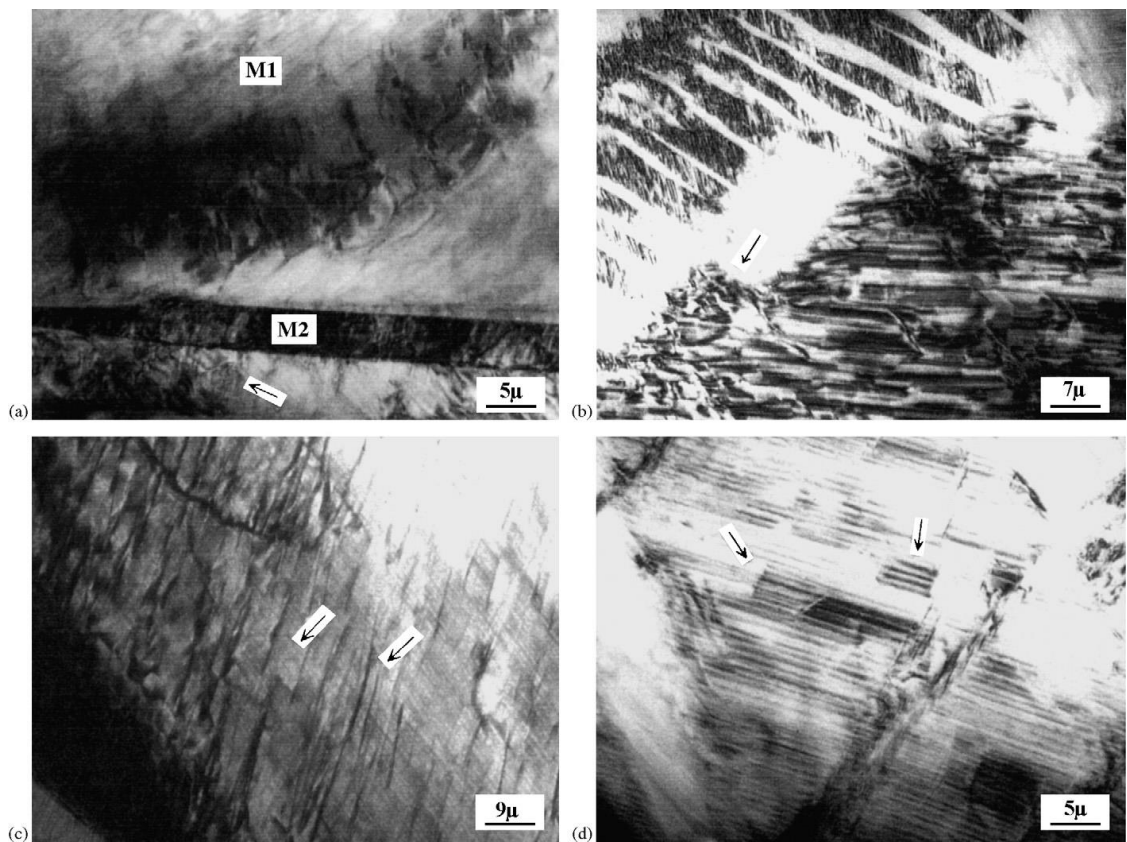
รูปที่ 1.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอนหลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 78.30Cu-12.80Zn-8.84Al-0.10Ti (Bhuniya และคณะ, 2005a)

สำหรับโลหะผสมจำรูปชนิดใหม่ระบบ Cu-Al-Ag นั้นได้มีรายงานโดย Guilemany และคณะ (2006) ว่าการเติม 0.32 wt%Ag เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยสามารถเปลี่ยนลักษณะทางธรรมชาติของการเปลี่ยนเฟสมาเทนไซต์ทำให้อุณหภูมิ Ms เปลี่ยนจาก 370 °C เป็น 257 °C

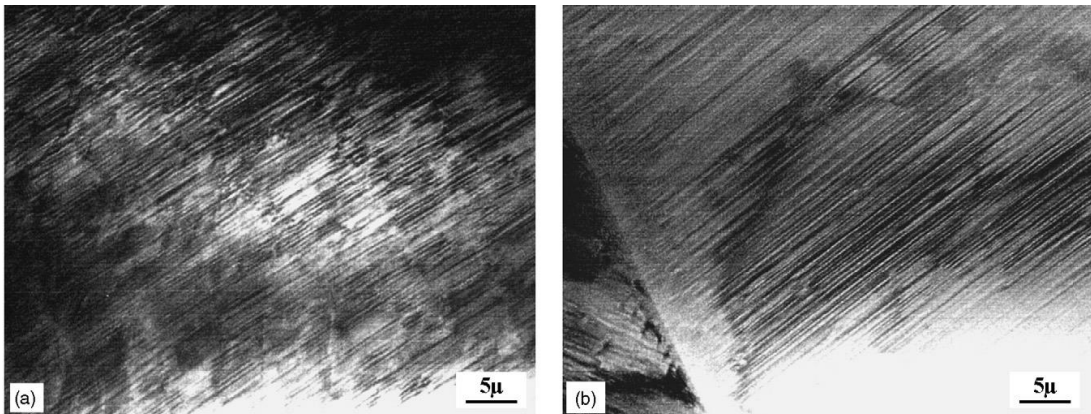
รูปที่ 1.7a และ 1.7b แสดงลักษณะโครงสร้างของ Alloy A1(Cu-Al-2.78Ag) และ Alloy A2(Cu-Al-1.57Ag) แสดงลักษณะของข้อบกพร่องแบบเส้น (discolation) ซึ่งมีอยู่หนาแน่น ดังแสดงด้วยลูกศร นอกจากนี้ยังพบแผ่นมาเทนไซต์ขนาดใหญ่ (M1) และแผ่นมาเทนไซต์แบบบาง (M1) ในโครงสร้างจุลภาค ดังกล่าว

รูปที่ 1.7c แสดงเฉพาะลักษณะข้อบกพร่องแบบเส้นในแนวขนานกันภายในแผ่นของมาเทนไซต์ดัง แสดงด้วยลูกศร จากโครงสร้างจะเห็นว่าเมื่อลดปริมาณเงินลง ความหนาแน่นของข้อบกพร่องแบบเส้นก็จะ ลดลงด้วย โดยจากการศึกษาพบว่าแนวข้อบกพร่องแบบเส้นที่สมบูรณ์จะไม่สามารถเกิดได้ในแผ่นของเฟส มาเทนไซต์และจะพบแค่เพียงข้อบกพร่องแบบเส้นบางส่วน (partial dislocation) และแนวการเคลื่อนที่ของระนาบหลัก (stacking faults) ดังแสดงในรูปที่ 1.7d (บ่งชี้ด้วยลูกศร)

มีการเปลี่ยนแปลงของระนาบผลึกแฝด (Twin) เป็นขนาดเล็กมาก และระยะระหว่างระนาบของ ผลึกทั้ง 4 ส่วนผสมมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้ระนาบผลึกแฝดขนาดเล็กถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ในตัวอย่าง A1 และ A4 แสดงดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงข้อบกพร่องแบบเส้นในเฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag (a) A1 (b) A2 (c) A3 และ (d) A4 (Guilemany และคณะ, 2006)



รูปที่ 1.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงโครงสร้างผลึกแฝดภายในเฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag (a) A1 และ (b) A4 (Guilemany และคณะ, 2006)

## 1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุฉลาด หรือ Smart Material คือวัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกเช่น มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีความเค้น ซึ่งโลหะจำรูป (shape memory alloys, SMA) ก็จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาด สิ่งที่ทำให้โลหะจำรูปมีความโดดเด่นจากโลหะผสมธรรมดาทั่วไปคือมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการเหนี่ยวนำด้วยความร้อนหรือมีสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด (super elastic) ซึ่งสองสิ่งนี้เป็นสมบัติสำคัญที่โลหะผสมอย่าง นิกเกิลไทเทเนียมหรือโลหะจำรูปชนิดอื่น ๆ

โลหะจำรูปจะมีสมบัติในการคืนรูปภายหลังได้รับแรงกระทำทางกลจนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่เหมาะสม โลหะจำรูปถูกค้นพบมาเป็นเวลานานกว่า 70 ปี พบว่าปรากฏการณ์จำรูปถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดย Chang และ Read ในปี 1951 ซึ่งได้ค้นพบโลหะที่มีสมบัติการคืนรูป ความสามารถในการจำรูปนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโลหะ ซึ่งโลหะที่ใช้ในการทดลองคือโลหะผสมทองคำแคดเมียม (AuCd) ต่อมาในปี 1964 Buehler และคณะ ได้ค้นพบโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม (NiTi) และได้รับการพัฒนาต่อมาในต้นทศวรรษที่ 1960 โดยกองทัพสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้ในกิจการอวกาศแห่งชาติอเมริกา (NASA) โดยใช้ชื่อว่า Nitinol เป็นการผสมระหว่างชื่อของโลหะ 2 ชนิด คือ นิกเกิล (Nickel, Ni) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) โดยโลหะผสมในกลุ่มนิกเกิล-ไทเทเนียม (Ni-Ti Alloys) และกลุ่มที่มีทองแดงเป็นหลัก (Cu-based Alloys) นั้นได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษเนื่องจากมีสมบัติที่เป็นประโยชน์หลายอย่างและที่สำคัญคือ โลหะจำรูปในสองกลุ่มนี้สามารถคืนรูปได้ค่อนข้างมาก จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มากกว่าโลหะจำรูปในกลุ่มอื่น โลหะจำรูปในกลุ่มนิกเกิล-ไทเทเนียมหรือที่รู้จักกันในนามของ ไนตินอล (Nitinol) ประกอบด้วยนิกเกิลและไทเทเนียมอย่างละประมาณ 50% โดยจำนวนอะตอมไนตินอลมีจุดเด่นหลายประการ อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของมนุษย์ ทำให้สามารถใช้ทำวัสดุและอุปกรณ์ในทางการแพทย์ได้หลายชนิด โลหะจำรูปในกลุ่มทองแดง ได้แก่ Cu-Zn-Al และ Cu-Al-Ni รวมถึงโลหะผสมทองแดงผสมซึ่งมีธาตุหลัก 4 อย่าง (Quaternary Systems) โลหะจำรูปในกลุ่มนี้มีสมบัติดีกว่าไนตินอลบางประการ เช่น ทนทานต่อ

การกัดกร่อนได้ปานกลาง อย่างไรก็ตามโลหะกลุ่มนี้มีข้อดีคือสามารถหลอมเหลวและอัดขึ้นรูป (extruded) ได้ค่อนข้างง่าย มีอุณหภูมิเปลี่ยนรูปอยู่ในช่วงกว้าง อีกทั้งยังมีราคาต่ำกว่าในทินอล

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ด้านคือการประยุกต์ศาสตร์และศิลป์เพื่อผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ คือพัฒนาโลหะทดแทนทองที่มีสีใกล้เคียงทอง อีกทั้งยังเป็นโลหะที่มีความสามารถในการจำรูป โดยการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะต่าง ๆ ของโลหะผสมจำรูปในกลุ่มของที่มีทองแดงเป็นหลัก คือ Cu-Al และ Cu-Zn และสามารถนำโลหะที่พัฒนานี้ ไปผลิตเป็นชิ้นงานสร้างสรรค์ด้านเครื่องประดับ เพื่อให้สามารถเป็นแรงบันดาลใจแก่นักออกแบบเครื่องประดับให้เห็นเทคนิคใหม่ในการนำโลหะผสมจำรูปเพื่อใช้ในการออกแบบ เพื่อนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ด้านอัญมณีและเครื่องประดับไทยต่อไป

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาโลหะผสมจำรูประบบที่มีส่วนผสมทองแดงเป็นหลักสำหรับเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในการออกแบบและผลิตเครื่องประดับ
2. เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปและการแปรรูปของโลหะผสมจำรูป
3. เพื่อเป็นแนวทางในการนำโลหะผสมจำรูปผลิตเป็นชิ้นงานสร้างสรรค์ สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

### 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างของโลหะจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก (Cu-based shape memory alloy) โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al เจือด้วยอินเดียม 0.1-1.0 wt% และโลหะผสมจำรูป ระบบ Cu-Al เจือด้วยแมงกานีส 1.5-3.5 wt%
2. การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
3. ทดสอบความสามารถในการจำรูปด้วยการทดสอบการดัดงอ
4. วัดสีด้วยมาตรฐาน CIELAB
5. ศึกษาความสามารถต่อการต้านทานการหมอง
6. วัดความแข็งด้วย Vickers Microhardness
7. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุของโลหะผสมจำรูป
  - ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง
  - ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
  - ศึกษาโครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
  - วิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุด
8. ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อน (hot work) และขึ้นรูปเย็น (cold work)
9. สรุปลักษณะวิเคราะห์ผล
10. ผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1) ด้านวิชาการ

พัฒนาวัสดุใหม่เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกสีเสมือนทองสำหรับการออกแบบเครื่องประดับ โดยสามารถนำโลหะจำรูปผลิตเป็นเครื่องประดับ และเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและนักวิจัยผู้ต้องการ ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะจำรูปสำหรับเครื่องประดับ

2) ด้านนโยบาย

งานวิจัยที่ได้เป็นการส่งเสริมการสร้างหน่วยงานในมหาวิทยาลัยให้เป็นองค์กรที่เป็นแหล่งรวมความรู้ด้านศาสตร์ต่างๆ เพื่อสนับสนุนนโยบายเพื่อให้นักวิจัยการเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้

3) ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

งานวิจัยนี้มีประโยชน์โดยตรงต่อธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งเป็นธุรกิจที่มีมูลค่าสูง และนำเงินเข้าประเทศในลำดับต้น

4) ด้านสังคมและชุมชน

สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรงทั้งในธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับขนาดใหญ่และวิสาหกิจชุมชนโดยเฉพาะกลุ่ม SME ด้านอัญมณีและเครื่องประดับ

5) หน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่จะนำผลงานไปใช้ประโยชน์

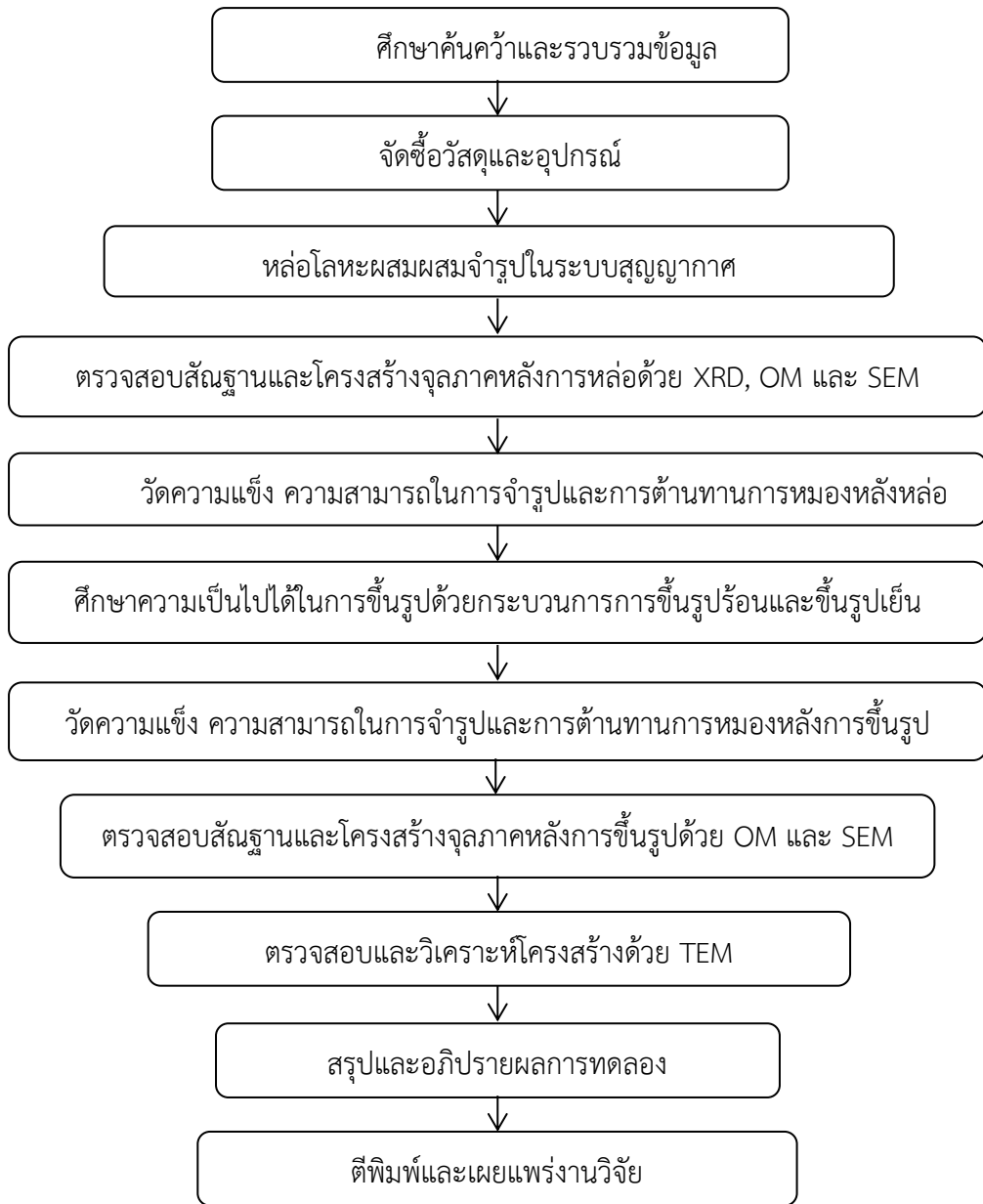
หน่วยงานภาครัฐที่สามารถนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์คือนิสิตนักศึกษาทั้งระดับอุดมศึกษาและบัณฑิตศึกษา ที่เปิดการเรียนการสอนด้านการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ รวมถึงสถาบันที่มีการเรียนการสอนด้านการออกแบบเครื่องประดับ สามารถนำโลหะผสมจำรูปเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชิ้นงานเครื่องประดับ สำหรับหน่วยงานเอกชนคือบริษัทผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ

### 1.6 วิธีการดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถึงสมบัติทางกล ทางแสงและทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูปเสมือนทองในระบบที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก อีกทั้งยังคงสภาพเป็นโลหะที่มีการจำรูปได้ เพื่อผลิตเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการผลิตเครื่องประดับ โดยชิ้นงานจะหล่อด้วยระบบสูญญากาศ โดยสถานที่ทำการทดลอง เตรียมตัวอย่างโลหะผสม การวิเคราะห์เบื้องต้น และการวัดความสามารถต่อการต้านทานการหมอง การวัดความแข็ง สามารถดำเนินการ ณ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือชนิดต่าง ๆ คือ การตรวจวัดและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน สามารถดำเนินการที่ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย (รูปที่ 1.9) ดังนี้

- ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์
- จัดเตรียมโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al และ ระบบ Cu-Al หล่อด้วยเครื่องหล่อแบบเหนียวนำ
- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะสัญญาณเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) วัดความแข็ง ด้วยเครื่องวัดความแข็ง รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคและ

- ลักษณะสัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- ทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีวัดการดัดงอ
  - ตรวจสอบสีของชิ้นงานหลังหล่อและชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบการหมองตามมาตรฐาน CIELAB
  - ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปเย็น
  - ทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีวัดการดัดงอหลังการขึ้นรูป
  - เปรียบเทียบความแข็ง โครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เทคนิค XRD และ SEM
  - เตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)
  - ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง ด้วย TEM พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี และโครงสร้างผลึก ด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ (Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) และการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่ Selected-Area Diffraction, SAD)
  - อภิปรายผลการทดลองที่ได้ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล ทางเคมี และเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคการที่ส่วนผสมและสถานะต่าง ๆ
  - สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในรูปแบบการเขียนรายงานและเตรียมผลงานเพื่อการตีพิมพ์ทั้งในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติ
  - ออกแบบและผลิตชิ้นงานเครื่องประดับสร้างสรรค์
  - นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่ผู้สนใจและผู้เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องประดับ



รูปที่ 1.9 แผนวิธีดำเนินการวิจัย



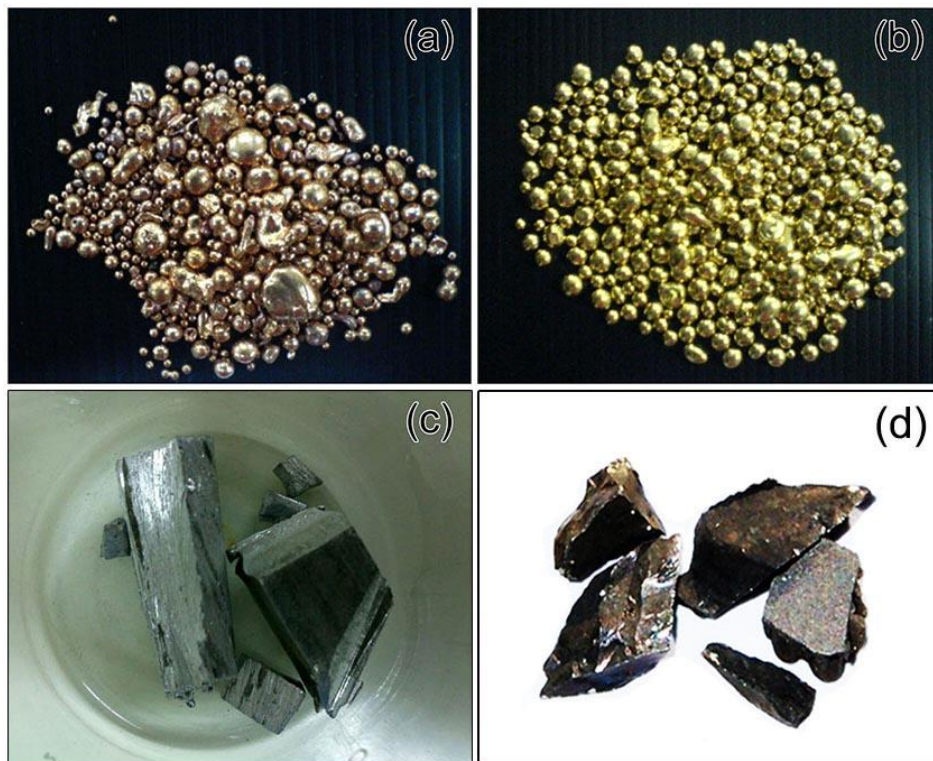
## บทที่ 2 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์

#### 2.1.1 โลหะ

โลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 2. 1) ประกอบด้วย

1. ทองแดงบริสุทธิ์
2. โลหะผสมทองแดงสังกะสีสำเร็จรูป (Master Alloy) สัดส่วนทองแดงและสังกะสี 67: 33
3. อะลูมิเนียมบริสุทธิ์
4. แมงกานีส



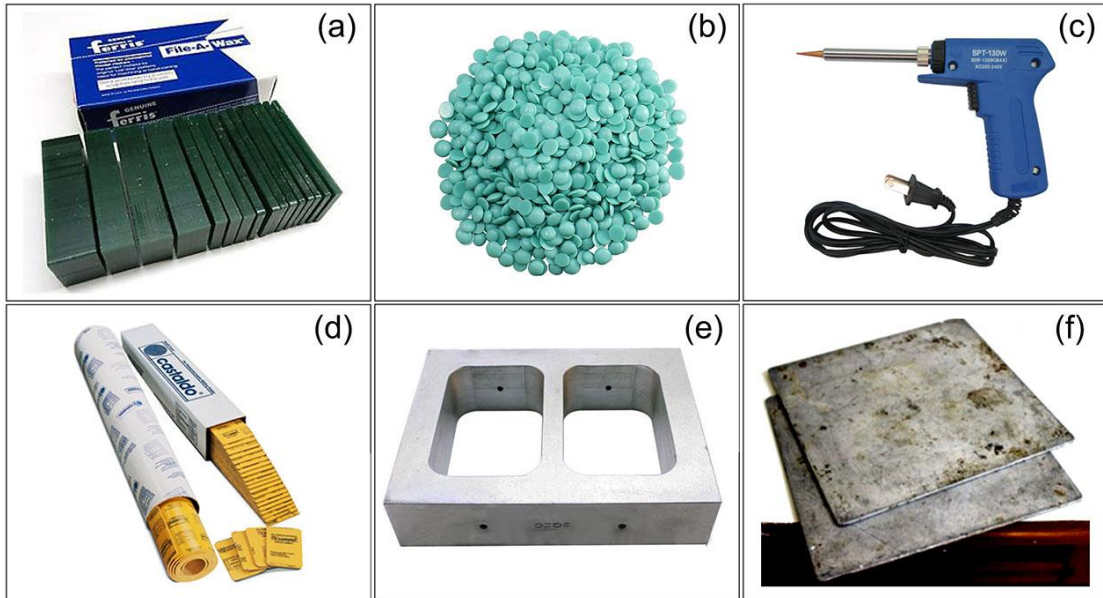
รูปที่ 2.1 โลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง (a) ทองแดง (b) โลหะผสมทองแดงสังกะสีสำเร็จรูป (c) อะลูมิเนียม (d) แมงกานีส

#### 2.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง

อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง มีดังนี้ (รูปที่ 2.2)

1. เทียนขี้ผึ้ง (wax) โดยในการทดลองใช้เทียนขี้ผึ้งทั้ง 2 แบบ คือเทียนขี้ผึ้งแบบแกะลาย (carving & milling wax) ซึ่งมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง สำหรับการเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่นบาง และเทียนขี้ผึ้งแบบเม็ด (beads) สำหรับการขึ้นรูปแบบฉีดชิ้นงานที่แหวน
2. หัวแร้งสำหรับเชื่อมชิ้นงานเทียน

3. แผ่นยางสำหรับการเตรียมแม่พิมพ์ยาง
4. บล็อกแม่พิมพ์อะลูมิเนียมและแผ่นรองอะลูมิเนียมสำหรับการอัดแม่พิมพ์ยาง
5. จุกโลหะสำหรับเป็นฐานของแบบพิมพ์ยาง



รูปที่ 2.2 วัสดุและอุปกรณ์หลักสำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง (a) เทียนขี้ผึ้งแบบแกะลาย (b) เทียนขี้ผึ้งแบบเม็ด (c) แผ่นยาง (d) แผ่นรองอะลูมิเนียม และ (e) แผ่นรองอะลูมิเนียม

### 2.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมปูน การหล่อโลหะและการขัดตัวอย่าง

อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานและขัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่

1. ปูนหล่อเครื่องประดับ
2. เบ้าโลหะและฐานยาง
3. คีมจับแม่พิมพ์ยางและมิดผ้าตัด
4. เบ้าหล่อเรซิน
5. เรซินและตัวเร่งปฏิกิริยา
6. กระดาษทราย
7. ผงขัดอะลูมินา
8. ผ้าสักหลาด

วัสดุและอุปกรณ์หลักแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 (a) ปูนหล่อเครื่องประดับ (b) เบ้าโลหะและฐานยาง และ (c) คีมจับและมีดผ่าตัดในการผ่าแม่พิมพ์ยาง

#### 2.1.4 เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวอย่าง เทียนต้นแบบ เครื่องมือสำหรับกระบวนการหล่อโลหะ และการเตรียมตัวอย่างเพื่อการศึกษา โครงสร้างจุลภาคทั้งการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นและสำหรับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย เครื่องมือขั้นสูง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

1. เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง
2. เครื่องฉีดเทียน
3. เครื่องผสมปูน PORN THEP LNK 530
4. เครื่องดูดสูญญากาศสำหรับเข้าปูน KITZ 400 WOG
5. เครื่องขัดตัวอย่างแบบสองจาน Buehler metaserv 2000
6. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM)
7. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ Vicker's Microhardness (ESEWAY 400)
8. เตอบเข้าปูน TOHO TTM-390
9. เครื่องหล่อโลหะแบบขดลวดเหนียวน้ำ INDUTHERM VC400
10. ตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ด้วย X-ray Diffractometer (XRD) Bruker รุ่น 2D Phaser
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6335F
12. เครื่องโฟกัสไอออนบีม (Focused Ion Beam, FIB) FEI รุ่น Quanta 3D FEG
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) Philips รุ่น CM200

เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 2.4 -2.5



รูปที่ 2.4 เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น (a) เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง (b) เครื่องฉีดยุท (c) เครื่องผสมปูน (d) เครื่องดูดสุญญากาศสำหรับเบ้าปูน (e) เครื่องขัดตัวอย่างแบบสองจาน (f) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (g) เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (h) เตาอบเบ้าปูน และ (i) เครื่องหล่อโลหะแบบขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 เครื่องมือขั้นสูงในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเตรียมตัวอย่าง (a) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (b) เครื่องโฟกัสไอออนบีม และ (c) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

## 2.2 ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมส่วนผสมในการหลอมโลหะด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวดเหนียวน้ำ

### 2.2.1 การเตรียมส่วนผสม

ส่วนผสมของโลหะที่ใช้ในการทดลองใน ระบบ Cu-Zn-Al เจือด้วยอินเดียม 0.1-1.0 wt% และระบบ Cu-Al เจือด้วยแมงกานีส 1.5-3.5 wt% แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 โลหะผสมจํารูประบบ Cu-Zn-Al

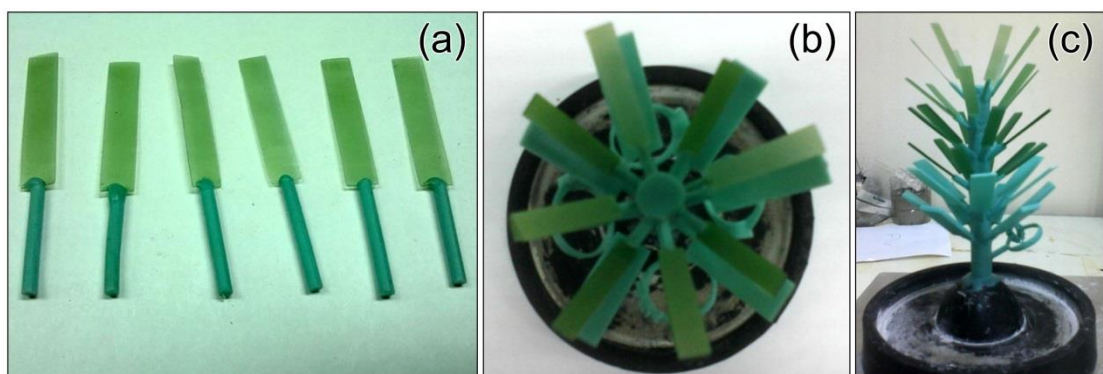
รหัสตัวอย่าง	ส่วนผสม (wt%)			
	Cu	Zn	Al	ln
0%ln	Bal.	20.8	5.8	0
0.1%ln	Bal.	20.8	5.8	0.1
0.3%ln	Bal.	20.8	5.8	0.3
0.5%ln	Bal.	20.8	5.8	0.5
1.0%ln	Bal.	20.8	5.8	1.0

ตารางที่ 2.2 โลหะผสมจํารูประบบ Cu-Al-Mn

รหัสตัวอย่าง	ส่วนผสม (wt%)		
	Cu	Al	Mn
1.5%Mn	Bal.	6.0	1.5
2.0%Mn	Bal.	5.5	2.0
2.5%Mn	Bal.	5.0	2.5
3.5%Mn	Bal.	4.0	3.5

### 2.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

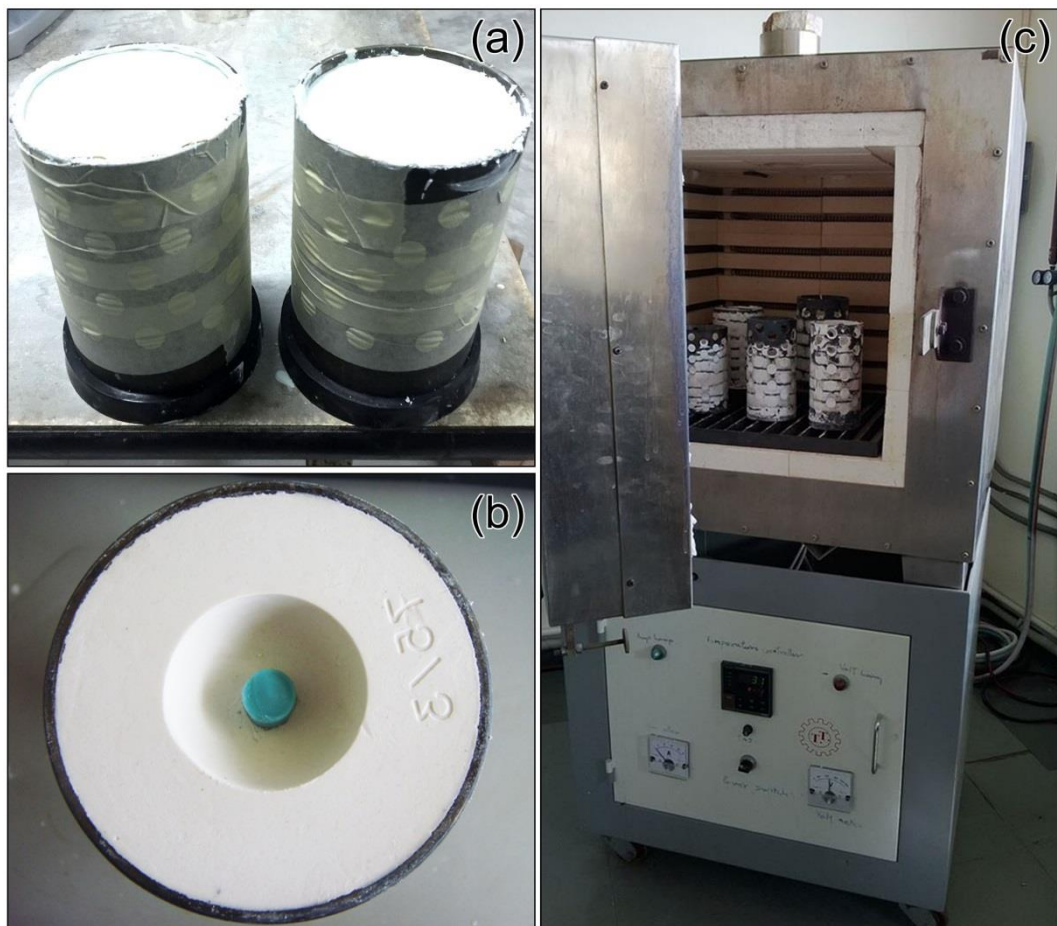
1. เตรียมชิ้นงานเทียนเพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบได้เตรียมใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะแบบแผ่นบางและลักษณะของแหวน โดยชิ้นงานแบบแผ่นบางมีขนาดกว้างคูณยาว 25x5 มม. และมีความหนา 0.3, 0.5 และ 1.0 มม. ตามลำดับ
2. ชั่งน้ำหนักต้นเทียนเพื่อไปคำนวณปริมาณน้ำหนักโลหะที่ต้องใช้ โดยใช้น้ำหนักของทองแดงเป็นหลัก



รูปที่ 2.6 ชิ้นงานเทียนขึ้นฝั่ง (a) ชิ้นงานเทียนติดก้านทางเดินน้ำ และ (b-c) ลักษณะต้นเทียนด้านบนและด้านข้าง

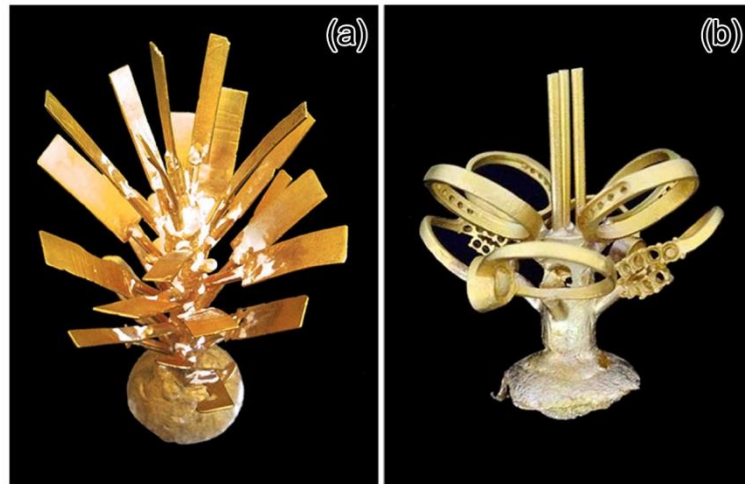
3. ผสมปูนเพื่อทำเข้าโลหะ โดยการผสมปูนจะใช้อัตราส่วน ปูน : น้ำ เท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 40 กรัม คนให้ปูนผสมกับน้ำ
4. นำปูนที่ผสมกับน้ำดีแล้ว โดยการใช้เครื่องผสมปูนตีปูนให้เข้ากัน ซึ่งมีปูนมีปุ่มทั้งหมด 3 ระดับ จนตีปูนเข้ากันดีแล้ว จากนั้นใช้เครื่องดูดสุญญากาศดูดอากาศที่อยู่ในปูนออก เพื่อไม่ให้ปูนพูนเนื่องจากมีฟองอากาศ
5. เทปูนลงกระบอกเหล็กสำหรับหล่อเข้าปูนที่ครอบต้นเทียนชิ้นงานไว้แล้ว โดยเทไม่ให้ชิ้นงานเสียหาย ระดับปูนสูงกว่าชิ้นงานประมาณ 1 นิ้ว
6. นำกระบอกเหล็กที่ทำการเทปูนเสร็จแล้วไปดูดอากาศออกอีกหนึ่งรอบ และตั้งทิ้งไว้ให้ปูนแข็งประมาณ 20 นาที ให้ปูนแห้งสนิท
7. นำเข้าหล่อปูนที่แห้งสนิทแล้วเข้าเตาอบเป็นเวลา 13 ชั่วโมง

การเตรียมเข้าปูนแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะเข้าปูน (a) ปูนในเข้าโลหะมองจากมุมบน (b) นำฐานยางออกจากเข้าโลหะ ก่อนนำเข้าเตาอบปูน (c) การวางเข้าหล่อปูนในเตาอบ

8. หล่อโลหะด้วยเครื่องหล่อขดลวดเหนียวหน้าที่ 1,100 °C โดยใส่ทองแดงบริสุทธิ์ลงไปก่อน ร่อนหลอม จากนั้นใส่โลหะผสมทองแดงสังกะสีลงไป จะมีการระเหยของสังกะสีเกิดขึ้น ร่อนโลหะหลอมละลาย และเทอะลูมิเนียม และอินเดียม ลงไปสุดท้าย อะลูมิเนียมจะเกิดฟิล์มเคลือบผิวหน้าของน้ำโลหะ
9. นำเข้าหล่อปูนออกจากเตาที่อุณหภูมิ 650 °C เข้าเครื่องหล่อทันที และทำการเทโลหะลง เบ้า จากนั้นนำเบ้าไปวางในที่ที่มีอากาศถ่ายเท ประมาณ 15 นาที แล้วล้างปูนออกเพื่อเอา ชิ้นงานหลังหล่อ ชิ้นงานหลังหล่อแสดงดังรูปที่ 2.8

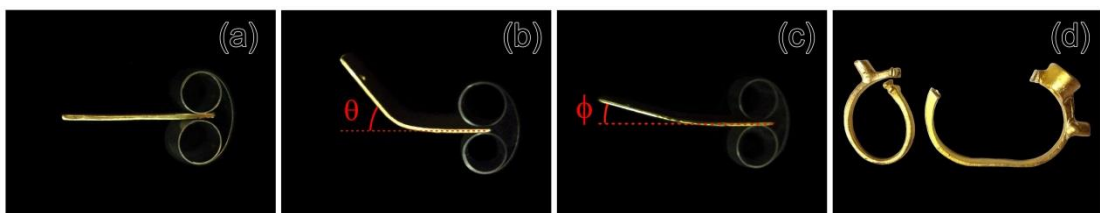


รูปที่ 2.8 ต้นโลหะหลังหล่อ (a) ชิ้นงานแบบแผ่น และ (b) ชิ้นงานแบบแหวน

### 2.2.3 ขั้นตอนทดสอบการคืนรูป

1. ตัดชิ้นงานที่ได้จากการหลอมโลหะ นำชิ้นงานทดสอบในน้ำร้อนประมาณ 100 °C
2. ทดสอบด้วยไดร์เป่าผม ไฟแช็ค และหัวเทอร์ช พร้อมกับวัดอุณหภูมิที่คืนรูป พร้อมทำการ วัดองศาของชิ้นงาน ตามการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย องศาหลังทำการตัดงอ ( $\theta_A$ ) และองศาหลังการคืนรูป ( $\theta_B$ )
3. วัดเปอร์เซ็นต์การคืนรูปของชิ้นงาน ( $\eta$ ) ตามสมการ (2.1)

$$\eta = \frac{\theta_A - \theta_B}{\theta_A} \times 100\% \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.9 การทดสอบการคืนรูป (a) ลักษณะก่อนทดสอบการตัดงอ (b) หลังตัดงอ (c) หลังการคืนรูป (d) การทดสอบการตัดงอของชิ้นงานแหวน





## 2.2.4 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปเชิงกล

การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปด้วยการให้ความร้อนและการรีดร้อน อิงตัวอย่างงานวิจัยของ Asanović และคณะ (2012) ซึ่งได้มีกายศึกษาการแปรรูปเชิงกลของโลหะผสมจำรูปที่ส่วนผสม Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%-Al ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ กระบวนการขึ้นรูปมีเชิงกลศึกษาในตัวอย่างที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มิลลิเมตร รีดจนได้ความหนาสุดท้าย 0.3 มิลลิเมตร (รีดลดความหนา 30%) ขึ้นงานแบ่งเป็น 2 กลุ่ม เพื่อศึกษาความแตกต่างของการขึ้นรูปด้วยการรีดร้อนและรีดเย็น ขั้นตอนการทดลองดังนี้

### กลุ่มที่ 1 รีดร้อน

1. อบละลายเฟส (homogenisation) ที่อุณหภูมิ 830 °C เวลา 2 ชั่วโมง ทำเย็นในน้ำอย่างรวดเร็ว (quenching)
2. อบโลหะที่อุณหภูมิ 830 °C เวลา 20 นาที
3. รีดลดขนาดขึ้นงานให้ได้ความหนา 0.3 มิลลิเมตร
4. อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 20 นาที
5. ตัวอย่างเย็นตัวในอากาศ

### กลุ่มที่ 2 รีดเย็น

1. อบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 830 °C เวลา 2 ชั่วโมง
2. ทำเย็นในน้ำอย่างรวดเร็ว
3. อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 20 นาที
4. รีดลดขนาดขึ้นงานให้ได้ความหนา 0.3 มิลลิเมตร
5. ตัวอย่างเย็นตัวในอากาศ

## 2.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการหมอง

ทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองด้วยเหงื่อเทียม ซึ่งมีส่วนผสมดังนี้

- โซเดียมคลอไรด์ 5 กรัม
- กรดแลคติก 940 มิลลิลิตร
- ยูเรีย 1 กรัม
- แอมโมเนีย 1% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
- น้ำกลั่น 1 ลิตร

นำตัวอย่างแขวนไว้ในภาชนะปิดของสารละลายเหงื่อเทียมดังกล่าว เวลาที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการกันหมองคือ 0-240 ชั่วโมง

## 2.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็ง

### 2.4.1 การขัดชิ้นงาน

1. นำชิ้นงานที่ได้ทำการตัดเก็บไว้มาหล่อเรซิน
2. ผสมเรซินกับตัวเร่ง (Hardening) ในอัตราส่วน 20 : 0.25 กรัม
3. หล่อเรซินโดยใช้เบ้าหล่อเรซินที่มีชิ้นงานอยู่
4. เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดแล้ว นำไปขัดเพื่อวัดความแข็งและดูโครงสร้าง

- นำชิ้นงานไปกระดาศทราย ที่เบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 ด้วยเครื่องขัดตัวอย่างแบบสองจาน
- ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 5, 1 และ 0.3 ไมครอน แสดงในรูปแบบที่ 2.10
- นำชิ้นงานไปกัดกรด ด้วยกรดไนตริก ที่สัดส่วน กรดไนตริกต่อน้ำ เท่ากับ 50:50 โดยใช้สำลีชุบแล้วปาดบนผิวหน้าชิ้นงาน
- นำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 5x, 10x และ 20x
- ทำการวัดความแข็งด้วยน้ำหนักกด 100 gf เวลา 15 วินาที
- นำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยพลังงาน 15 kV ขั้นตอนการดำเนินงานดังกล่าว

#### 2.4.2 การวัดความแข็ง

การวัดความแข็งใช้เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ น้ำหนักกด 100 gf เวลา 15 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM E 384-99 โดยวัดจำนวน 5 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงาน

#### 2.5 การศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ด้วย X-ray Diffractometer ของ Bruker รุ่น 2D Phaser มุมเลี้ยวเบน  $2\theta$  ในช่วง  $20-60^\circ$  เก็บข้อมูลทุก  $0.012^\circ$  ข้อมูลที่ได้เทียบด้วยมาตรฐาน JC-PDF โดยเครื่องมือตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600 และ 1000 ตามด้วยการขัดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 3.0 และ  $1.0 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6335F (รูปที่ 2.5a) ทำงานที่ 15 kV ระยะทำงาน (working distance, WD) 10-11 mm และตรวจสอบองค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometry, EDS)

#### 2.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม

การเตรียมชิ้นงานบางเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย TEM เตรียมด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม (Focused Ion Beam, FIB) FEI รุ่น Quanta 3D FEG (รูปที่ 2.5b) หลักการเบื้องต้นของการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางด้วยเครื่องมือนี้คือการยิงลำไอออนของแกเลียม (Gallium ion,  $\text{Ga}^+$ ) ที่พลังงาน 30 KV เพื่อขุดตัวอย่างทำให้เกิดหลุมบนตัวอย่าง โดยขั้นตอนดังนี้

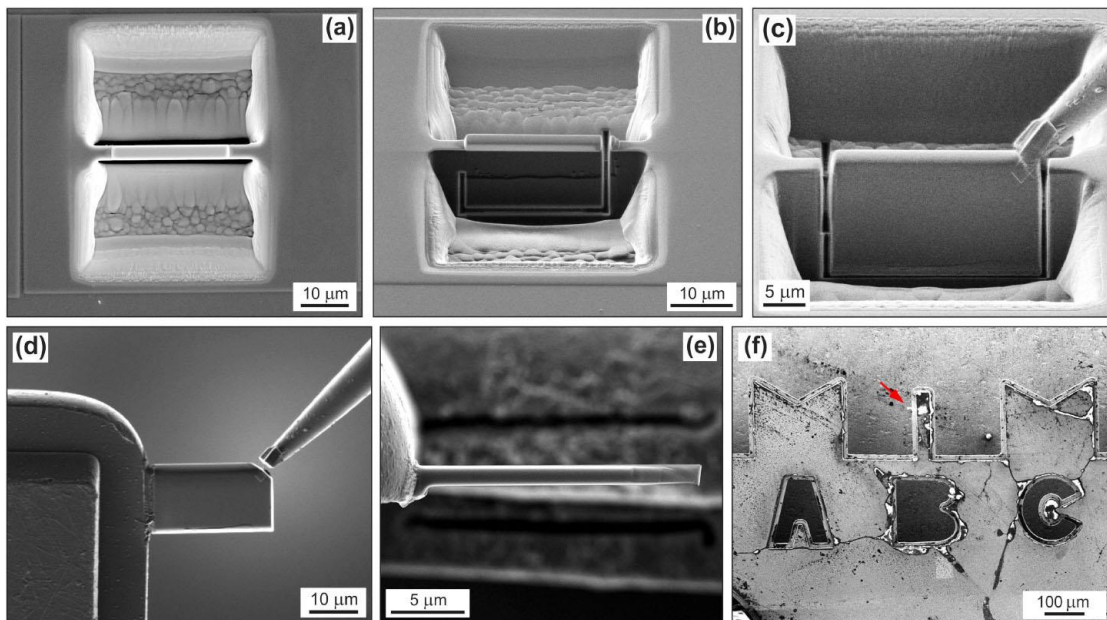
- เคลือบผิวตัวอย่างด้วยคาร์บอนเพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้
- ทำการเคลือบหรือตกตะกอนของแพลทินัม (platinum deposit) บนผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานและเพื่อความเรียบของการตัดด้วยไอออน
- ยิงลำไอออนของแกเลียมเพื่อขุดให้เกิดหลุมทั้งด้านบนและด้านล่างของบริเวณที่ทำการเคลือบด้วยแพลทินัม ขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดเป็นกำแพงบาง (thin wall) ในระดับไมโครเมตรเกิดขึ้นระหว่างรอยขุดทั้งสองนี้

4. ตัดตัวอย่างเป็นรูปตัวยู (U-cut) โดยเว้นระยะการตัดไม่ให้ชิ้นงานบาง เรียกว่าฟอยด์บาง (thin foil) หลุดออกจากตัวอย่าง
5. เชื่อมชิ้นงานในส่วนของรูปตัวยูที่ตัดได้นี้เข้ากับปลายเข็มของ Omniprobe
6. ตัดชิ้นงานส่วนที่เหลือของรูปตัวยู เพื่อให้ชิ้นงานฟอยด์บางหลุดออกจากตัวอย่าง
7. ย้ายชิ้นงานฟอยด์บางไปยังกริดทองแดง (Cu-grid) โดยเชื่อมต่อชิ้นงานฟอยด์บางกับบริเวณปลายของนิ้วบี (B-finger) ซึ่งเป็นตำแหน่งตัวหนังสือบีบนกริดทองแดง
8. ชัดผิดชิ้นงานโดยใช้ใช้ลำแสงเลเซอร์ไอออนพลังงานต่ำเพื่อให้ความหนาชิ้นงานค่อยๆ บาง จนกระทั่งชิ้นงานมีความหนาดำกว่า 100 นาโนเมตร

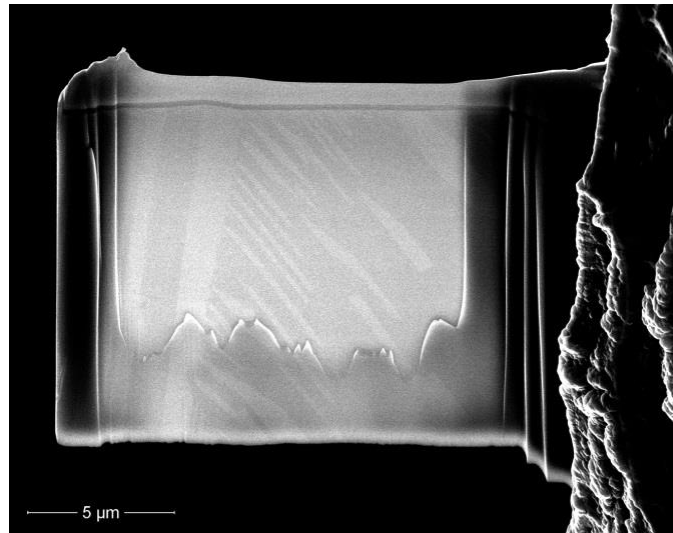
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟอยด์บางและชิ้นงานสำเร็จแสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11

ตามลำดับ ประกอบด้วย

- (a) หลุมที่เกิดจากการชูดด้วยลำแสงเลเซอร์ไอออน
- (b) การตัดชิ้นงานรูปตัวยู
- (c) เชื่อมต่อปลายเข็ม Omniprobe กับตัวอย่างฟอยด์บางและตัดส่วนที่เหลือของรูปตัวยู
- (d) เชื่อมต่อฟอยด์บางกับกริดทองแดงและตัดปลายเข็มเพื่อให้ตัวอย่างฟอยด์เป็นอิสระ
- (e) ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมต่อบนกริดทองแดง
- (f) ตำแหน่งชิ้นงานฟอยด์บางบน B-finger ของกริดทองแดง



รูปที่ 2.10 การเตรียมตัวอย่างฟอยด์บางด้วยด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม (a) หลุมที่เกิดจากการชูดด้วยลำแสงเลเซอร์ไอออน (b) การตัดชิ้นงานรูปตัวยู (c) เชื่อมต่อปลายเข็ม Omniprobe กับตัวอย่างฟอยด์บางและตัดส่วนที่เหลือของรูปตัวยู (d) เชื่อมต่อฟอยด์บางกับกริดทองแดงและตัดปลายเข็มเพื่อให้ตัวอย่างฟอยด์เป็นอิสระ (e) ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมต่อบนกริดทองแดง (f) ตำแหน่งชิ้นงานฟอยด์บางบน B-finger ของกริดทองแดง



รูปที่ 2.11 ชิ้นงานพอยล์บางสำเร็จ

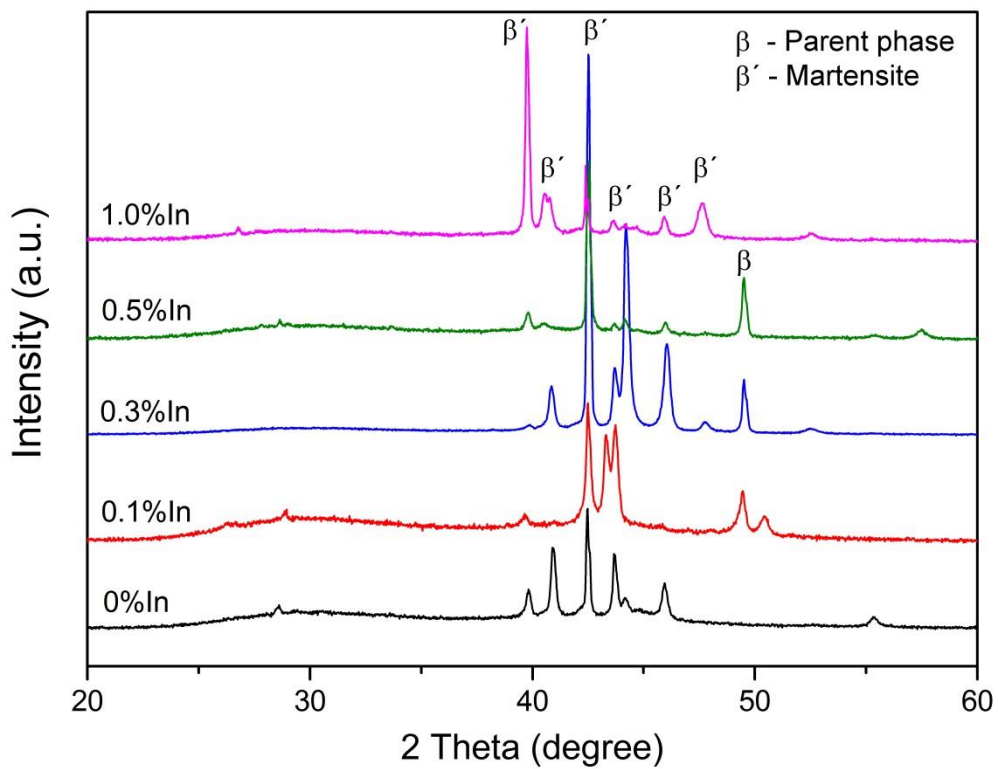
## 2.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Philips รุ่น CM200 (รูปที่ 2.5c) พลังงาน 200 keV และตรวจสอบองค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค EDS และการศึกษาโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่

### บทที่ 3 ผลและอภิปรายผล

#### 3.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

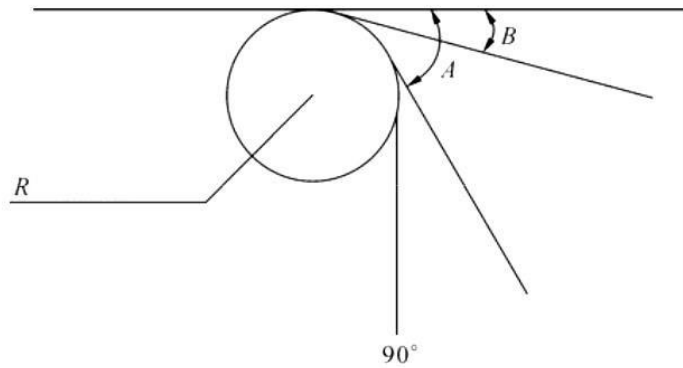
รูปที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Cu-Zn-Al ที่เจือด้วยอินเดียม 0–1.0 wt% ทุกส่วนผสมแสดงโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ ( $\beta'$ ) โดยที่ส่วนผสม 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% In จะมีเฟสผสมของเฟสแม่ (Parent phase) ซึ่งเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ ร่วมกับโครงสร้างมาเทนไซต์ ในขณะที่ชิ้นงาน 1.0 wt% In แสดงเพียงโครงสร้างมาเทนไซต์เท่านั้น โดยเฟสมาเทนไซต์จะพบเป็นเฟสหลักสำหรับโลหะผสมในระบบดังกล่าว (Kwarciak, 1986); Blanco และคณะ, 2013); Xiaomin และคณะ, 2008); Bujoreanu, 2008)



รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

### 3.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูป

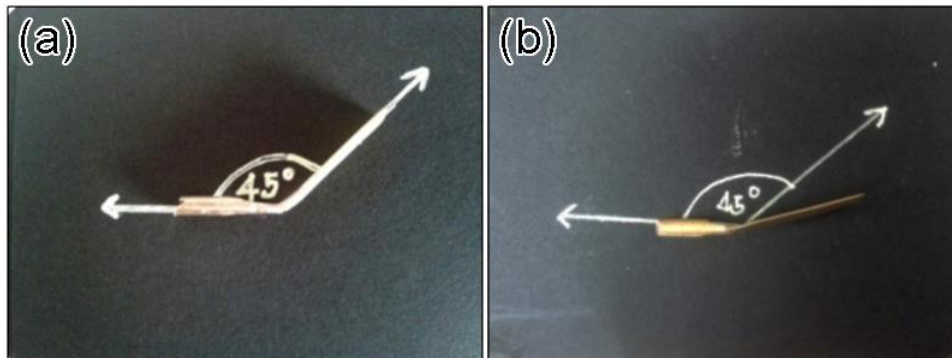
การทดสอบการจำรูปของโลหะทำโดยการดัดงอชิ้นงานให้ทำมุม  $45^\circ$  ซึ่งเป็นมุมดัดงอเริ่มต้น ( $\theta_A$ ) จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบการคืนรูปด้วยให้ความร้อน ชิ้นงานจะมีการคืนรูปโดยมุมชิ้นงานหลังการคืนรูป ( $\theta_B$ ) จะมียุคสั้นกว่ามุมดัดงอเริ่มต้น ลักษณะมุมดัดงอก่อนและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.2 และลักษณะชิ้นงานจริงจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ภาพร่างมุมในการทดสอบการดัดงอ (ดัดแปลงจาก Xiaomin และคณะ, 2008)

หลังการให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยการวิจัยนี้ให้ความร้อนโดยการจุ่มใน น้ำเดือด ไฟแช็ค และเปลวไฟจากหัวทอร์ช ซึ่งมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันประมาณตั้งแต่  $100^\circ\text{C}$  ถึง  $1000^\circ\text{C}$  การคำนวณหาอัตราการคืนรูปสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$\eta = \frac{\theta_A - \theta_B}{\theta_A} \times 100\% \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 การดัดงอชิ้นงานเพื่อทดสอบการคืนรูป (a) ชิ้นงานที่ถูกดัด และ (b) ชิ้นงานหลังให้ความร้อน

### 3.2.1 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Zn-Al

ชิ้นงานทดสอบมี 2 ขนาดคือ  $25 \times 5 \times 0.5$  และ  $25 \times 5 \times 1$  มิลลิเมตร โดยจากการทดสอบการคืนรูปพบว่าโลหะผสมสามารถคืนรูปได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่  $100-200$  °C ขึ้นไป ส่วนชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำร้อนไม่สามารถทำให้โลหะคืนรูปได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบต่ำเกินไป และความหนาของชิ้นงานมีความสำคัญต่อความสามารถในการคืนรูป กล่าวคือความสามารถในการคืนรูปมีมากขึ้นหากชิ้นงานมีความบางลง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยชิ้นงานที่สามารถจำรูปได้ดีที่สุดคือโลหะผสมที่มีส่วนผสมอินเดียม 0.5 wt% ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้งด้วยการให้ความร้อนจากไฟแช็ค ทั้งนี้พบว่าการเจือด้วยอินเดียมตั้งแต่ 1.0 wt% ขึ้นไป โลหะมีความแข็ง เปราะ และไม่สามารถจำรูปได้

ตารางที่ 3.1 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รหัสตัวอย่าง	ความหนา (มิลลิเมตร)	(จำนวนครั้งคืนรูป)		
		น้ำร้อน (อุณหภูมิ $\approx 100$ °C)	ไฟแช็ค (อุณหภูมิ $\approx 700$ °C)	หัวทอร์ช (อุณหภูมิ $\approx 1000$ °C)
0%In	0.5	-	10	3
	1.0	-	7	1
0.1%In	0.5	-	20	2
	1.0	-	5	1
0.3%In	0.5	-	10	2
	1.0	-	-	1
0.5%In	0.5	-	21	3
	1.0	-	13	1
1.0%In	0.5	-	-	-
	1.0	-	-	-

หมายเหตุ ที่ส่วนผสมของอินเดียม 1.0 wt% โลหะมีความแข็ง เปราะ และไม่มีความสามารถในการจำรูป

อัตราการคืนรูปของโลหะผสมที่ความหนา 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยไฟแช็คแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ (ทั้งนี้ตารางไม่ได้แสดงผลของชิ้นงานที่ส่วนผสมอินเดียม 1.0 wt% เนื่องจากโลหะดังกล่าวไม่สามารถคืนรูปได้)



ตารางที่ 3.2 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร

ชิ้นงาน ตัวอย่าง	จำนวนครั้ง ทดสอบ	องศามุมชิ้นงานตั้งอ เริ่มต้น ( $\theta_A$ )	องศามุมชิ้นงาน หลังการคืนรูป ( $\theta_B$ )	อัตราการคืนรูป (%)
0%In	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	20	56
	4	45	18	60
	5	45	20	56
	6	45	30	33
	7	45	30	33
	8	45	30	33
	9	45	30	33
	10	45	35	22
0.1%In	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	20	56
	4	45	15	67
	5	45	15	67
	6	45	20	26
	7	45	20	56
	8	45	25	44
	9	45	25	44
	10	45	20	56
	10	45	35	22

ตารางที่ 3.2 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร (ต่อ)

ชิ้นงาน ตัวอย่าง	จำนวนครั้ง ทดสอบ	องศามุมชิ้นงานตั้งอ เริ่มต้น( $\theta_A$ )	องศามุมชิ้นงาน หลังการคืนรูป( $\theta_B$ )	อัตราการคืนรูป (%)
0.3%In	1	45	20	56
	2	45	30	33
	3	45	25	44
	4	45	35	22
	5	45	35	22
	6	45	35	22
	7	45	35	22
	8	45	35	22
	9	45	30	33
0.5%In	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	25	44
	4	45	25	44
	5	45	20	56
	6	45	20	56
	7	45	25	44
	8	45	25	44
	9	45	25	44
	10	45	25	44

ตารางที่ 3.3 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร

ชิ้นงาน ตัวอย่าง	จำนวนครั้ง ทดสอบ	องศามุมชิ้นงานตั้งอ เริ่มต้น ( $\theta_A$ )	องศามุมชิ้นงาน หลังการคืนรูป ( $\theta_B$ )	อัตราการคืนรูป (%)
0%In	1	45	20	56
	2	45	20	56
	3	45	25	44
	4	45	25	44
	5	45	30	33
	6	45	30	33
	7	45	30	33
0.1%In	1	45	20	56
	2	45	25	44
	3	45	30	33
	4	45	30	33
	5	45	32	28
0.3%In	-	-	-	-
0.5%In	1	45	20	56
	2	45	20	56
	3	45	25	44
	4	45	25	44
	5	45	30	33
	6	45	30	33
	7	45	30	33
	8	45	35	22
	9	45	35	22
	10	45	35	22
	11	45	35	22
	12	45	37	17
	13	45	40	11

หมายเหตุ 0.3%In ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร จากการทดลองนี้โลหะไม่สามารถคืนรูปได้ สันนิษฐานว่า  
อาจเกิดจากสภาวะการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ไม่เหมาะสม

### 3.2.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn

การทดสอบอัตราการคืนรูปของโลหะระบบ Cu-Al-Mn แสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าโลหะที่มีอัตราการคืนรูปที่ดีที่สุดคือโลหะที่มีการเจือด้วยแมงกานีส 2.5 wt% คือมีความสามารถในการคืนรูปได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้หากมีการเจือด้วยแมงกานีสที่มากเกินไปคือปริมาณ 2.5 wt% ขึ้นงานจะมีความแข็งแรงเปราะ ทำให้ไม่สามารถดัดงอได้

ตารางที่ 3.4 อัตราการคืนรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn

ชิ้นงานตัวอย่าง	จำนวนครั้งทดสอบ	องศาหมุนชิ้นงานตั้งออเริ่มต้น ( $\theta_A$ )	องศาหมุนชิ้นงานหลังการคืนรูป ( $\theta_B$ )	อัตราการคืนรูป (%)
1.5%Mn	-	-	-	-
2.0%Mn	1	45	0	100
	2	45	0	100
	3	45	0	100
	4	45	0	100
2.5%Mn	1	45	10	78
	2	45	8	18
	3	45	6	87
	4	45	8	18
3.5%Mn	1	45	25	44
	2	45	27	40
	3	45	26	42
	4	45	26	42

### 3.3 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น ไม่สามารถจำรูปได้ คือโลหะทั้งสองกลุ่มสูญเสียความสามารถในการจำรูป ชิ้นงานมีความเสียหายคือมีการแตกและขาดในระหว่างการรีด

### 3.4 ความสามารถในการต้านทานการหมอง

การทดสอบการหมองด้วยเครื่อง UV-Portable ในระบบ CIE โดยระบุเป็นค่า  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  เพื่อหาค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) โดยหาค่าเฉลี่ย  $\Delta E$  จากการวัดจำนวน 3 ครั้ง โดยระบุเป็นค่าสีในระบบ CIE และค่าเฉลี่ย  $\Delta E$  ลักษณะสีจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง แสดงดังตารางที่ 3.5 และค่าสีแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงสีในตัวอย่างทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง

ชิ้นงาน	เวลา (ชั่วโมง)										
	0	24	48	78	96	120	144	168	192	216	240
Cu											
0%In											
0.1%In											
0.3%In											
0.5%In											

ตารางที่ 3.6 ค่าสีในระบบ CIE ของโลหะผสม

ชิ้นงาน	เวลา (ชั่วโมง)	ค่า CIE L*	ค่า CIE a*	ค่า CIE b*	ค่า CIE $\Delta L^*$	ค่า CIE $\Delta a^*$	ค่า CIE $\Delta b^*$	$\Delta E$
Pure Cu	0	39.1	18.0	16.0	-	-	-	-
	24	33.5	18.5	19.7	5.6	-0.6	-3.7	6.7
	48	39.4	15.4	15.5	-0.26	2.5	0.56	2.6
	72	33.1	14.6	15.0	6.0	3.3	1	6.9
	96	24.24	10.8	6.7	14.9	7.1	9.3	19.0
	120	23.1	12.5	10.8	16.1	5.4	5.2	17.7
	144	23.6	11.3	10.3	15.6	6.57	5.7	17.8
	168	27.4	11.2	8.9	11.7	6.67	7.1	15.7
	192	25.6	10.9	12.0	13.6	6.97	4.1	15.8
	216	26.7	11.1	13.5	12.4	6.8	2.6	14.4
	240	25.5	10.7	11.6	13.7	7.21	4.4	16.0

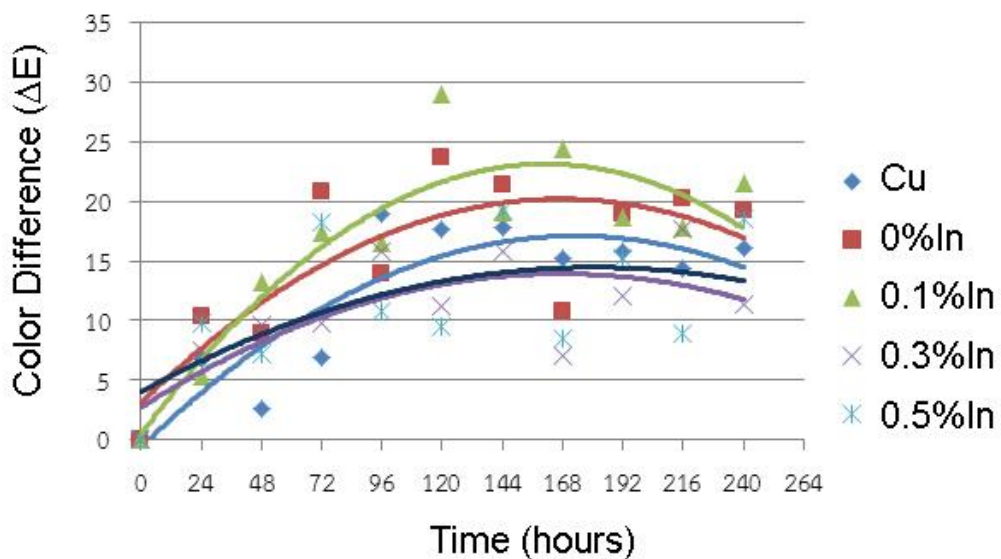
ตารางที่ 3.6 ค่าสีในระบบ CIE ของโลหะผสม (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลา (ชั่วโมง)	ค่า CIE L*	ค่า CIE a*	ค่า CIE b*	ค่า CIE $\Delta L^*$	ค่า CIE $\Delta a^*$	ค่า CIE $\Delta b^*$	$\Delta E$
0%In	0	46.3	3.03	13	-	-	-	-
	24	36.1	5	14.1	10.2	-2.0	-1.1	10.4
	48	45.0	8.2	20.2	1.23	-5.2	-7.2	8.9
	72	26.1	1.5	7.9	20.2	1.5	5.1	20.9
	96	36.2	9.5	20.2	10.0	-6.5	-7.2	13.9
	120	22.9	7.0	13.2	23.4	-3.9	-0.2	23.7
	144	25.2	5.9	10.1	21.0	-2.9	2.9	21.4
	168	53.6	4.3	20.9	-7.3	-1.3	-7.9	10.8
	192	27.6	6.1	13.7	18.6	-3.1	-0.7	18.9
	216	26.3	6	13.5	20.0	-3.0	-0.5	20.2
	240	29.1	8.2	19.9	17.1	-5.2	-6.9	19.2
0.1%In	0	47.5	6.4	21.5	-	-	-	-
	24	44.7	4.1	17.5	2.8	2.3	4.0	5.4
	48	37.1	8.0	13.5	10.4	-1.6	8.0	13.2
	72	32.8	4.6	12.4	14.6	1.8	9.1	17.3
	96	32.3	6.5	15.0	15.2	-0.1	6.5	16.5
	120	20.7	4.8	10.5	26.7	1.6	11	28.9
	144	30.7	7.0	12.4	16.7	-0.6	9.1	19.1
	168	29.8	3.7	4.76	17.6	2.7	16.7	24.5
	192	30.7	6.0	13.5	16.8	0.4	8	18.6
	216	30.7	6.1	15.4	16.7	0.3	6.1	17.8
	240	28.0	6.7	12.3	19.4	-0.3	9.2	21.5
0.3%In	0	44.3	7.0	24.2	-	-	-	-
	24	37.0	8.3	23.1	7.3	-1.3	1.2	7.5
	48	44.5	6.0	14.7	-0.2	1	9.5	9.6
	72	43.8	4.3	14.9	0.5	2.6	9.3	9.7
	96	37.6	2.5	10.6	6.7	4.5	13.6	15.9
	120	47.0	5.1	13.5	-2.7	1.9	10.7	11.2
	144	29.7	6.7	18.3	14.6	0.3	6.0	15.8
	168	46.0	5.9	17.5	-1.7	1.0	6.8	7.1
	192	46.7	5.7	12.4	-2.0	1.3	11.9	12.1
	216	33.0	5.7	10.7	11.3	1.3	13.6	17.7
	240	42.7	6.6	13.0	1.57	0.4	11.2	11.4

ตารางที่ 3.6 ค่าสีในระบบ CIE ของโลหะผสม (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลา (ชั่วโมง)	ค่า CIE L*	ค่า CIE a*	ค่า CIE b*	ค่า CIE $\Delta L^*$	ค่า CIE $\Delta a^*$	ค่า CIE $\Delta b^*$	$\Delta E$
0.5%In	0	47.3	4.9	20.8	-	-	-	-
	24	39.6	8.2	15.8	7.7	-3.3	5	9.7
	48	41.1	8.2	22.6	6.1	-3.3	-1.8	7.2
	72	32.9	7.1	9.5	14.3	-2.2	11.3	18.3
	96	39.2	8.5	11.3	-10.7	-1.7	0.2	10.8
	120	28.5	7.0	20.7	2.8	-0.2	-9.1	9.6
	144	33.2	8.7	7.8	14.0	-3.7	13.1	19.2
	168	44.3	4.9	13.0	3.0	0	7.8	8.4
	192	37.2	8.9	10.0	10.0	-3.9	10.8	15.3
	216	46.9	5.9	12.1	0.3	-0.9	8.7	8.91
	240	31.3	6.8	11.5	15.9	-1.9	9.3	18.5

ผลการตรวจความแตกต่างของสีหลังการทดสอบการหมองของชิ้นงานด้วย UV-Portable ดังแสดงในรูปที่ 3.4 กราฟแสดงความแตกต่างของสีชิ้นงานหลังการทดสอบการหมอง ณ เวลาต่างๆ มีแนวโน้มของสีที่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นที่ โดยชิ้นงานหลังหล่อ 0.3 wt% In มีค่าเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุดคือความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ส่วนผสมอื่น



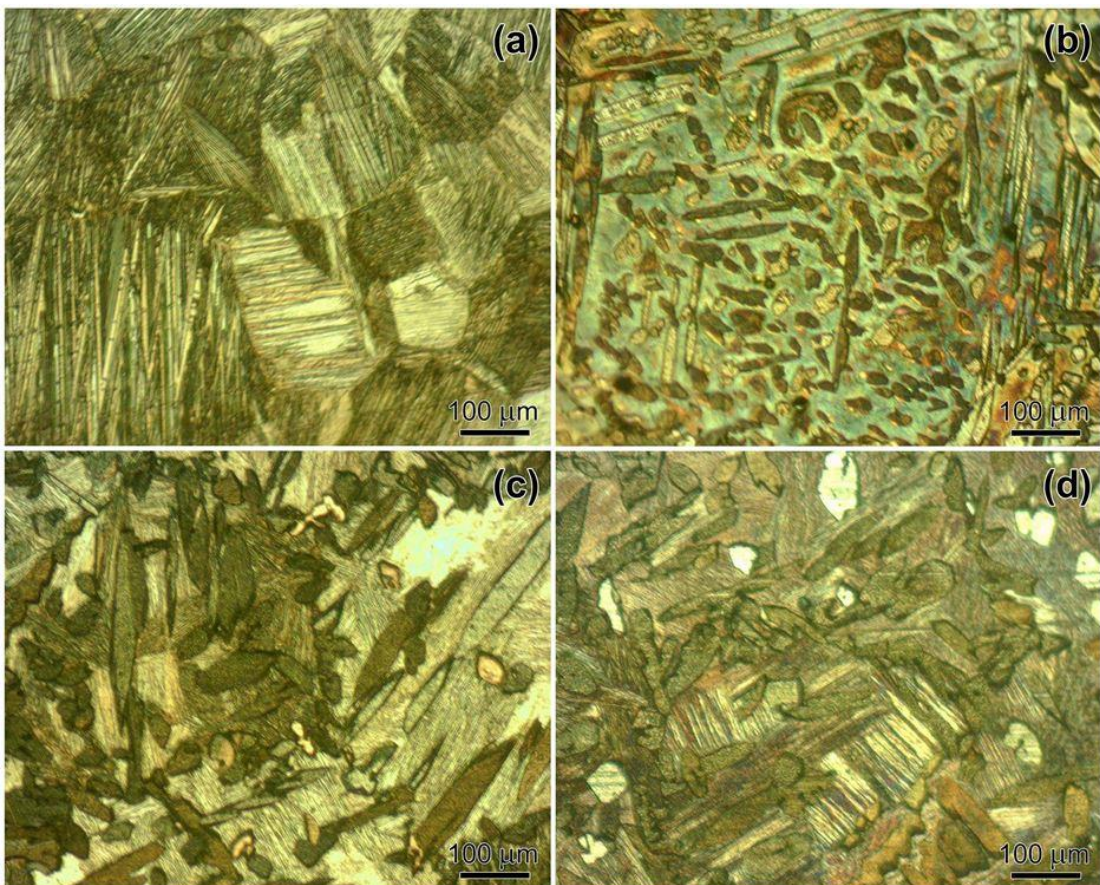
รูปที่ 3.4 เส้นกราฟแนวโน้มค่าความแตกต่างของสี

### 3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง

#### 3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ

รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมจำรูปสภาวะหลังหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10 x พบว่า โลหะมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ( $\beta'$ -phase) เป็นหลัก จากภาพจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะผสมจำรูปที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียม (รูปที่ 3.5a) แสดงเกรนขนาดใหญ่มากกว่า 100  $\mu\text{m}$  และมาเทนไซต์ขนาดใหญ่เห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น โครงสร้างดังกล่าวจะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีส่วนผสมของอินเดียมมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเจืออินเดียมมีผลต่อการลดขนาดของเกรนจึงส่งผลให้ขนาดของมาเทนไซต์ลดลงด้วย

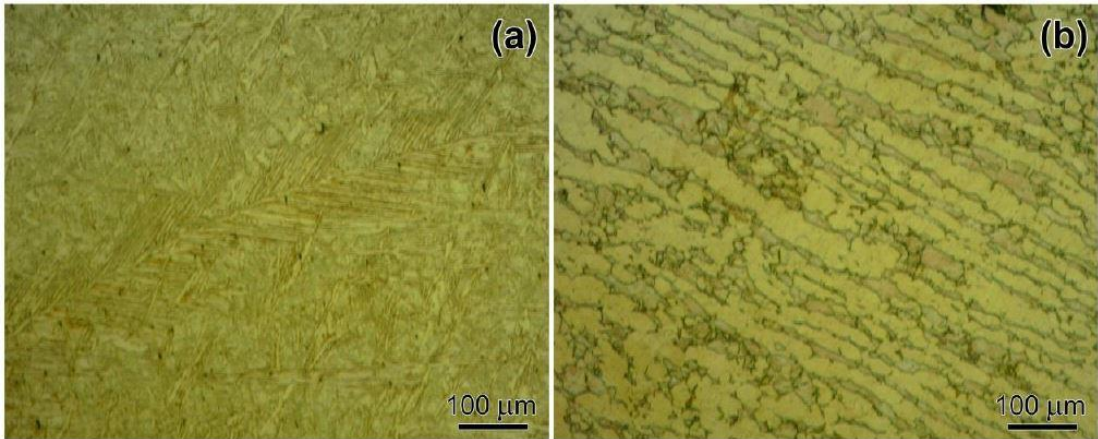
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.5b-d จะเห็นว่าสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเฟสหลัก (matrix) ซึ่งสามารถเห็นโครงสร้างลักษณะยาวของมาเทนไซต์ได้ชัดเจน ในที่นี้เรียกเป็นเฟสหลักหรือเฟสที่หนึ่ง (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อ 3.7) เป็นเฟสที่มีความสว่างมากกว่าอีกเฟสซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสรองหรือในที่นี้เรียกเฟสที่สอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายเกรนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเฟสหลักโดยมีการเรียงตัวในทิศทางต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ (a) 0%In (b) 0.1%In (c) 0.3%In และ (d) 0.5%In



สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดร้อนและรีดเย็นนั้น การรีดขึ้นรูปมีผลให้โครงสร้างมาเทนไซต์มีการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ทำให้โลหะสูญเสียความสามารถในการจำรูป โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดร้อนและรีดเย็นแสดงดังรูปที่ 3.6

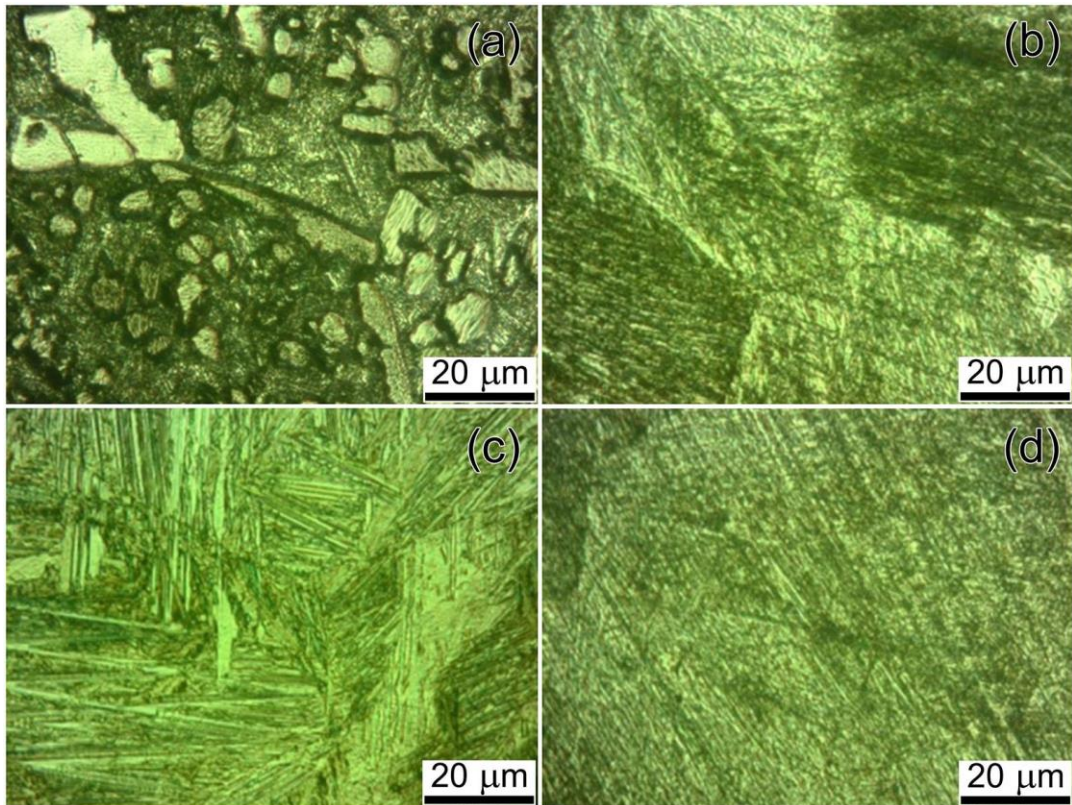


รูปที่ 3.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5%In หลังขึ้นรูปทางกล (a) รีดร้อน และ (b) รีดเย็น

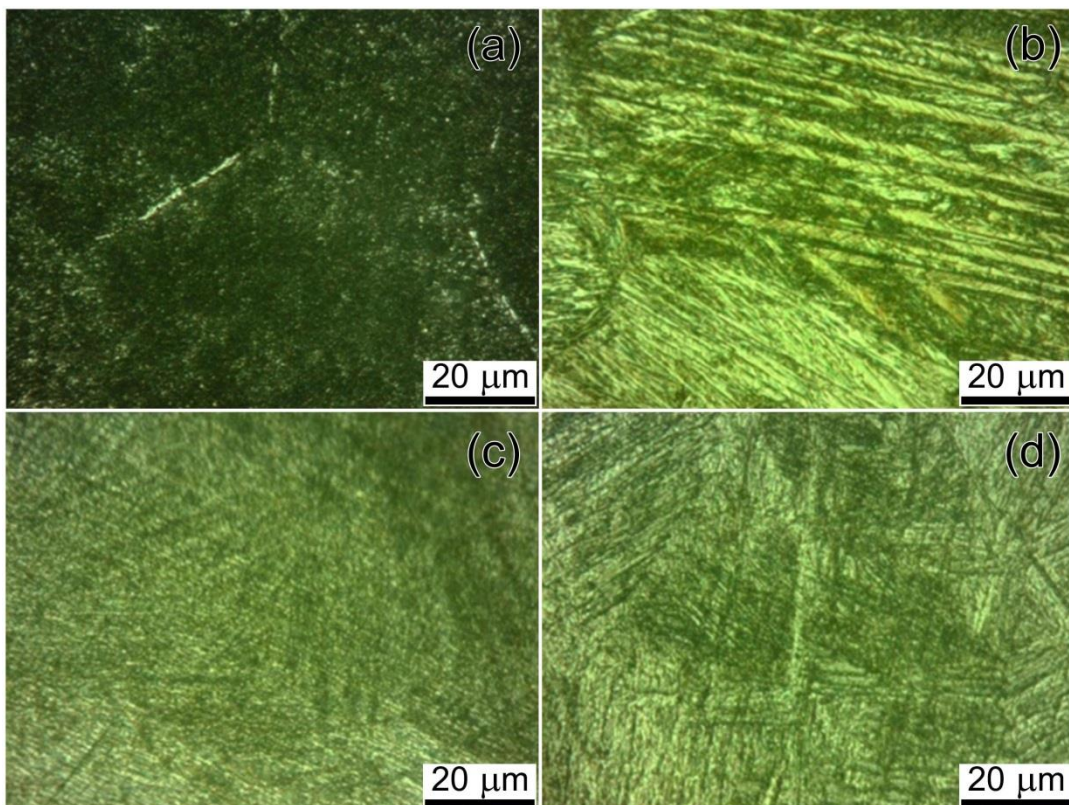
ซึ่งจากการวิจัยนี้ หากเปรียบเทียบกับงานตีพิมพ์ของ Natali และคณะ (2013) ซึ่งได้รายงานผลการรีดเย็นของโลหะผสม Cu-Zn-Al ที่ผสมอะลูมิเนียม 4.8 wt% โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 850 °C/20 นาที จุ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C ตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 320 °C/30 นาที ทำเย็นในน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าโครงสร้างมาเทนไซต์จะมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการรีดเย็น โดยจะสามารถเปลี่ยนรูปได้มากที่สุด 15 % เมื่อมีการรีดโลหะ หลังจากนั้นจะไม่สามารถรีดได้อีกเนื่องจากโลหะมีการแตกร้า

### 3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ

รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ จะเห็นว่าโครงสร้างโลหะที่มีส่วนผสม 1.5%Mn (รูปที่ 3.7a) มีโครงสร้างมาเทนไซต์ในปริมาณน้อย ไม่สามารถทำการตัดงอได้ เนื่องจากโลหะมีความเปราะสูง ในขณะที่โลหะที่ส่วนผสม 2.0-3.5 wt%Mn แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ชัดเจน โดยเมื่อนำโลหะทั้ง 4 ส่วนผสมทำการตัดงอเป็นมุม 45 องศา และให้ความร้อนเพื่อทดสอบการจำรูป พบว่าโครงสร้างหลังการทดสอบได้เปลี่ยนไปคือ ชิ้นงาน 1.5%Mn มีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นและไม่แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ ชิ้นงาน 2.0%Mn ซึ่งเป็นส่วนผสมที่สามารถคืนรูปได้ 100% ปรากฏโครงสร้างมาเทนไซต์ชัดเจน ในขณะที่ชิ้นงานที่มีส่วนผสม 2.5%Mn และ 3.5%Mn ปรากฏโครงสร้างมาเทนไซต์เช่นกันแต่ไม่ชัดเจนมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ (a) 1.5%Mn (b) 2.0%Mn (c) 2.5%Mn และ (d) 3.5%Mn



รูปที่ 3.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังตัดงอและให้ความร้อน (a) 1.5%Mn (b) 2.0%Mn (c) 2.5%Mn และ (d) 3.5%Mn

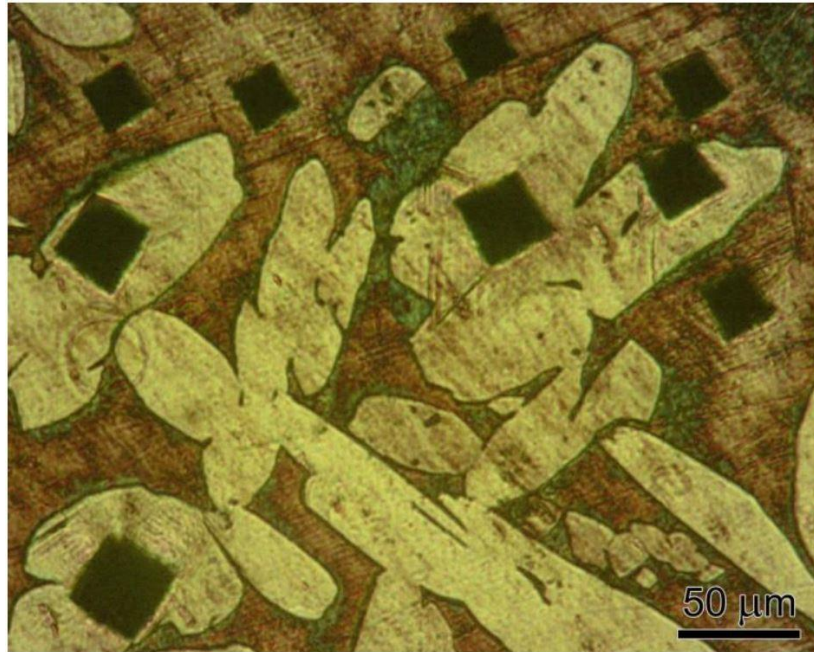
### 3.6 การวัดความแข็ง

#### 3.6.1 การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ

การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers microhardness) ตามมาตรฐาน ASTM E 384-99 ที่น้ำหนักกด 100 gf เวลา 15 นาที โดยการวัดจำนวน 5 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย (ตารางที่ 3.7) โดยจากการวัดค่าความแข็งของโลหะผสมจํารูปหล่อพบว่าโลหะผสมจํารูปที่มีค่าความแข็งมากที่สุดคือประมาณ 212 HV ในโลหะผสมที่ไม่เจือด้วยอินเดียม (0%In) และพบว่า การเจือด้วยอินเดียมจะมีผลให้ค่าความแข็งของโลหะลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเจือด้วยอินเดียมทำให้มีการแยกเฟสเป็น 2 ลักษณะ จึงได้ทำการวัดความแข็งแบบแยกเฟสหลักและเฟสรอง ในตัวอย่างที่มีการเจือด้วยอินเดียมพบว่าค่าความแข็งของเฟสหลัก มีค่ามากกว่าเฟสรอง โดยจะเห็นได้ชัดเจนในตัวอย่าง 0.5 wt% In เฟสหลักซึ่งเป็นมาเทนไซต์มีค่าความแข็งประมาณ 204 HV ในขณะที่เฟสรองมีค่าความแข็งเพียง 136 HV ลักษณะรอยกดเพื่อวัดค่าความแข็งในเฟสหลักและเฟสรอง แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ารอยกดเฟสหลักสีน้ำตาลมีขนาดรอยกดเล็กกว่าเฟสรองซึ่งเป็นเฟสสีขาว จากขนาดความแตกต่างของรอยกดนี้เฟสที่แข็งกว่าจะมีขนาดรอยกดเล็กกว่า เนื่องจากมีความสามารถต่อการต้านทานแรงกดที่สูงกว่านั่นเอง

ตารางที่ 3.7 ค่าความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ

ตัวอย่าง	ตำแหน่ง	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย (HV)
		1	2	3	4	5	
0%In	เฟสหลัก	209.5	224.1	204.8	232.1	192.2	212.5
0.1%In	เฟสหลัก	214.7	235.6	206.0	161.9	113.2	186.3
	เฟสรอง	265.5	173.8	176.1	168.3	134.3	183.6
0.3%In	เฟสหลัก	185.2	160.0	229.5	201.1	187.9	192.7
	เฟสรอง	182.2	168.3	162.5	121.3	163.0	159.5
0.5%In	เฟสหลัก	229.7	177.6	202.8	209.7	199.6	203.9
	เฟสรอง	110.5	147.3	144.6	134.0	144.4	136.2



รูปที่ 3.9 ลักษณะรอยกดจากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังทดสอบการจำรูป แสดงดังตารางที่ 3.8 แสดงค่าความแข็งหลังทดสอบการคืนรูป (หลังการดัดงอและให้ความร้อน) การดัดงอตามด้วยการให้ความร้อนส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะเพิ่มขึ้นในทุกเฟส ทำให้ดัดงอได้ยากขึ้นและโลหะเริ่มสูญเสียความสามารถในการจำรูป

ตารางที่ 3.8 ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Zn-Al หลังทดสอบการจำรูป

ตัวอย่าง	ตำแหน่ง	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย (HV)
		1	2	3	4	5	
0%In	เฟสหลัก	224.9	221.0	263.3	330.4	250.1	248.9
0.1%In	เฟสหลัก	208.9	226.7	152.3	175.5	171.0	168.9
	เฟสรอง	150.6	137.4	165.7	179.6	132.9	153.2
0.3%In	เฟสหลัก	308.2	347.4	409.1	361.8	383.3	362.0
	เฟสรอง	249.0	230.3	161.0	162.4	186.3	197.8
0.5%In	เฟสหลัก	293.7	271.1	255.3	365.4	247.6	286.6
	เฟสรอง	228.9	177.2	193.9	138.6	188.8	185.5

นอกจากนี้ยังพบว่าในโลหะผสมที่โครงสร้างมาแทนไซต์มีปริมาณน้อยเกินไป หรืออาจเกิดจากการควบคุมอัตราการเย็นตัวในระหว่างการหล่อโลหะไม่ดีพอ ทำให้ไม่เกิดโครงสร้างมาแทนไซต์โลหะผสมดังกล่าวนี้จะไม่สามารถจำรูปได้

### 3.6.2 การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Al-Mn

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าความแข็งในโลหะผสม Cu-Al-Mn พบว่าความแข็งของโลหะจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของแมงกานีสมากขึ้น ตามลำดับ

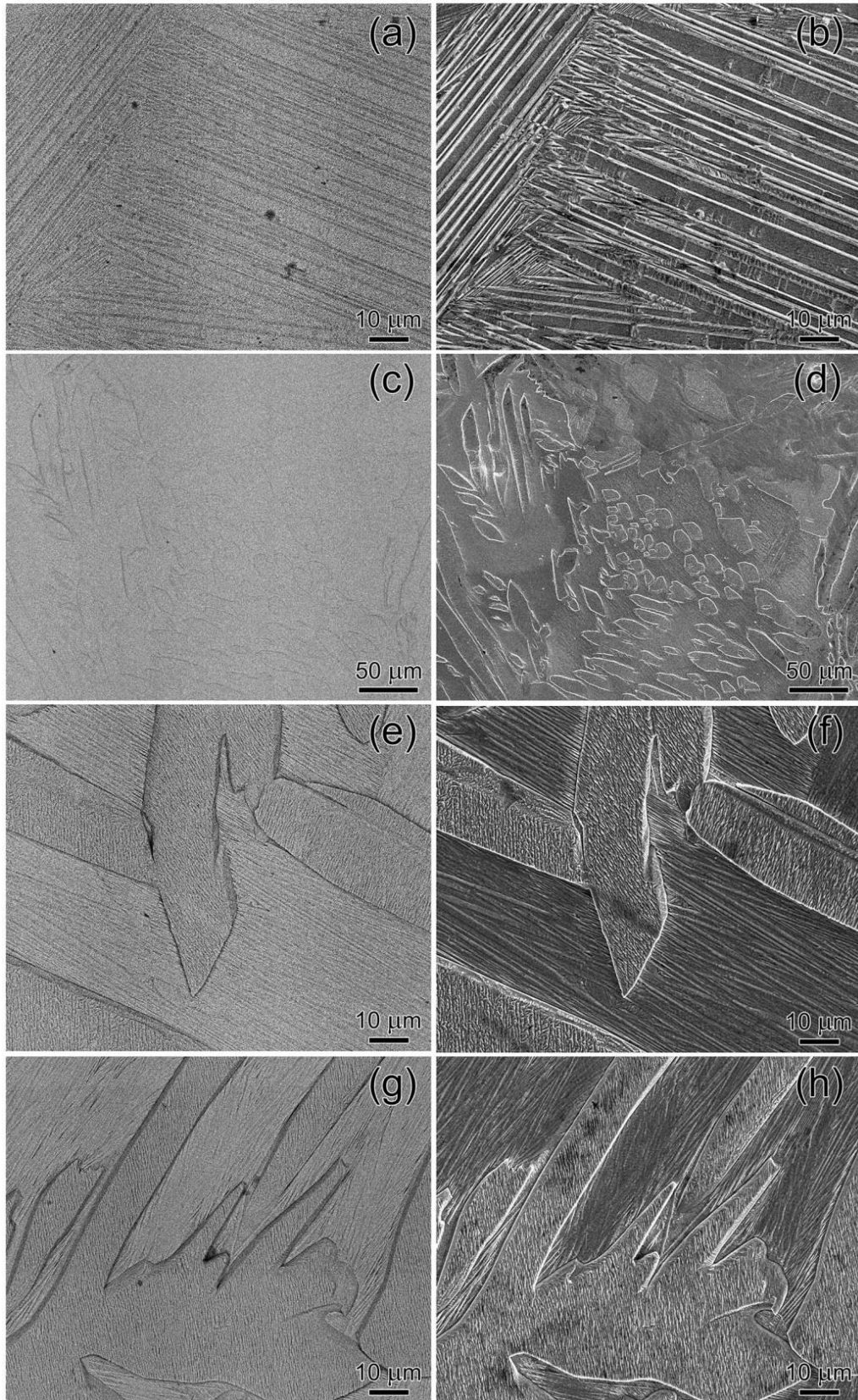
ตารางที่ 3.9 ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Al-Mn หลังทดสอบการจุ่มรูป

ตัวอย่าง	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย (HV)
	1	2	3	4	5	
1.5%Mn	226.6	228.3	335.9	236.8	296.3	253.8
2.0%Mn	254.4	185.0	194.2	222.2	204.8	207.1
2.5%Mn	182.1	183.7	208.5	211.5	191.1	194.4
3.5%Mn	170.2	158.3	204.8	183.9	174.1	176.1

### 3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Black scattered electron, BEI) และภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron Image, SEI) แสดงดังรูปที่ 3.8 ภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับสามารถแสดงความแตกต่างของเฟส (phase contrast) หรือความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมี (chemical composition) สำหรับภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถบอกลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานได้ ซึ่งชิ้นงานทั้งหมดนี้ผ่านการกัดกรดเพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคของโลหะได้ชัดเจนมากขึ้น

จากภาพแสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ซึ่งเป็นโครงสร้างลักษณะแบนยาว คล้ายเส้นเข็ม ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะในเฟสหลักจากภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยโลหะผสมจุ่มรูปที่ไม่เจือด้วยอินเดียม (รูปที่ 3.8 a-b) แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์เฟสหลักเพียงเฟสเดียว ในขณะที่โลหะผสมที่เจือด้วยอินเดียมนั้นจะมีการแยกเฟสออกเป็น 2 ส่วนคือโครงสร้างของเฟสที่หนึ่งซึ่งแสดงลักษณะมาเทนไซต์ชัดเจนและเฟสที่สองซึ่งคาดว่าจะจะเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์เช่นเดียวกันแต่เรียงตัว (orientation) ในทิศทางต่างกัน



รูปที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมดภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (แถวซ้าย) และอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (แถวขวา) ที่ส่วนผสมต่างๆ (a-b) 0%In (c-d) 0.1%In (e-f) 0.3%In และ (g-h) 0.5%In

จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุด (EDS Point Analysis) โดยพิจารณาเป็น 4 บริเวณ ดังนี้

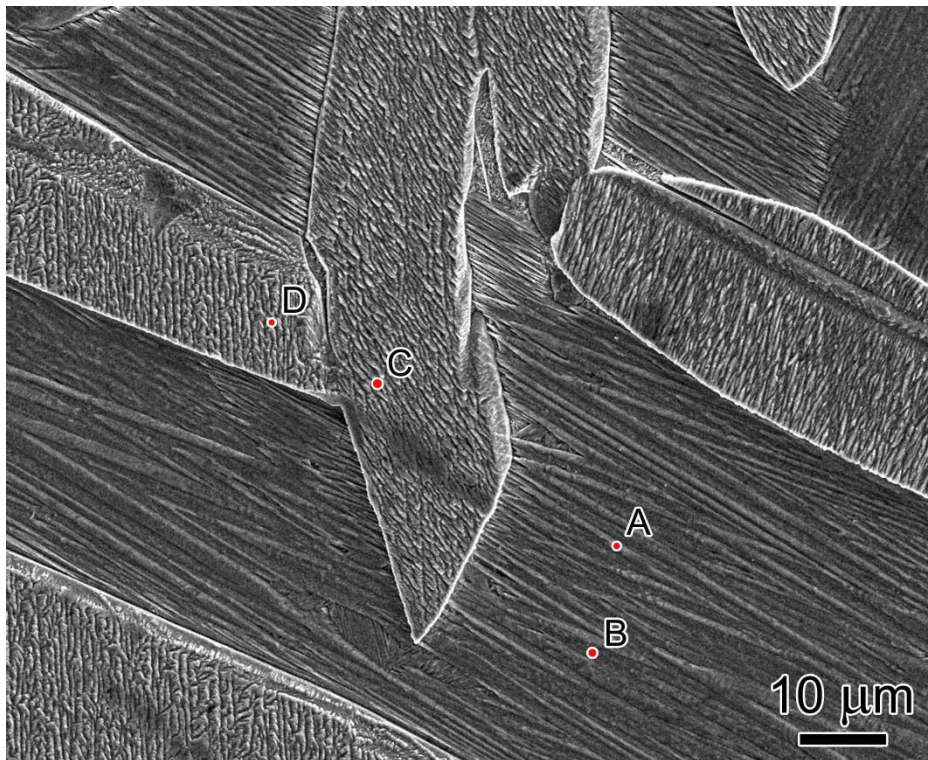
จุด A เป็นบริเวณสีขาวของเฟสที่หนึ่ง

จุด B เป็นบริเวณสีเทาของเฟสที่หนึ่ง

จุด C เป็นบริเวณสีขาวของเฟสที่สอง

จุด D เป็นบริเวณสีเทาของเฟสที่สอง

ลักษณะบริเวณจุดวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ธาตุแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.10 จากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุชี้ให้เห็นว่าอะลูมิเนียมในเฟสที่หนึ่งมีปริมาณมากกว่าในเฟสที่สอง และ อินเดียมจะเจืออยู่ในบริเวณเฟสที่หนึ่งเท่านั้น ในขณะที่สังกะสีนั้นสามารถละลายได้ในทุกเฟสในปริมาณใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.11 บริเวณการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในตัวอย่างเจือด้วยอินเดียม 0.3 wt%

ตารางที่ 3.10 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่าง 0.3 wt% In

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (wt%)			
	จุด A (ขาว)	จุด B (เทา)	จุด C (ขาว)	จุด D (เทา)
Cu	70.76	79.95	77.00	78.58
Zn	17.62	14.61	17.38	16.56
Al	8.75	4.20	5.62	4.86
In	2.87	1.24	-	-

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ธาตุในตารางที่ 3.11 ซึ่งวิเคราะห์เฉพาะบริเวณของมาเทนไซด์ในเฟสที่หนึ่ง ยืนยันเฟสสีขาวมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าในบริเวณที่มีสีเทา (ยกเว้นตัวอย่าง 0%In ซึ่งไม่ได้เจืออินเดียม)

ตารางที่ 3.11 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่างต่าง ๆ

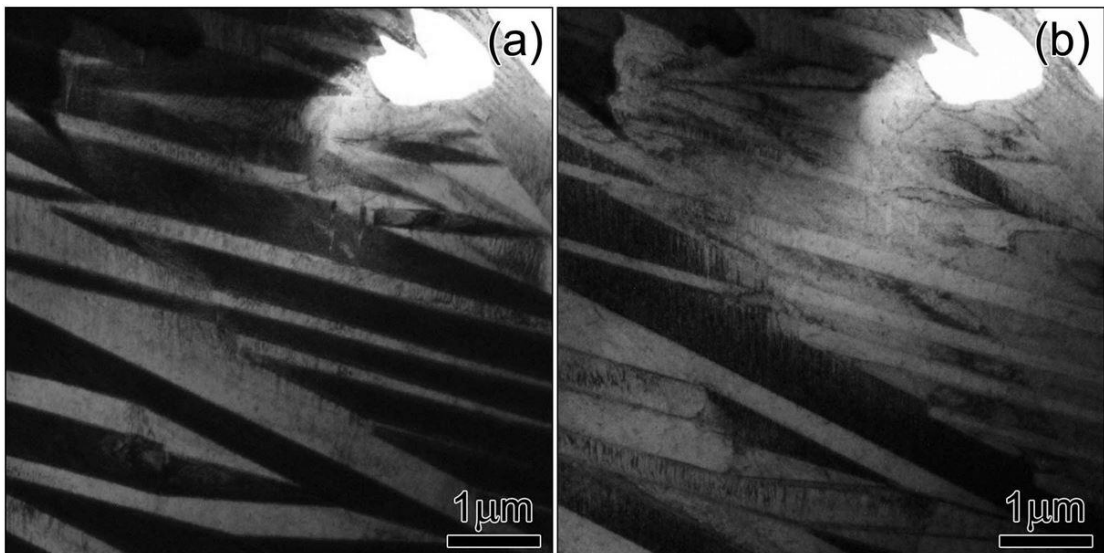
ตัวอย่าง	เฟส	ปริมาณธาตุ (wt%)			
		Cu	Zn	Al	In
0%In	เฟสขาว	72.22	22.42	5.36	-
	เฟสเทา	73.16	20.55	6.28	-
0.1%In	เฟสขาว	64.09	25.18	9.12	1.61
	เฟสเทา	69.79	20.48	8.37	1.37
0.3%In	เฟสขาว	70.76	17.62	8.75	2.87
	เฟสเทา	79.95	14.61	4.20	1.24
0.5%In	เฟสขาว	70.27	21.48	6.56	1.69
	เฟสเทา	73.26	19.37	5.91	1.46



### 3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมีข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่าง เนื่องจากตัวอย่างที่ดีต้องมีความหนาต่ำกว่า 100 นาโนเมตร เพื่อให้บางเพียงพอและให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านขึ้นงานได้ และข้อจำกัดอีกประการคือโลหะผสมจำรูปร่างนั้นอาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากแรงจากการขัด งานวิจัยนี้จึงใช้การเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม ดังได้อธิบายรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในหัวข้อ 2.6 การศึกษาในขั้นตอนนี้ได้เลือกชิ้นงานที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่มีความสามารถในการจำรูปร่างได้ดีที่สุด โดยชิ้นงานสำเร็จ (แสดงดังรูปที่ 2.12) มีความหนาประมาณ 80 นาโนเมตร

รูปที่ 3.12 แสดงภาพ Bright-field TEM ของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูปร่าง 0.5%In สภาวะหลังหล่อ โดยในรูปที่ 3.10(a) ไม่มีการเอียงตัวอย่าง (no tilting) จากรูปแสดงให้เห็นโครงสร้างของมาเทนไซต์ลักษณะเป็นแผ่น (plate) ได้ชัดเจน ในรูปแสดงความแตกต่างของเฟส (phase contrast) เป็นเฟสสีขาวและดำ และเมื่อทำการเอียงตัวอย่างไปเป็นมุม  $20^\circ$  ในรูป 3.10(b) ลักษณะเฟสดังกล่าวมีการเปลี่ยนเป็นสีสลับกัน คือเฟสขาวจะค่อยๆ เห็นเป็นดำ และเฟสสีดำค่อยๆ เปลี่ยนและเห็นเป็นเฟสขาว โดยจากการเอียงตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าทั้งเฟสสีขาวและดำคือเฟสของมาเทนไซต์ที่เรียงตัวในทิศทางต่างกัน ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในมุมที่ต่างกัน จึงทำให้ภาพที่เห็นเป็นเฟสสีต่างกัน

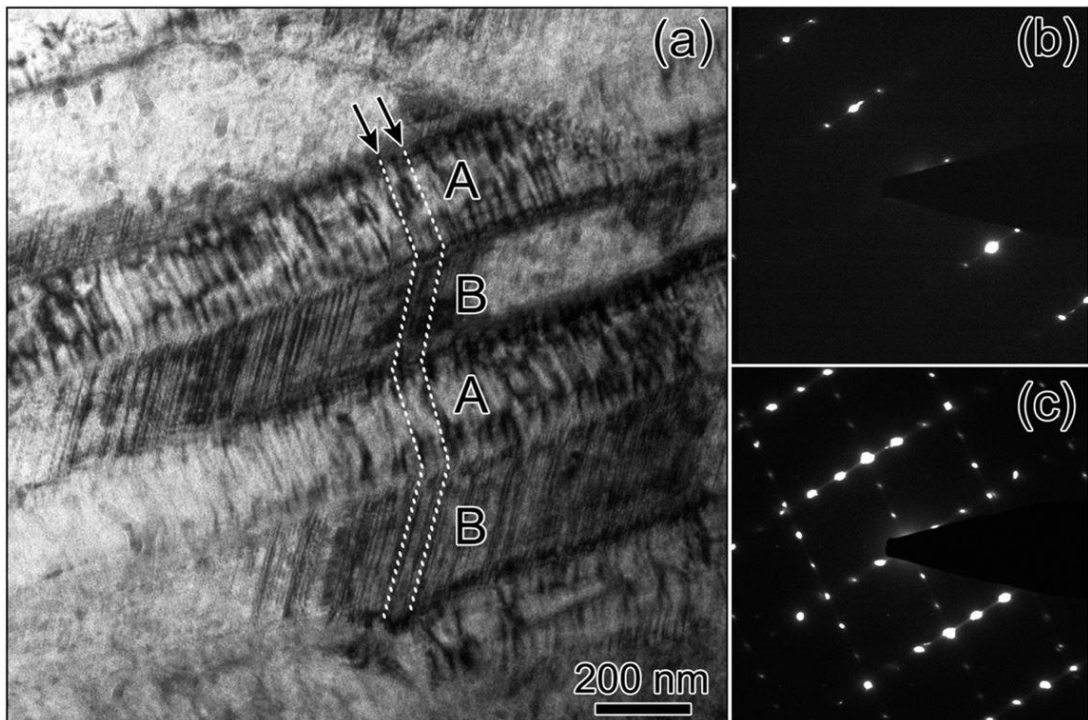


รูปที่ 3.12 Bright-field TEM โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูปร่าง 0.5%In สภาวะหลังหล่อ เปรียบเทียบมุมในการเอียงตัวอย่าง (a) ไม่มีการเอียงตัวอย่าง (b) หลังเอียงตัวอย่างมุม  $20^\circ$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 พบว่า ภายใต้โครงสร้างของมาเทนไซต์นั้นมีการเรียงตัวของระนาบแฝดขนาดเล็ก (microtwins) ลักษณะคล้ายแผ่น (plate-like) ของเรียงตัวเป็นชั้นๆ และแนวรอยเลื่อน (stacking faults) เกิดขึ้น โดยแนวรอยเลื่อนและระนาบแฝดขนาดเล็กนี้มีการเรียงตัวใน 2 ทิศทาง แสดงด้วยอักษร A และ B โดยทิศทางระนาบแฝดแสดงตามแนวเส้นประ ระนาบดังกล่าวทำมุมกับแนวรอยต่อ  $90^\circ$  และ  $55^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏของระนาบแฝดนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ (Xianomin et al., 2008) เนื่องจากชี้ให้เห็นว่าอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อน (stacking faults)

การเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่ในบริเวณแผ่น A (plate A) แสดงดังรูปที่ 3.13(b) และการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนในบริเวณ A และ B (เฟสผสม) แสดงดังรูปที่ 3.13(c) ทั้งนี้รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแสดงลักษณะเส้นแนวยาวหรือเรียกว่า streak ซึ่งเป็นลักษณะการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากโครงสร้างลักษณะแผ่นที่มีขนาดเล็กเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งทิศทางของ streak จะตั้งฉากกับทิศทางการเรียงตัวของโครงสร้างลักษณะแผ่นดังกล่าว

การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดที่บริเวณแผ่น A และ B แสดงดังตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ไม่พบความแตกต่างทางเคมีระหว่างบริเวณ A และ B ชี้ให้เห็นว่าแผ่น A และ B คือเฟสเดียวกันแต่เรียงตัวในทิศทางต่างกัน และจากการวิเคราะห์ธาตุพบว่าสังกะสีมีปริมาณน้อยกว่าสังกะสีเริ่มต้น คือปริมาณสังกะสีลดลงจาก 20.8 wt% เหลือเพียงประมาณ 18 wt% ทั้งนี้เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวต่ำ (ประมาณ  $420^\circ\text{C}$ ) และเกิดเป็นขม่าในระหว่างการหลอมโลหะทำให้มีการสูญเสียสังกะสีเกิดขึ้นในระหว่างการหลอม



รูปที่ 3.13 โครงสร้างจุลภาคและแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่ของโลหะผสมจำรูป 0.5In สภาวะหลังหล่อ (a) Bright-field TEM แสดงแนวเลื่อนและระนาบแฝดของมาเทนไซต์ ทิศทางระนาบแฝดตามแนวเส้นประ (b) SAD ของแนวแผ่น A และ (c) SAD ของแนวแผ่น A ร่วมกับแผ่น B

ตารางที่ 3.12 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดแนวแผ่น A และ B

บริเวณวิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (wt%)			
	Cu	Zn	Al	In
แผ่น A	76.35	18.22	4.75	0.68
แผ่น B	75.63	18.05	5.51	0.81

## บทที่ 4 สรุปผลโครงการวิจัย

### 4.1 สรุปผลโครงการวิจัย

1. โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al มีสีเหลืองทอง สามารถใช้เป็นโลหะต้นแบบในการผลิตเครื่องประดับทองได้
2. โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al ที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มีความสามารถในการจำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร และคืนรูปได้ 13 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามชิ้นงานทุกชิ้นไม่สามารถคืนรูปได้สมบูรณ์ โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืนรูปจะลดลงตามลำดับเมื่อจำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากโลหะที่ผ่านการทดสอบการคืนรูปจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับความเครียดจากการถูกดัดงอ
3. สำหรับโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส พบว่า โลหะที่เจือแมงกานีส 2.0 wt% มีค่าการคืนรูปสูงที่สุด คือสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ 100 %
4. ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่ามีการเสียรูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ ทำให้ชิ้นงานสูญเสียความสามารถในการจำรูป
5. การทดสอบการต้านทานการหมองด้วยเกลือที่เวลาทดสอบ 0-240 ชั่วโมง พบว่าโลหะที่มีส่วนผสมอินเดียม 0.3 wt% มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด คือมีค่าเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุดคือความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ส่วนผสมอื่น
6. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์เป็นหลัก โดยโลหะผสมจำรูปที่ส่วนผสมดังกล่าวนี้มีค่าความแข็งสูงสุด คือประมาณ 213 HV ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูปที่มีการเจือด้วยอินเดียมปริมาณ 0.1-0.5 wt% พบเฟสผสมระหว่างมาเทนไซต์และเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสแม่ โดยมีค่าความแข็งสูงสุดที่ประมาณ 204 HV ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% ทั้งนี้หลังจากโลหะผ่านการทดสอบการจำรูปโดยทำการดัดงอและให้ความร้อน ค่าความแข็งของโลหะในทุกเฟสจะเพิ่มขึ้นทำให้โลหะดัดงอได้ยาก และส่งผลต่อการสูญเสียความสามารถในการจำรูป
7. การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟสหลักมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส
8. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแฝดขนาดเล็กลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และพบแนวรอยเลื่อนในโครงสร้าง โดยแนวรอยเลื่อนและระนาบดังกล่าวมีการเรียงตัวใน 2 ทิศทางต่างกัน ทำมุม 90° และ 55° กับแนวเส้นรอยต่อของระนาบแฝด ซึ่งการปรากฏของระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ เนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป

9. การผลิตชิ้นงานเครื่องประดับสร้างสรรค์สามารถทำได้ โดยเครื่องประดับบริเวณที่ต้องการตัดงอต้องมีความบางไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

#### 4.2 ผลงานอื่น ๆ

ในระยะเวลาของการรับทุนวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้มีเข้าร่วมเสนอผลงานวิชาการในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติจำนวน 2 ครั้ง รายละเอียดดังนี้

**Chanmuang, C., Kummerdphonpittaya, B., Juntakool, O. and Niyomsoan, S. (2016).** Microtexture of Cu-based shape memory alloys. 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, May, 2016. Program and Abstract, pp. 230.

**Niyomsoan, s., Vongchaisri, K. and Chanmuang, C. (2017).** Study of Cu-based shape memory alloys from an investment casting process. The 2<sup>nd</sup> National and International Conference of Creative Multi-disciplinary Studies for Sustainable Development, Bangkok, Thailand, July, 2017. Proceeding, p. 20–27.

## เอกสารอ้างอิง

- Asanović, V. and Delijić, K. (2012) The mechanical behavior and shape memory recovery of Cu-Zn-Al alloys, *Association of Metallurgical Engineering of Serbia*, 59-64.
- Bhuniya. A.K, Chattopadhyay, P.P, Datta, S. and Banerjee, M.K. (2005a) On the degradation of shape memory effect in trace Ti-added Cu-Zn-Al alloy, *Materials Science and Engineering A*. 393, 125-132.
- Bhuniya. A.K, Chattopadhyay, P.P, Datta, S. and . Banerjee, M.K. (2005b) On the degradation of shape memory effect in trace Ti-added Cu-Zn-Al alloy, *Materials Science and Engineering A*. 391, 34-42.
- Blanco, M., Barragan, J.T.C., Barelli, N., Noce, R.D., Fugivara, C.S., Fernández, J., and Benedetti, A.V. (2013) On the electrochemical behavior of Cu-16%Zn-6.5%Al alloy containing the  $\beta'$ -phase (martensite) in borate buffer, *Electrochimica Acta*. 107, 238-247.
- Bujoreanu, L.G. (2008) On the influence of austenitization on the morphology of  $\alpha$ -phase in tempered Cu-Zn-Al shape memory alloys, *Materials Science and Engineering A*. 481-482, 395-403.
- Furlani, A. M., Stipchich, M. and Romero, R. (2005) Phase decomposition in a  $\beta$  Cu-Al-Ti-B shape memory alloy, *Materials Science and Engineering A*. 392, 386-393.
- Guilemany, J. M., Fernandez, J. and Zhang, X.M. (2006) TEM study on the microstructure of Cu-Al-Ag shape memory alloy, *Materials Science and Engineering A*. 438-440, 726-729.
- Hodgson, D. E. (1990) Shape memory alloys, *ASM Handbook Committee*, 897-920.
- Kwarciak, J. (1986) Phase transformations in Cu-Al and Cu-Zn-Al alloys, *Journal of Thermal Analysis*. 31, 559-566.
- Natali, S., Volpe, V. and Zortea, L. (2013) Martensitic phase transformation of Cu-Zn-Al alloys, induced by cold rolling deformation. *Convegno Nazionale IGF XXII*. Roma, Italia, 1-3, 132-139.
- Nespoli, A, Besseghini, S., Pittaccio, S. Villa, E. and Viscuso, S. (2010) The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. *Sensors and Actuators A*, 158, 149-160.

Phase transformation เข้าถึงได้จาก

[https://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma\\_mems/img/phase4.gif](https://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/img/phase4.gif) วันที่ 22  
กรกฎาคม 2560

Pops, H. and Johnson, B.C. (1978) Method for effecting reverse shape memory phenomena in Cu-Zn-Si brass alloy, *United States Patent* (4,099,991).

Xiaomin, C., Feng, H., Na, L., and Xingwen, W. (2008) Microstructure and shape memory effect of Cu-26.1Zn-4.8Al alloy, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 717–719.

Wen Xu, J. (2008) Effects of Gd addition on microstructure and shape memory effect of Cu-Zn-Al alloy, *Journal of Alloys and Compounds.* 448, 331–335.