

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

ผศ. ดร. สายสมร นิยมสรวญ ผศ. ดร. ชุติมันต์ 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 นิยมสรวญ ผศ. ดร. ชุติมันต์ จันทร์เมือง

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

สิงหาคม ๒๕๖๐

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิจัยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 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 สำหรับการ อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องโฟกัสไอออนบีมและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ในการ เอื้อเฟื้อสถานที่และนิสิตผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน 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 การพัฒนาโลหะ ผสมเสมือนทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์ (Development of Gold-like Shape Memory Alloy for Materials and Jewelry Product) รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A10802398 เลขที่สัญญา 150/2558 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 300,000 บาท (สามแสนบาทถ้วน) ระยะเวลา ดำเนินงาน 2 ปี (ระหว่าง ๑1 ตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม 2560)

บทคัดย่อ

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาดที่สามารถจำรูปร่างก่อน การถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูป กลับไปเป็นเหมือนเดิมได้ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างกลับไปมาระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ใน ระหว่างการให้ความร้อนและการเย็นตัว โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลักนั้นมีข้อดีประการ หนึ่งในเชิงเศรษฐกินเนื่องจากมีราคาถูกกว่าโลหะระบบ Ni-Ti และยังมีความน่าสนใจคุณสมบัติทาง กลและความร้อน โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาโลหะผสมจำรูป 2 ระบบ คือ Cu-Zn-Al ที่ส่วนผสม เจือ ด้วยอินเดียม 0.1–1.0 wt% และโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส 1.5-3.5 wt% โดย การหล่อแบบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (los-wax หรือ Investment casting) ด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวด เหนี่ยวนำ โดยการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 1,100 ℃ และอุณหภูมิเบ้าปูนหล่อ 650 ℃ โดยศึกษา สมบัติของโลหะผสมจำรูปด้วยการตรวจวัดและทดสอบดังนี้ การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการ ้เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความสามารถในการจำรูปด้วยการทดสอบการดัดงอ ศึกษาความสามารถ ต่อการต้านทานการหมอง วัดความแข็งด้วย ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุของโลหะ ผสมจำรูป ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การวิเคราะห์เคมีด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ และศึกษาความ เป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบรีดร้อนและรีดเย็น

จากผลการทดลองวิจัยพบว่าโลหะผสมจำรูปที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มี ความสามารถในการจำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืนรูปจะลดลงตามลำดับเมื่อ จำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ผสมจำรูป Cu–20.8wt%Zn–5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ เป็นเฟสหลัก และยังคงมีเฟสของออสเทนไนต์ โลหะผสมที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียมจะมีค่าความแข็ง สูงสุดที่ประมาณ 213 HV โดยโลหะผสมที่เจือด้วยอินเดียม ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% มีค่า ความแข็งประมาณ 204 HV การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟส หลักมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการ กระจายตัวอยู่ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแฝดขนาดเล็ก ลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และพบแนวรอยเลื่อนในโครงสร้าง โดยแนวรอยเลื่อนและระนาบ ดังกล่าวมีการเรียงตัวใน 2 ทิศทางต่างกัน ทำมุม 90° และ 55° กับแนวเส้นรอยต่อของระนาบแฝด ซึ่งการปรากฏของระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ เนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานที่ ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่ามีการเสีย รูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ 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 % ส่วน อัตราส่วนผสมที่มี Al 6.0wt% ขึ้นไป ไม่สามารถดัดงอชิ้นงานได้เนื่องจากชิ้นงานมีความเปราะ แสดง ว่าถ้า Al เพิ่มขึ้น (%Mn ลดลงไป ไม่เกิน 1.5wt%) การคืนรูปจะคืนได้มากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มตั้งแต่ 6.0wt% ขึ้นไป จะเปราะไม่สามารถดัดงอได้

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ในระยะเวลาของการรับทุนวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้มีเข้าร่วมเสนอผลงานวิชาการในการ ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติจำนวน 2 ครั้ง คือ

- **Chanmuang, C.**, Kumnerdphonpittaya, B., Juntakool, O. and Niyomsoan, S. (2016). Microtexture of Cu-based shape memory alloys. 11th 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 2nd National and International Conference of Creative Multi-disciplinary Studies for Sustainable Development, Bangkok, Thailand, July, 2017. Proceeding, p. 20–27.

จากการศึกษาและวิจัยในโครงการสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาโลหะผสมเสมือน ทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์ เพื่อเป็นข้อมูลด้านผลึกวิทยาและโครงสร้างจุลภาค จากการเจือด้วยธาตุอินเดียม เป็นองค์ความรู้และประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับวัสดุ ทางเลือกสำหรับผลิตเครื่องประดับต่อไป

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการผลิตโลหะจำรูปเสมือนทองสำหรับวัสดุเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์นี้ สิ่งที่ ควรระวังคือการควบคุมการผลิตระหว่างการหลอมโลหะ ทั้งส่วนผสมโลหะและเวลาในการหล่อ เนื่องจากมีการสูญเสียสังกะสึในรูปแบบเขม่าในระหว่างการหลอม และควรต้องมีการคนโลหะหลอม ตลอดเวลาเนื่องจากฟิล์มของอะลูมิเนียมจะคลุมผิวของน้ำโลหะหลอม อาจทำให้การหล่อโลหะไม่ สมบูรณ์ และหากส่วนผสมผิดพลาด โลหะจะสูญเสียความสามารถในการการคืนรูปได้

บทคัดย่อ

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาดที่สามารถจำรูปร่างก่อน การถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูป กลับไปเป็นเหมือนเดิมได้ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างกลับไปมาระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ใน ระหว่างการให้ความร้อนและการเย็นตัว โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลักนั้นมีข้อดีประการ หนึ่งในเชิงเศรษฐกินเนื่องจากมีราคาถูกกว่าโลหะระบบ Ni-Ti และยังมีความน่าสนใจคุณสมบัติทาง กลและความร้อน โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al เจือด้วยอินเดียม 0.1–1.0 wt% และโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส 1.5-3.5 wt% โดยการหล่อแบบแม่พิมพ์ ขี้ผึ้ง (los-wax หรือ Investment casting) ด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการหลอม ้โลหะที่อุณหภูมิ 1,100 °C และอุณหภูมิเบ้าปูนหล่อ 650 °C โดยศึกษาสมบัติของโลหะผสมจำรูปด้วย การตรวจวัดและทดสอบดังนี้ การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบ ความสามารถในการจำรูปด้วยการทดสอบการดัดงอ ศึกษาความสามารถต่อการต้านทานการหมอง ้วัดความแข็งด้วย ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุของโลหะผสมจำรูป ศึกษาโครงสร้าง จุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน การวิเคราะห์เคมีด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ และศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วย กระบวนการขึ้นรูปแบบรีดร้อนและรีดเย็น

จากผลการทดลองวิจัยพบว่าโลหะผสมจำรูปที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มื ้ความสามารถในการจำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืนรูปจะลดลงตามลำดับเมื่อ ้จำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ้ผสมจำรูป Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ เป็นเฟสหลัก และยังคงมีเฟสของออสเทนในต์ โลหะผสมที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียมจะมีค่าความแข็ง ้สงสดที่ประมาณ 213 HV โดยโลหะผสมที่เจือด้วยอินเดียม ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% มีค่า ้ความแข็งประมาณ 204 HV สำหรับโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส พบว่า โลหะที่เจือ แมงกานีส 2.0 wt% มีค่าการคืนรูปสูงที่สุด คือสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ 100 % การวิเคราะห์ธาตุ ด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟสหลักมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียม ้มากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแฝดขนาดเล็กลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และพบแนวรอย ้เลื่อนใน ซึ่งการปรากฏของระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของ โลหะ เนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป อย่างไรก็ตามพบว่า ้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่ามี การเสียรูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ 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 α -phase texture surrounded by matrix phase. EDS revealed that the α 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

กิตติกรรมปร	ะกาศ	i
บทสรุปผู้บริเ	หาร	ii
บทคัดย่อ		V
Abstract		vi
สารบัญ		vii
สารบัญรูป		ix
สารบัญตารา	٩	xi
บทที่ 1 ทฤษ	_่ ม _ี และทบทวนวรรณกรรม	1
1.1	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	1
	1.1.1 โลหะผสมจำรูประบบที่มีทองแดงเป็นหลัก	3
	1.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องมือขั้นสูง	4
1.2	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	7
1.3	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	8
1.4	ขอบเขตของโครงการวิจัย	8
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	8
1.6	วิธีการดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	9
บทที่ 2 กระ	บวนการดำเนินงานวิจัย	12
2.1	วัสดุและอุปกรณ์	12
	2.1.1 โลหะ	12
	2.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง	12
	2.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมปูน การหล่อโลหะและการขัดตัวอย่าง	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

หน้า

	2.4 การเตรียงซึ่นงานเพื่อสึกษาโครงสร้างออกาคและวัดความแข็ง	20
		20
	2.4.1 การขดเขนงาน	20
	2.4.2 การวดความแขง	21
	2.5 การศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	21
		หน้า
	2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
	2.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม	21
	2.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	23
บทที่ 3	ผลและอภิปรายผล	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
บทที่ 4	สรุปผลโครงการวิจัย	46
	4.1 สรุปผลโครงการวิจัย	46
	4.2 ผลงานอื่น ๆ	47
เอกสาร	เอ้างอิง	48
ภาคผน	เวก	50

ix

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al	17
2.2	โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Al-Mn	17
3.1	การทดสอบความสามารถในการคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
3.2	อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร	27
3.3	อัตราการคืนรู้ปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร	29
3.4	อัตราการคืนรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn	30
3.5	การเปลี่ยนแปลงสึในตัวอย่างทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง	31
3.6	ค่าสึในระบบ 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 แสดงตะกอน หลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 77.30Cu-13.60Zn- 8.99Al	5
1.6	ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอน หลังบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 78.30Cu-12.80Zn- 8.84Al-0.10Ti	5
1.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงข้อบกพร่องแบบเส้นใน เฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag	6
1.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงโครงสร้างผลึกแฝดภายใน เฟสมาเทนไซต์ในโลหะผสม Cu-Al-Ag	7
1.9	แผนวิธีดำเนินการวิจัย	11
2.1	โลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง	12
2.2	วัสดุและอุปกรณ์หลักสำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง	13
2.3	(a) ปูนหล่อเครื่องประดับ (b) เบ้าโลหะและฐานยาง และ (c) คีมจับและมีดผ่าตัด ในการผ่าแม่พิมพ์ยาง	14
2.4	เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น	15
2.5	เครื่องมือขั้นสูงในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเตรียมตัวอย่าง	16
2.6	ชิ้นงานเทียนขี้ผึ้ง	18
2.7	ลักษณะเข้าปูน	19
2.8	ต้นโลหะหลังหล่อ	20
2.9	การทดสอบการคืนรูป	20
2.10	การเตรียมตัวอย่างฟอยล์บางด้วยด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม	23
2.11	ชินงานฟอยล์บางสำเร็จ	23
3.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี่ยวเบนรังสีเอกซ์ -	24
3.2	ภาพร่างมุมในการทดสอบการดัดงอ	25
3.3	การดัดงอชินงานเพื่อทดสอบการคืนรูป	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 สภาวะหลังดัดงอและให้ความ ร้อน	37
3.9	ลักษณะรอยกดจากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์	36
3.10	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมด ภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (แถวซ้าย) และอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (แถวขวา) ที่ ส่วนผสมต่างๆ	39
3.11	บริเวณการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในตัวอย่างเจือด้วย อินเดียม 0.3 wt%	40
3.12	Bright-field TEM โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5In สภาวะหลังหล่อ เปรียบเทียมมุมในการเอียงตัวอย่าง	42
3.13	โครงสร้างจุลภาคและแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกพื้นที่ของโลหะผสม จำรูป 0.5%In สภาวะหลังหล่อ	43

บทที่ 1 ทฤษฎีและบททบทวนวรรณกรรม

1.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมจำรูป (Shape memory Alloy) คือ โลหะที่สามารถจำรูปร่างก่อนการถูกทำให้ เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการดัดงอ เมื่อได้รับอุณภูมิที่เหมาะสมโลหะจะสามารถคืนรูปกลับไปเป็น เหมือนเดิมได้ ซึ่งโลหะผสมจำรูปจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- โลหะผสมจำรูปกลุ่มไทเนียมเป็นหลัก เช่น ไทเทเนียมนิกเกิล (Ni-Ti) โดยมีส่วนผสม Ti : Ni เท่ากับ 50 : 50 โลหะในกลุ่มนี้จึงมักใช้ทำกรอบแว่นตา ข้อต่อที่ใช้งานใน อุตสาหกรรมอากาศยาน และเรือเดินสมุทร นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุและอุปกรณ์ ทางการแพทย์ เช่น ตัวกรองลิ่มเลือด ลวดจัดฟัน เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่เป็นพิษต่อ เนื้อเยื่อของมนุษย์
- 2) โลหะผสมจำรูปกลุ่มทองแดงเป็นหลัก เช่น ทองแดง-สังกะสี-อะลูมิเนียม (Cu-Zn-Al) ทองแดง-อะลูมิเนียม-นิกเกิล (Cu-Al-Ni) โดยส่วนผสมต่าง ๆ จะมีทองแดงเป็นธาตุหลัก และมีการเติมธาตุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับทองแดง ตัวอย่างการใช้งานของโลหะ กลุ่มนี้ เช่น ทำโครงยกทรง อุปกรณ์ปรับปริมาณน้ำร้อนอัตโนมัติในฝักบัวอาบน้ำ เป็นต้น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปมา ระหว่างโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เมื่อ โลหะผสมจำรูปเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้อง โครงสร้างของโลหะผสมจะเป็นมาเทนไซต์ (Mr) เมื่อทำการดัดงอโลหะผสมดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ (As) และเมื่อ ให้อุณหภูมิที่เหมาะสมตามส่วนผสมนั้น ๆ แกโลหะผสมจำรูป จะมีผลให้โครงสร้างเริ่มเปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิที่ให้และโครงสร้างกลับมาเป็นมาเทนไซต์เหมือนเดิม

จากรูปที่ 1.1 Mr (Martensite finish) จะเป็นโครงสร้างเริ่มต้นคือโครงสร้าง ณ อุณหภูมิห้อง ของ โลหะผสมจำรูปจะเป็นโครงสร้างของมาเทนไซต์และเมื่อโลหะได้รับการแปรรูปด้วยการดัดงอ โครงสร้างจะเริ่มเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์ As (Austenite start) คือการเริ่มต้นเป็น ออสเทนไนต์จนกระทั่งโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์ Ar (Austenite finish) เมื่อให้ความ ร้อนกับโลหะหรือ อุณหภูมิที่โลหะจะคืนรูป การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้โครงสร้างที่เป็นออ สเทนไนต์เปลี่ยนกลับมา เป็นมาเทนไนต์ในที่สุด ซึ่งโครงสร้างจะเริ่มเป็นมาเทนไนต์ที่ Ms (Martensite start) และกลายเป็นมาเทนไนต์ที่สมบูรณ์อีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 Hysteresis loop ของโลหะผสมจำรูป (Nespoli และคณะ, 2010)



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนโครงสร้างระหว่างมาเทนไซต์และออสเทนไนต์ในโลหะผสมจำรูป (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 พบว่าโครงสร้างจะรวมกันอยู่ในรูปแบบเบต้า เฟส องค์ประกอบที่ใช้ในการทดลองของรายงานนี้ ประกอบด้วย กลุ่มที่ (1) ใช้ 62.19wt%Cu-37.37wt%Zn-0.44wt%Si มีการคืนรูปเมื่อให้อุณหภูมิที่ประมาณ -55 ± 20 °C หรือกลุ่มที่ (2) ใช้ 63.20wt%Cu-36.18wt%Zn-0.46wt%Si มีการคืนรูปเมื่อให้อุณหภูมิที่ประมาณ 13 ± 20 °C แสดง ดังรูปที่ 1.3 เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิที่เหมาะสม





Hodgson (1990) ได้ทำการศึกอุณหภูมิที่โลหะผสมจำรูปสามารถคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ และส่วนผสมที่แตกต่างกันหลากหลายชนิด พบว่าอุณหภูมิในการคืนรูปโลหะผสมรูปมีช่วงอุณหภูมิ การคืนตัวที่ต่างกันขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ตามส่วนผสม ซึ่งนิกเกิลไทเทเนียมมีช่วงของอุณหภูมิการคืนตัว ที่น้อยกว่าและเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสามารถให้ได้หลากหลายจึงเป็นที่นิยมในการใช้ และ อุณหภูมิการคืนรูปของ Cu-Zn-Al มีช่วงกว้างตั้งแต่ -180 °C ถึง 200 °C ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่มีค่าวัสดุที่ถูกกว่าหาได้ง่ายจึงเป็นโลหะผสมจำรูปที่สามารถใช้ในเชิงพานิชย์ได้ และสามารถพัฒนา ให้มีประสิทธิภาพความแข็งแรงด้วยการเพิ่มเติมธาตุอื่นเข้าไปได้ เพื่อให้อุณหภูมิในการคืนรูปสูงขึ้นได้

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al นั้น แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.4a และโครงสร้างดังกล่าวจะยังปรากฏเห็นได้ชัดถึงแม้จะมีการเจือด้วยธาตุ เจือต่างๆ เช่นผลของการเจอด้วยธาตุ Gd (Wen Xu, 2008), Ti (Bhuniya และคณะ, 2005a), Zr (Bhuniya และคณะ, 2005b: Stipcich และ Romero, 2017) ทั้งนี้ธาตุเจือมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ของโครงสร้างมาเทนไซต์เมื่อโลหะได้รับอุณหภูมิและการแปรรูป ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและการตกตะกอนที่ต่างกัน โดยพบว่าการเจือด้วย ธาตุ Zr มีผลให้มีการตกตะกอนในโลหะ จำรูป Cu-Zn-Al มีปริมาณมากขึ้นและอุณหภูมิในการตกตะกอนต่ำลง ดังนั้นโลหะจึงมีการบ่มแข็ง (age hardening) ที่เร็วกว่าโลหะที่ไม่ได้เจือ Zr โดยตะกอนดังกล่าวเห็นได้ชัดเจนที่สภาวะหลังบ่มที่ อุณหูมิ 250 °C (รูปที่ 1.4b) และรูปที่ 1.4c แสดงลักษณะการเรียงตัวแบบมีทิศทางของโครงสร้าง มาเทนไซต์ที่อุณหภูมิ 300 °C การเจือด้วย Ti ทำให้เกรนของมาเทนไซต์มีขนาดเล็กลง (grain refinment) ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของโลหะ



รูปที่ 1.4 โครงสร้างมาเทนไซต์ของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al-Ti (a) การเรียงตัวของโครงสร้าง แผดหลังจากบ่มที่ 75 ℃ (b) การเกิดตะกอนหลังบ่มที่ 250 ℃ (c) การเปลี่ยนแปลงลักษณะของ มาเทนไซต์หลังบ่มที่ 300 ℃ (Bhuniya และคณะ, 2005b)

1.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องมือขั้นสูง

จากการศึกษาโลหะผสมจำรูปที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) แสดงให้เห็นถึงผลของธาตุเจือการต่อการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม เช่น ลักษณะตะกอนในโครงสร้างที่แตกต่างกันของ

มาเทนไซต์ที่เจือและไม่เจือ Ti โดยโลหะที่เจือด้วย Ti จะพบตะกอนขนาดเล็กของ Cu₂AlTi ใน โครงสร้างมาเทนไซต์ที่มีขนาดเล็กและมีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันมากกว่า เมื่อเทียบกับโลหะผสม ที่ไม่ได้เจือ Ti ดังแสดงในรูปที่ 1.5 และ 1.6



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



รูปที่ 1.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงตะกอนหลังบ่มที่ อุณหภูมิ 250 °C เวลา 2 ชั่วโมง ของโลหะผสม 78.30Cu-12.80Zn-8.84Al-0.10Ti (Bhuniya และ คณะ, 2005a) สำหรับโลหะผสมจำรูปชนิดใหม่ระบบ Cu-Al-Ag นั้นได้มีรายงานโดย Guilemany และคณะ (2006) ว่าการเติม 0.32 wt%Ag เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยสามารถเปลี่ยนลักษณะทาง ธรรมชาติของการเปลี่ยนเฟสมาเทนไซต์ทำให้อุณหภูมิ Ms เปลี่ยนจาก 370 ℃ เป็น 257 ℃

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

รูปที่ 1.7c แสดงเฉพาะลักษณะข้อบกพร่องแบบเส้นในแนวขนานกันภายในแผ่นของมาเทน ไซต์ดัง แสดงด้วยลูกศร จากโครงสร้างจะเห็นว่าเมื่อลดปริมาณเงินลง ความหนาแน่นของข้อบกพร่อง แบบเส้นก็จะ ลดลงด้วย โดยจากการศึกษาพบว่าแนวข้อบกพร่องแบบเส้นที่สมบูรณ์จะไม่สามารถเกิด ได้ในแผ่นของเฟส มาเทนไซต์และจะพบแค่เพียงข้อบกพร่องแบบเส้นบางส่วน (partial dislocation) และแนวการเคลื่อนที่ของระนาบหลัก (stacking faults) ดังแสดงในรูปที่ 1.7d (บ่งชี้ด้วยลูกศร)

มีการเปลี่ยนแปลงของระนาบผลึกแผด (Twin) เป็นขนาดเล็กมาก และระยะระหว่างระนาบ ของ ผลึกทั้ง 4 ส่วนผสมมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้ระนาบผลึกแฝดขนาดเล็กถ่ายด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ในตัวอย่าง A1 และ A4 แสดงดังรูปที่ 1.8



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



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

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุฉลาด หรือ Smart Material คือวัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งเร้า ภายนอกเช่น มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีความเค้น ซึ่งโลหะ จำรูป (shape memory alloys, SMA) ก็จัดเป็นหนึ่งในวัสดุฉลาด สิ่งที่ทำให้โลหะจำรูปมีความโดด เด่นจากโลหะผสมธรรมดาทั่วไปคือมีความสามารถของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการเหนี่ยวนำด้วย ความร้อนหรือมีสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด (super elastic) ซึ่งสองสิ่งนี้เป็นสมบัติสำคัญที่โลหะผสมอย่าง นิกเกิลไทเทเนียมหรือโลหะจำรูปชนิดอื่น ๆ

โลหะจำรูปจะมีสมบัติในการคืนรูปภายหลังได้รับแรงกระทำทางกลจนเกิดการเสียรูปอย่าง ถาวร โดยสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่เหมาะสม โลหะจำรูปถูกค้นพบ มาเป็นเวลานานกว่า 70 ปี พบว่าปรากฏการณ์จำรูปถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดย Chang และ Read ้ในปี 1951 ซึ่งได้ค้นพบโลหะที่มีสมบัติการคืนรูป ความสามารถในการจำรูปนี้เกิดจากการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโลหะ ซึ่งโลหะที่ใช้ในการทดลองคือโลหะผสมทองคำแคดเมียม (AuCd) ต่อมาในปี 1964 Buehler และคณะ ได้ค้นพบโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม (NiTi) และได้รับ การพัฒนาต่อมาในต้นทศวรรษที่ 1960 โดยกองทัพสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้ในกิจการอวกาศแห่งชาติ ้อเมริกา (NASA) โดยใช้ชื่อว่า Nitinol เป็นการผสมระหว่างชื่อของโลหะ 2 ชนิด คือ นิกเกิล (Nickel, Ni) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) โดยโลหะผสมในกลุ่มนิกเกิล-ไทเทเนียม (Ni-Ti Alloys) และกลุ่มที่มี ทองแดงเป็นหลัก (Cu-based Alloys) นั้นได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษเนื่องจากมีสมบัติที่เป็น ้ประโยชน์หลายอย่างและที่สำคัญคือ โลหะจำรูปในสองกลุ่มนี้สามารถคืนรูปได้ค่อนข้างมาก จึงได้มี การวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มากกว่าโลหะจำรูปในกลุ่มอื่น โลหะจำรูปในกลุ่ม ้นิกเกิล-ไทเทเนียมหรือที่รู้จักกันในนามของ ไนทินอล (Nitinol) ประกอบด้วยนิกเกิลและไทเทเนียม ้อย่างละประมาณ 50% โดยจำนวนอะตอมในทินอลมีจุดเด่นหลายประการ อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อ เนื้อเยื่อของมนุษย์ ทำให้สามารถใช้ทำวัสดุและอุปกรณ์ในทางการแพทย์ได้หลายชนิด โลหะจำรูปใน กลุ่มทองแดง ได้แก่ Cu-Zn-Al และ Cu-Al-Ni รวมถึงโลหะผสมทองแดงผสมซึ่งมีธาตุหลัก 4 อย่าง (Quarternary Systems) โลหะจำรูปในกลุ่มนี้มีสมบัติด้อยกว่าไนทินอลบางประการ เช่น ทนทานต่อ

การกัดกร่อนได้ปานกลาง อย่างไรก็ตามโลหะกลุ่มนี้มีข้อดีคือสามารถหลอมเหลวและอัดขึ้นรูป (extruded) ได้ค่อนข้างง่าย มีอุณหภูมิเปลี่ยนรูปอยู่ในช่วงกว้าง อีกทั้งยังมีราคาต่ำกว่าไนทินอล

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ด้านคือการประยุกต์ศาสตร์และศิลป์เพื่อผลิตชิ้นงาน เครื่องประดับ คือพัฒนาโลหะทดแทนทองที่มีสึใกล้เคียงทอง อีกทั้งยังเป็นโลหะที่มีความสามารถใน การจำรูป โดยการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะต่าง ๆ ของโลหะผสม จำรูปในกลุ่มของที่มีทองแดงเป็นหลัก คือ Cu-Al และ Cu-Zn และสามารถนำโลหะที่พัฒนานี้ ไปผลิต เป็นชิ้นงานสร้างสรรค์ด้านเครื่องประดับ เพื่อให้สามารถเป็นแรงบันดานใจแก่นักออกแบบ เครื่องประดับให้เห็นเทคนิคใหม่ในการนำโลหะผสมจำรูปเพื่อใช้ในการออกแบบ เพื่อนำไปใช้ในการ ผลิตชิ้นงานโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ด้านอัญมณีและ เครื่องประดับไทยต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาและพัฒนาโลหะผสมจำรูประบบที่มีส่วนผสมทองแดงเป็นหลักสำหรับเป็นวัสดุ ทางเลือกใหม่ในการออกแบบและผลิตเครื่องประดับ
- 2. เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปและการแปรรูปของโลหะผสมจำรูป
- เพื่อเป็นแนวทางในการนำโลหะผสมจำรูปผลิตเป็นชิ้นงานสร้างสรรค์ สำหรับ อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

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

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1) ด้านวิชาการ

พัฒนาวัสดุในเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกสีเสมือนทองสำหรับการออกแบบเครื่องประดับ โดย สามารถนำโละจำรูปผลิตเป็นเครื่องประดับ และเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและนักวิจัยผู้ ต้องการ ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะจำรูปสำหรับ เครื่องประดับ

2) ด้านนโยบาย

งานวิจัยที่ได้เป็นการส่งเสริมการสร้างหน่วยงานในมหาวิทยาลัยให้เป็นองค์กรที่เป็นแหล่ง รวมความรู้ด้านศาสตร์ต่างๆ เพื่อสนับสนุนนโยบายเพื่อให้มหาวิทยาลัยการเป็นองค์กรแห่ง การเรียนรู้

3) ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

งานวิจัยนี้มีประโยชน์โดยตรงต่อธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งเป็นธุรกิจที่มีมูลค่าสูง และนำเงินเข้าประเทศในลำดับต้น

4) ด้านสังคมและชุมชน

สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรงทั้งในธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับขนาดใหญ่และ วิสาหกิจชุมชุนโดยเฉพาะกลุ่ม SME ด้านอัญมณีและเครื่องประดับ

5) หน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่จะนำผลงานไปใช้ประโยชน์

หน่วยงานภาครัฐที่สามารถนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์คือนิสิตนักศึกษาทั้งระดับอุดมศึกษา และบัณฑิตศึกษา ที่เปิดการเรียนการสอนด้านการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ รวมถึง สถาบันที่มีการเรียนการสอนด้านการออกแบบเครื่องประดับ สามารถนาโลหะผสมจำรูป เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชิ้นงานเครื่องประดับ สำหรับหน่วยงานเอกชนคือบริษัทผู้ผลิตอัญ มณีและเครื่องประดับ

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถึงสมบัติทางกล ทางแสงและทางโครงสร้างจุลภาคของ โลหะผสมจำรูปเสมือนทองในระบบที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก อีกทั้งยังคงสภาพเป็นโลหะที่มีการ จำรูปได้ เพื่อผลิตเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการผลิตเครื่องประดับ โดยชิ้นงานจะหล่อด้วยระบบ สุญญากาศ โดยสถานที่ทำการทดลอง เตรียมตัวอย่างโลหะผสม การวิเคราะห์เบื้องต้น และการวัด ความสามารถต่อการต้านทานการหมอง การวัดความแข็ง สามารถดำเนินการ ณ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือชนิดต่าง ๆ คือ การ ตรวจวัดและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งแบบส่องกราดและแบบ ส่องผ่าน สามารถดำเนินการที่ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัย (รูปที่ 1.9) ดังนี้

- ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์
- จัดเตรียมโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al และ ระบบ Cu-Al หล่อด้วยเครื่องหล่อแบบ เหนี่ยวนำ
- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะสัณฐานเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) วัดความแข็ง ด้วยเครื่องวัดความแข็ง รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคและ

ลักษณะสัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

- ทดสอบความสามารถในการคืนรูปด้วยวิธีวัดการดัดงอ
- ตรวจสอบสีของชิ้นงานหลังหล่อและชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบการหมองตามมาตรฐาน CIELAB
- ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปเย็น
- ทดสอบความสามารถในการคืนรูปด้วยวิธีวัดการดัดงอหลังการขึ้นรูป
- 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 และเปรียบเทียบ ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคการที่ส่วนผสมและสภาวะต่าง ๆ
- สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในรูปแบบการเขียนรายงานและเตรียมผลงานเพื่อการ
 ตีพิมพ์ทั้งในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติ
- ออกแบบและผลิตชึ้นงานเครื่องประดับสร้างสรรค์
- 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 สำหรับการเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่น บาง และเทียนขีผึ้งแบบเม็ด (beads) สำหรับการขึ้นรูปแบบฉีดชิ้นงานที่แหวน

2. หัวแร้งสำหรับเชื่อมชิ้นงานเทียน

- 3. แผ่นยางสำหรับการเตรียมแม่พิมพ์ยาง
- 4. บล็อกแม่พิมพ์อะลูมิเนียมและแผ่นรองอะลูมิเนียมสำหรับการอัดแม่พิมพ์ยาง
- 5. จุกโลหะสำหรับเป็นฐานของแบบพิมพ์ยาง



รูปที่ 2.2 วัสดุและอุปกรณ์หลักสำหรับการเตรียมชิ้นงานเทียนขี้ผึ้งและการทำแม่พิมพ์ยาง (a) เทียนขึ้ ผึ้งแบบแกะลาย (b) เทียนขีผึ้งแบบเม็ด (c) แผ่นยาง (d) แผ่นรองอะลูมิเนียม และ (e) แผ่นรอง อะลูมิเนียม

2.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมปูน การหล่อโลหะและการขัดตัวอย่าง

อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานและขัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่

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

วัสดุและอุปกรณ์หลักแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 (a) ปูนหล่อเครื่องประดับ (b) เบ้าโลหะและฐานยาง และ (c) คีมจับและมีดผ่าตัดในการผ่า แม่พิมพ์ยาง

2.1.4 เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวอย่าง เทียนต้นแบบ เครื่องมือสำหรับกระบวนการหล่อโลหะ และการเตรียมตัวอย่างเพื่อการศึกษา โครงสร้างจุลภาคทั้งการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นและสำหรับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย เครื่องมือขั้นสูง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

- เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง
- 2. เครื่องฉีดเทียน
- 3. เครื่องผสมปูน PORN THEP LNK 530
- 4. เครื่องดูดสุญญากาศสำหรับเข้าปูน KITZ 400 WOG
- 5. เครื่องขัดตัวอย่างแบบสองจาน Buehler metaserv 2000
- 6. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM)
- 7. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ Vicker's Microhardness (ESEWAY 400)
- 8. เตาอบเข้าปูน TOHO TTM-390
- 9. เครื่องหล่อโลหะแบบขดลวดเหนี่ยวนำ 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) เครื่องอัด แม่พิมพ์ยาง (b) เครื่องฉีดเทียน (c) เครื่องผสมปูน (d) เครื่องดูดสุญญากาศสำหรับเบ้าปูน (e) เครื่อง ขัดตัวอย่างแบบสองจาน (f) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (g) เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (h) เตาอบ เบ้าปูน และ (i) เครื่องหล่อโลหะแบบขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 เครื่องมือขั้นสูงในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเตรียมตัวอย่าง (a) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (b) เครื่องโฟกัสไอออนบีม และ (c) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง ผ่าน

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมส่วนผสมในการหลอมโลหะด้วยเครื่องหล่อแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

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 โลหะผสมจำรูป**ระบบ** Cu-Zn-Al

รหัสตัวอย่าง	ส่วนผสม (wt%)			
	Cu	Zn	Al	In
0%In	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%In	Bal.	20.8	5.8	1.0

ตารางที่ 2.2 โลหะผสมจำรูป**ระบบ** Cu-Al-Mn

U		d_{0}	
รามัสตัวอย่าง		สานผสม (พเ%)	1
1 11011 100 10	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

- เตรียมชิ้นงานเทียนเพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบได้เตรียมใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะแบบ แผ่นบางและลักษณะของแหวน โดยชิ้นงานแบบแผ่นบางมีขนาดกว้างคูณยาว 25x5 มม. และมีความหนา 0.3, 0.5 และ 1.0 มม. ตามลำดับ
- ชั่งน้ำหนักต้นเทียนเพื่อไปคำนวณปริมาณน้ำหนักโลหะที่ต้องใช้ โดยใช้น้ำหนักของ ทองแดงเป็นหลัก



รูปที่ 2.6 ชิ้นงานเทียนขี้ผึ้ง (a) ชิ้นงานเทียนติดก้านทางเดินน้ำ และ (b-c) ลักษณะต้นเทียนด้านบน และด้านข้าง

- ผสมปูนเพื่อทำเบ้าโลหะ โดยการผสมปูนจะใช้อัตราส่วน ปูน : น้ำ เท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 40 กรัม คนให้ปูนผสมกับน้ำ
- นำปูนที่ผสมกับน้ำดีแล้ว โดยการใช้เครื่องผสมปูนตีปูนให้เข้ากัน ซึ่งมีปูนมีปุ่มทั้งหมด 3 ระดับ จนตีปูนเข้ากันดีแล้ว จากนั้นใช้เครื่องดูดสุญญากาศดูดอากาศที่อยู่ในปูนออก เพื่อไม่ให้เบ้าปูนพรุนเนื่องจากมีฟองอากาศ
- เทปูนลงกระบอกเหล็กสำหรับหล่อเบ้าปูนที่ครอบต้นเทียนชิ้นงานไว้แล้ว โดยเทไม่ให้ ชิ้นงานเสียหาย ระดับปูนสูงกว่าชิ้นงานประมาณ 1 นิ้ว
- นำกระบอกเหล็กที่ทำการเทปูนเสร็จแล้วไปดูดอากาศออกอีกหนึ่งรอบ และตั้งทิ้งไว้ให้ ปูนแข็งประมาณ 20 นาที ให้ปูนแห้งสนิท
- 7. นำเบ้าหล่อปูนที่แห้งสนิทแล้วเข้าเตาอบเป็นเวลา 13 ชั่วโมง

การเตรียมเข้าปูนแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะเบ้าปูน (a) ปูนในเบ้าโลหะมองจากมุมบน (b) นำฐานยางออกจากเบ้าโลหะ ก่อน นำเข้าเตาอบปูน (c) การวางเบ้าหล่อปูนในเตาอบ

- 8. หล่อโลหะด้วยเครื่องหล่อขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1,100 °C โดยใส่ทองแดงบริสุทธิ์ลงไปก่อน รอจนหลอม จากนั้นใส่โลหะผสมทองแดงสังกะสีลงไป จะมีการระเหยของสังกะสีเกิดขึ้น รอจนโลหะหลอมละลาย และเทอะลูมิเนียม และอินเดียม ลงไปสุดท้าย อะลูมิเนียมจะ เกิดฟิล์มเคลือบผิวหน้าของน้ำโลหะ
- นำเบ้าหล่อปูนออกจาเตาที่อุณหภูมิ 650 ℃ เข้าเครื่องหล่อทันที และทำการเทโลหะลง เบ้า จากนั้นนำเบ้าไปวางที่ที่มีอากาศถ่ายเท ประมาณ 15 นาที แล้วล้างปูนออกเพื่อเอา ชิ้นงานหลังหล่อ ชิ้นงานหลังหล่อแสดงดังรูปที่ 2.8



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

2.2.3 ขั้นตอนทดสอบการคืนรูป

1. ตัดชิ้นงานที่ได้จากการหลอมโล[์]หะ นำชิ้นงานทดสอบในน้ำร้อนประมาณ 100 °C

2. ทดสอบด้วยไดร์เป่าผม ไฟเซ็ค และหัวทอร์ช พร้อมกับวัดอุณหภูมิที่คืนรูป พร้อมทำการ วัดองศาของชิ้นงาน ตามการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย องศาหลังทำการดัดงอ (θ_A) และองศาหลังการคืนรูป (θ_B)

3. วัดเปอร์เซ็นต์การคืนรูปของชิ้นงาน (η) ตามสมการ (2.1)

$$\eta = \frac{\theta_A - \theta_B}{\theta_A} \times 100\% \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.9 การทดสอบการคืนรูป (a) ลักษณะก่อนทดสอบการดัดงอ (b) หลังดัดงอ (c) หลังการคืนรูป (d) การทดสอบการดัดงอของชิ้นงานแหวน

2.2.4 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปเชิงกล

การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปด้วยการให้ความร้อนและการรีดร้อน อิง ตัวอย่างงานวิจัยของ Asanović และคณะ (2012) ซึ่งได้มีกายศึกษาการแปรรูปเชิงกลของโลหะผสม จำรูปที่ส่วนผสม Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%-Al ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ กระบวนการ ขึ้นรูปมีเชิงกลศึกษาในตัวอย่างที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มิลลิเมตร รีดจนได้ความหนาสุดท้าย 0.3 มิลลิเมตร (รีดลดความหนา 30%) ชิ้นงานแบ่งเป็น 2 กลุ่ม เพื่อศึกษาความแตกต่างของการขึ้นรูป ด้วยการรีดร้อนและรีดเย็น ขั้นตอนการทดลองดังนี้

กลุ่มที่ 1 รีดร้อน

- อบละลายเฟส (homogenisation) ที่อุณหภูมิ 830 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง ทำเย็นในน้ำ อย่างรวดเร็ว (quenching)
- อบโลหะที่อุณหภูมิ 830 ℃ เวลา 20 นาที
- 3. รีดลดขนาดชิ้นงานให้ได้ความหนา 0.3 มิลลิเมตร
- 4. อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 20 นาที
- 5. ตัวอย่างเย็นตัวในอากาศ

กลุ่มที่ 2 รีดเย็น

- อบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 830 °C เวลา 2 ชั่วโมง
- 2. ทำเย็นในน้ำอย่างรวดเร็้ว
- อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 20 นาที
- 4. รีดลดขนาดชิ้นงานให้ได้ความหนา 0.3 มิลลิเมตร
- ตัวอย่างเย็นตัวในอากาศ

2.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการหมอง

ทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองด้วยเหงื่อเทียม ซึ่งมีส่วนผสมดังนี้

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

นำตัวอย่างแขวนไว้ในภาชนะปิดของสารละเลายเหงื่อเทียมดังกว่า เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ความสามารถในการกันหมองคือ 0–240 ชั่วโมง

2.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็ง

2.4.1 การขัดชิ้นงาน

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

- นำชิ้นงานไปกระดาษทราย ที่เบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 ด้วย เครื่องขัดตัวอย่างแบบสองจาน
- 6. ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 5, 1 และ 0.3 ไมครอน แสดงในรูปที่ 2.10
- นำชิ้นงานไปกัดกรด ด้วยกรดไนตริก ที่สัดส่วน กรดไนตริกต่อน้ำ เท่ากับ 50:50 โดยใช้ สำลีชุบแล้วปาดบนผิวหน้าชิ้นงาน
- 8. นำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 5x, 10x และ 20x
- 9. 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

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ด้วย X-ray Diffractometer ของ Bruker รุ่น 2D Phaser มุมเลี้ยวเบน 20 ในช่วง 20-60° เก็บข้อมูลทุก 0.012° ข้อมูลที่ได้เทียบ ด้วยมาตรฐาน JC-PDF โดยเครื่องมือตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขัดขึ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600 และ 1000 ตามด้วยการขัดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 3.0 และ 1.0 µm ตามลำดับ ศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6335F (รูปที่ 2.5a) ทำงานที่ 15 kV ระยะทำงาน (working distance, WD) 10-11 mm และตรวจสอบองค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิคการ วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometry, EDS)

2.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม

การเตรียมชิ้นงานบางเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย TEM เตรียมด้วยเครื่องโฟกัสไอออน บีม (Focused Ion Beam, FIB) FEI รุ่น Quanta 3D FEG (รูปที่ 2.5b) หลักการเบื้องต้นของการ เตรียมตัวอย่างฟิล์มบางด้วยเครื่องมือนี้คือการยิงลำไอออนของแกลเลียม (Gallium ion, Ga⁺) ที่ พลังงาน 30 KV เพื่อขุดตัวอย่างทำให้เกิดหลุมบนตัวอย่าง โดยขั้นตอนดังนี้

- 1. เคลือบผิวตัวอย่างด้วยคาร์บอนเพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้
- ทำการเคลือบหรือตกตะกอนของแพลทินัม (platinum deposit) บนผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่ม ความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานและเพื่อความเรียบของการตัดด้วยไอออน
- ยิ่งลำไอออนของแกลเลียมเพื่อขุดให้เกิดหลุมทั้งด้านบนและด้านล่างของบริเวณที่ทำการ เคลือบด้วยแพลทินัม ขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดเป็นกำแพงบาง (thin wall) ในระดับ ไมโครเมตรเกิดขึ้นระหว่างรอยขุดทั้งสองนี้
- ตัดตัวอย่างเป็นรูปตัวยู (U-cut) โดยเว้นระยะการตัดไม่ให้ชิ้นงานบาง เรียกกว่าฟอยด์ บาง (thin foil) หลุดออกจากตัวอย่าง
- 5. เชื่อมชิ้นงานในส่วนของรูปตัวยูที่ตัดได้นี้เข้ากับปลายเข็มของ Omniprobe
- 6. ตัดชิ้นงานส่วนที่เหลือของรูปตัวยู เพื่อให้ชิ้นงานฟอยด์บางหลุดออกจากตัวอย่าง
- ย้ายชิ้นงานฟอยด์บางไปยังกริดทองแดง (Cu-grid) โดยเชื่อมต่อชิ้นงานฟอยด์บางกับ บริเวณปลายของนิ้วบี (B-finger) ซึ่งเป็นตำแหน่งตัวหนังสือบีบนกริดทองแดง
- ขัดผิดชิ้นงานโดยใช้ใช้ลำแกลเลียมไอออนพลังงานต่ำเพื่อให้ความหนาชิ้นงานค่อยๆ บาง ลง จนกระทั่งชิ้นงานมีความหนาต่ำกว่า 100 นาโนเมตร
- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟอยล์บางและชิ้นงานสำเร็จแสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11

ตามลำดับ ประกอบด้วย

- (a) หลุมที่เกิดจากการขุดด้วยลำแกลเลียมไอออน
- (b) การตัดชิ้นงานรูปตัวยู
- (c) เชื่อมต่อปลายเข็ม Omniprobe กับตัวอย่างฟอยล์บางและตัดส่วนที่เหลือของรูปตัวยู
- (d) เชื่อมต่อฟอยล์บางกับกริดทองแดงและตัดปลายเข็มเพื่อให้ตัวอย่างฟอยล์เป็นอิสระ
- (e) ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมต่อบนกริดทองแดง
- (f) ตำแหน่งชิ้นงานฟอยล์บางบน B-finger ของกริดทองแดง



รูปที่ 2.10 การเตรียมตัวอย่างฟอยล์บางด้วยด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม (a) หลุมที่เกิดจากการขุดด้วย ลำแกลเลียมไอออน (b) การตัดชิ้นงานรูปตัวยู (c) เชื่อมต่อปลายเข็ม Omniprobe กับตัวอย่างฟอยล์ บางและตัดส่วนที่เหลือของรูปตัวยู (d) เชื่อมต่อฟอยล์บางกับกริดทองแดงและตัดปลายเข็มเพื่อให้ ตัวอย่างฟอยล์เป็นอิสระ (e) ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมต่อบนกริดทองแดง (f) ตำแหน่งชิ้นงาน ฟอยล์บางบน B-finger ของกริดทองแดง



รูปที่ 2.11 ชิ้นงานฟอยล์บางสำเร็จ

2.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

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

บทที่ 3 ผลและอภิปรายผล

3.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโลหะผสม Cu– Zn–Al ที่เจือด้วยอินเดียม 0–1.0 wt% ทุกส่วนผสมแสดงโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ (β') โดยที่ ส่วนผสม 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% In จะมีเฟสผสมของเฟสแม่ (Parent phase) ซึ่งเป็นโครงสร้างออ สเทนไนต์ ร่วมกับโครงสร้างมาเทนไซต์ ในขณะที่ชิ้นงาน 1.0 wt% In แสดงเพียงโครงสร้างมาเทน ไซต์เท่านั้น โดยเฟสมาเทนไซต์จะพบเป็นเฟสหลักสำหรับโลหะผสมในระบบดังกล่าว (Kwarciak, 1986): Blanco และคณะ, 2013): Xiaomin และคณะ, 2008): Bujoreanu, 2008)



รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

3.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูป

การทดสอบการจำรูปของโลหะทำโดยทำการดัดงอชิ้นงานให้ทำมุม 45° ซึ่งเป็นมุมดัดงอ เริ่มต้น (Θ A) จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบการคืนรูปด้วยโดยให้ความร้อน ชิ้นงานจะมีการคืนรูปโดยมุม ชิ้นงานหลังการคืนรูป (Θ B) จะมีองศาน้อยกว่ามุมดัดงอเริ่มต้น ลักษณะมุมดัดงอก่อนและหลังการ ทดสอบแสดงในรูปที่ 3.2 และลักษณะชิ้นงานจริงจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ภาพร่างมุมในการทดสอบการดัดงอ (ดัดแปลงจาก Xiaomin และคณะ, 2008)

หลังการให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยการวิจัยนี้ให้ความร้อนโดยการจุ่มใน น้ำเดือด ไฟแซ็ค และเปลวไฟจากหัวทอร์ช ซึ่งมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันประมาณตั้งแต่ 100 °C ถึง 1000 °C การ คำนวณหาอัตราการคืนรูปสามารถคำนวณได้จากสมการ *(3.1)*

$$\eta = \frac{\theta_A - \theta_B}{\theta_A} \times 100\% \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.3 การดัดงอชิ้นงานเพื่อทดสอบการคืนรูป (a) ชิ้นงานที่ถูกดัด และ (b) ชิ้นงานหลังให้ความ ร้อน

3.2.1 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Zn-Al

ชิ้นงานทดสอบมี 2 ขนาดคือ 25 × 5 × 0.5 และ 25 × 5 × 1 มิลลิเมตร โดยจากการ ทดสอบการคืนรูปพบว่าโลหะผสมสามารถคืนรูปได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100–200 ℃ ขึ้นไป ส่วน ชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำร้อนไม่สามารถทำให้โลหะคืนรูปได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบต่ำเกินไป และความหนาของชิ้นงานมีความสำคัญต่อความสามารถในการคืนรูป กล่าวคือความสามารถในการ คืนรูปมีมากขึ้นหากชิ้นงานมีความบางลง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยชิ้นงานที่สามารถจำรูปได้ดีที่สุด คือโลหะผสมที่มีส่วนผสมอินเดียม 0.5 wt% ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้งด้วยการให้ความร้อนจากไฟแซ็ค ทั้งนี้พบว่าการเจือด้วยอินเดียมตั้งแต่ 1.0 wt% ขึ้นไป โลหะ มีความแข็ง เปราะ และไม่สามารถจำรูปได้

	0000100010		(จำนวนครั้งคืนรูป)					
รหัสตัวอย่าง	(บิลลิเนตร)	น้ำร้อน	ไฟแช็ค	หัวทอร์ช				
	(ME16169/619)	(อุณหภูมิ ≈100 °C)	(อุณหภูมิ ≈700 °C)	(อุณหภูมิ ≈ 1000 °C)				
00/10	0.5	-	10	3				
0%in	1.0	-	7	1				
0.10/1-	0.5	-	20	2				
0.1%in	1.0	-	5	1				
0.20/1-	0.5	-	10	2				
0.3%IN	1.0	-	-	1				
0.50/10	0.5	-	21	3				
0.5%IN	1.0	-	13	1				
1.00/10	0.5	-	-	-				
1.0%IN	1.0	-	-	-				

ตารางที่ 3.1 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หมายเหตุ ที่ส่วนผสมของอินเดียม 1.0 wt% โลหะมีความแข็ง เปราะ และไม่มีความสามารถในการ จำรูป

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

ชิ้นงาน	จำนวนครั้ง	องศามุมชิ้นงานดัดงอ	องศามุมชิ้นงาน	อัตราการคืนรูป
ตัวอย่าง	ทดสอบ	เริ่มต้น ($ heta$ A)	หลังการคืนรูป ($ heta$ B)	(%)
	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	20	56
	4	45	18	60
0%ln	5	45	20	56
	6	45	30	33
	7	45	30	33
	8	45	30	33
	9	45	30	33
	10	45	35	22
	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	20	56
	4	45	15	67
0.1%ln	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 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร

รายงานฉบับสมบูรณ์:

การพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์

ชิ้นงาน	จำนวนครั้ง	องศามุมชิ้นงานดัดงอ	องศามุมชิ้นงาน	อัตราการคืนรูป
ตัวอย่าง	ทดสอบ	เริ่มต้น($ heta$ A)	หลังการคืนรูป ($heta$ B)	(%)
	1	45	20	56
	2	45	30	33
	3	45	25	44
	4	45	35	22
0.3%ln	5	45	35	22
	6	45	35	22
	7	45	35	22
	8	45	35	22
	9	45	30	33
	1	45	15	67
	2	45	20	56
	3	45	25	44
	4	45	25	44
0.5%ln	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 3.2 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร (ต่อ)

ชิ้นงาน	จำนวนครั้ง	องศามุมชิ้นงานดัดงอ	องศามุมชิ้นงาน	อัตราการคืนรูป
ตัวอย่าง	ทดสอบ	เริ่มต้น ($ heta$ A)	หลังการคืนรูป (0B)	(%)
	1	45	20	56
	2	45	20	56
00/1	3	45	25	44
0%in	4	45	25	44
	5	45	30	33
	6	45	30	33
	7	45	30	33
	1	45	20	56
	2	45	25	44
0.1%ln	3	45	30	33
	4	45	30	33
	5	45	32	28
0.3%ln	-	-	_	_
	1	45	20	56
	2	45	20	56
	3	45	25	44
	4	45	25	44
	5	45	30	33
	6	45	30	33
0.5%ln	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

ตารางที่ 3.3 อัตราการคืนรูปของโลหะผสมในชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร

หมายเหตุ 0.3%In ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร จากการทดลองนี้โลหะไม่สามารถคืนรูปได้ สันนิษฐานว่า อาจเกิจจากสภาวะการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ไม่เหมาะสม

3.2.2 การทดสอบความสามารถในการจำรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn

การทดสอบอัตราการคืนรูปของโลหะระบบ Cu-Al-Mn แสดงดังตารางที่ 3.4

พบว่าโลหะที่มีอัตราการคืนรูปดีที่สุดคือโลหะที่มีการเจือด้วยแมงกานิสุ 2.5

wt% คือมีความสามารถในการคืนรูปได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้หากมีการเจือด้วยแมงกานิสที่มาก เกินไปคือปริมาณ 2.5 wt% ชิ้นงานจะมีความแข็งเปราะ ทำให้ไม่สามารถดัดงอได้

ชิ้นงาน	จำนวนครั้ง	องศามุมชิ้นงานดัดงอ	องศามุมชิ้นงาน	อัตราการคืนรูป
ตัวอย่าง	ทดสอบ	เริ่มต้น ($ heta$ A)	หลังการคืนรูป ($ heta$ B)	(%)
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

ตารางที่ 3.4 อัตราการคืนรูปของโลหะผสม Cu-Al-Mn

3.3 การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น ไม่สามารถ จำรูปได้ คือโลหะทั้งสองกลุ่มสูญเสียความสามารถในการจำรูป ชิ้นงานมีความเสียหายคือมีการแตก และขาดในระหว่างการรีด

3.4 ความสามารถในการต้านทานการหมอง

การทดสอบการหมองด้วยเครื่อง UV-Portable ในระบบ CIE โดยระบุเป็นค่า L*, a*, b* เพื่อหาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) โดยหาค่าเฉลี่ย ΔE จากการวัดจำนวน 3 ครั้ง โดยระบุเป็นค่าสีใน ระบบ CIE และค่าเฉลี่ย ΔE ลักษณะสีจากการทำสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง แสดง ดังตารางที่ 3.5 และค่าสีแสดงดังตารางที่ 3.6

ะ อิง (งาง เ	ເວລາ (ชั่วโมง)											
	0	24	48	78	96	120	144	168	192	216	240	
Cu			Rife.		No.	1	1	N.	P.	Sec.		
0%ln	1									A A		
0.1%ln	-			N.				- Pa				
0.3%ln	1			D.	10							
0.5%ln					- and							

ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงสีในตัวอย่างทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง

ตารางที่ 3.6 ค่าสึในระบบ CIE ของโลหะผสม

ชิ้นงาน	เวลา (ชั่วโมง)	ค่า CIE L*	ค่า CIE a*	ค่า CIE b*	ค่า CIE ΔL*	ค่า CIE 	ค่า CIE Δb*	ΔE
	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
Pure	96	24.24	10.8	6.7	14.9	7.1	9.3	19.0
Cu	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

		r						
<i>ข</i> สิ้าเขาขา	เวลา	ค่า CIE						
06016	(ชັ່วโมง)	L*	a*	b*	∆L*	∆a*	∆b*	ΔE
	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
0%ln	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	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
0.1%ln	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	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
0.3%ln	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	ເວລາ (ชັ່ວໂมง)	ค่า CIE L*	ค่า CIE a*	ค่า CIE b*	ค่า CIE ΔL*	ค่า CIE 	ค่า CIE Δb*	ΔE
	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
0.5%ln	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

ตารางที่ 3.6 ค่าสีในระบบ CIE ของโลหะผสม (ต่อ)

ผลการตรวจความแตกต่างของสีหลังการทดสอบการหมองของชิ้นงานด้วย UV-Portable ดัง แสดงในรูปที่ 3.4 กราฟแสดงความแตกต่างของสีชิ้นงานหลังการทดสอบการหมอง ณ เวลาต่างๆ มี แนวโน้มของสีที่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นที่ โดยชิ้นงานหลังหล่อ 0.3 wt% In มีค่า เปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุดคือความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ชิ้นงานที่ส่วนผสมอื่น



รูปที่ 3.4 เส้นกราฟแนวโน้มค่าความแตกต่างของสี

3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง

3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ

รูปที่ 3.5 แสดงโคร[์]งสร้างจุลภาคของชิ้นงา[้]นโลหะผสมจำรูปสภาวะหลังหล่อด้วยกล้อง จุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10 x พบว่า โลหะมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (β'-phase) เป็นหลัก จาก ภาพจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะผสมจำรูปที่ไม่มีการเจือด้วยอินเดียม (รูปที่ 3.5a) แสดงเกรนขนาดใหญ่ มากกว่า 100 μm และมาเทนไซต์ขนาดใหญ่เห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น โครงสร้าง ดังกล่าวจะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีส่วนผสมของอินเดียมมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเจืออินเดียมมีผลต่อ การลดขนาดของเกรนจึงส่งผลให้ขนาดของมาเทนไซต์ลดลงด้วย

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.5b-d จะเห็นว่าสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วน ที่เป็นเฟสหลัก (matrix) ซึ่งสามารถเห็นโครงสร้างลักษณะยาวของมาเทนไซต์ได้ชัดเจน ในที่นี้เรียก เป็นเฟสหลักหรือเฟสที่หนึ่ง (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อ 3.7) เป็นเฟสที่มีความสว่างมากกว่าอีก เฟสซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสรองหรือในที่นี้เรียกเฟสที่สอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายเกรนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป ในเฟสหลักโดยมีการเรียงตัวในทิศทางต่าง 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 การรีดขึ้นรูปมีผลให้โครงสร้าง มาเทนไซต์มีการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ทำให้โลหะสูญเสียความสามารถในการจำรูป โครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดร้อนและรีดเย็นแสดงดังรูปที่ 3.6



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

ซึ่งจากการวิจัยนี้ หากเปรียบเทียบกับงานตีพิมพ์ของ Natali และคณะ (2013) ซึ่งได้รายงาน ผลการรีดเย็นของโลหะผสม Cu-Zn-Al ที่ผสมอะลูมิเนียม 4.8 wt% โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 850 °C/20 นาที จุ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 100 ℃ ตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 320 °C/30 นาที ทำเย็นในน้ำที่ อุณหภูมิ 100 ℃ และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าโครงสร้างมาเทนไซต์จะมีการเปลี่ยนแปลงใน ระหว่างการรีดเย็น โดยจะสามารถเปลี่ยนรูป ได้มากสุด 15 % เมื่อมีการรีดโลหะ หลังจากนั้นจะไม่ สามารถรีดได้อีกเนื่องจากโลหะมีการแตกร้าว

3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูประบบ Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ

รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn สภาวะหลังหล่อ จะเห็นว่าโครงสร้าง โลหะที่มีส่วนผสม 1.5%Mn (รูปที่ 3.7a) มีโครงสร้างมาเทนไซต์ในปริมาณน้อย ไม่สามารถทำการดัด งอได้ เนื่องจากโลหะมีความเปราะสูง ในขณะที่โลหะที่ส่วนผสม 2.0-3.5 wt%Mn แสดงโครงสร้าง มาเทนไซต์ชัดเจน โดยเมื่อนำโลหะทั้ง 4 ส่วนผสมทำการดัดงอเป็นมุม 45 องศา และให้ความร้อนเพื่อ ทดสอบการจำรูป พบว่าโครงสร้างหลังการทดสอบได้เปลี่ยนไปคือ ชิ้นงาน 1.5%Mn มีขนาดเกรนที่ ใหญ่ขึ้นและไม่แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ 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 สภาวะหลังดัดงอและให้ความร้อน (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) โดยจาก การวัดค่าความแข็งของโลหะผสมจำรูปหลังหล่อพบว่าโลหะผสมจำรูปที่มีค่าความแข็งมากที่สุดคือ ประมาณ 212 HV ในโลหะผสมที่ไม่เจือด้วยอินเดียม (0%In) และพบว่าการเจือด้วยอินเดียมจะมีผล ให้ค่าความแข็งของโลหะลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเจือด้วยอินเดียมทำให้มีการแยกเฟสเป็น 2 ลักษณะ จึงได้ทำการวัดความแข็งแบบแยกเฟสหลักและเฟสรอง ในตัวอย่างที่มีการเจือด้วยอินเดียม พบว่าค่าความแข็งของเฟสหลัก มีค่ามากกว่าเฟสรอง โดยจะเห็นได้ชัดเจนในตัวอย่าง 0.5 wt% In เฟสหลักซึ่งเป็นมาเทนไซต์มีค่าความแข็งประมาณ 204 HV ในขณะที่เฟสรองมีค่าความแข็งเพียง 136 HV ลักษณะรอยกดเพื่อวัดค่าความแข็งในเฟสหลักและเฟสรอง แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า รอยกดนี้เฟสหลักสีน้ำตาลมีขนาดรอยกดเล็กกว่าเฟสรองซึ่งเป็นเฟสสีขาว จากขนาดความแตกต่างของ รอยกดนี้เฟสที่แข็งกว่าจะมีขนาดรอยกดเล็กกว่า เนื่องจากมีความสามารถต่อการต้านทานแรงกดที่สูง กว่านั่นเอง

mon los	ตัวแรงไร		ครั้งที่					
N 199 14	หาแทนง	1	2	3	4	5	(HV)	
0%In	เฟสหลัก	209.5	224.1	204.8	232.1	192.2	212.5	
0.10/10	เฟสหลัก	214.7	235.6	206.0	161.9	113.2	186.3	
0.1%In	เฟสรอง	265.5	173.8	176.1	168.3	134.3	183.6	
0.20/lm	เฟสหลัก	185.2	160.0	229.5	201.1	187.9	192.7	
0.3%IN	เฟสรอง	182.2	168.3	162.5	121.3	163.0	159.5	
	เฟสหลัก	229.7	177.6	202.8	209.7	199.6	203.9	
0.5%IN	เฟสรอง	110.5	147.3	144.6	134.0	144.4	136.2	

ตารางที่ 3.7 ค่าความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังหล่อ



รูปที่ 3.9 ลักษณะรอยกดจากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Zn-Al สภาวะหลังทดสอบการจำรูป แสดงดังตารางที่ 3.8 แสดงค่าความแข็งหลังทดสอบการคืนรูป (หลังการดัดงอและให้ความร้อน) การดัดงอตามด้วยการ ให้ความร้อนส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะเพิ่มขึ้นในทุกเฟส ทำให้ดัดงอได้ยากขึ้นและโลหะเริ่ม สูญเสียความสามารถในการจำรูป

ตัวอย่าง			ครั้งที่					
	ตาแหนง	1	2	3	4	5	ทาเนสย (HV)	
0%ln	เฟสหลัก	224.9	221.0	263.3	330.4	250.1	248.9	
0.1%ln	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	
0.20/1-	เฟสหลัก	308.2	347.4	409.1	361.8	383.3	362.0	
0.3%IN	เฟสรอง	249.0	230.3	161.0	162.4	186.3	197.8	
0.5%ln	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	

ตารางที่ 3.8 ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Zn-Al หลังทดสอบการจำรูป

นอกจากนี้ยังพบว่าในโลหะผสมที่โครงสร้างมาเทนไซต์มีปริมาณน้อยเกินไป หรืออาจเกิดจาก การควบคุมอัตราการเย็นตัวในระหว่างการหล่อโลหะไม่ดีพอ ทำให้ไม่เกิดโครงสร้างมาเทนไซต์โลหะ ผสมดังกล่าวนี้จะไม่สามารถจำรูปได้

การพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์

3.6.2 การวัดความแข็งของโลหะผสม Cu-Al-Mn

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าความแข็งในโลหะผสม Cu-Al-Mn พบว่าความแข็งของโลหะจะมีค่า ลดลง เมื่อปริมาณของแมงกานิสมากขึ้น ตามลำดับ

				ข					
ตัวอย่าง		ครั้งที่							
01908.12	1	2	3	4	5	คาเนสย (HV)			
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			

ตารางที่ 3.9 ค่าความแข็งโลหะผสม Cu-Al-Mn หลังทดสอบการจำรูป

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Black scattered electron, BEI) และภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron Image, SEI) แสดงดังรูปที่ 3.8 ภาพอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับสามารถแสดงความแตกต่างของเฟส (phase contrast) หรือความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมี (chemical composition) สำหรับภาพ อิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถบอกลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานได้ ซึ่งชิ้นงานทั้งหมดนี้ผ่านการกัดกรด เพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคของโลหะได้ชัดเจนมากขึ้น

จากภาพแสดงโครงสร้างมาเทนไซต์ซึ่งเป็นโครงสร้างลักษณะแบนยาว คล้ายเส้นเข็ม ซึ่ง สามารถเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะในเฟสหลักจากภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยโลหะผสมจำรูปที่ไม่เจือ ด้วยอินเดียม (รูปที่ 3.8 a-b) แสดงโครงสร้างมาเทนไซต์เฟสหลักเพียงเฟสเดียว ในขณะที่โลหะผสมที่ เจือด้วยอินเดียมนั้นจะมีการแยกเฟสออกเป็น 2 ส่วนคือโครงสร้างของเฟสที่หนึ่งซึ่งแสดงลักษณะ มาเทนไซต์ชัดเจนและเฟสที่สองซึ่งคาดว่าจะเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์เช่นเดียวกันแต่เรียงตัว (orientation) ในทิศทางต่างกัน



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

การพัฒนาโลหะผสมเสมือนทองสำหรับวัสดเครื่องประดับและงานสร้างสรรค์

จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุด (EDS Point Analysis) โดยพิจารณา เป็น 4 บริเวณ ดังนี้

จุด A เป็นบริเวณสีขาวของเฟสที่หนึ่ง

จุด B เป็นบริเวณสีเทาของเฟสที่หนึ่ง

จุด C เป็นบริเวณสีขาวของเฟสที่สอง

จุด D เป็นบริเวณสีเทาของเฟสที่สอง

ลักษณะบริเวณจุดวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ธาตุแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.10 จากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุชี้ให้เห็นว่าอะลูมิเนียมในเฟสที่หนึ่งมีปริมาณมากกว่าในเฟสที่สอง และ อินเดียมจะเจืออยู่ในบริเวณเฟสที่หนึ่งเท่านั้น ในขณะที่สังกะสีนั้นสามารถละลายได้ในทุกเฟสใน ปริมาณใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.11 บริเวณการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในตัวอย่างเจือด้วยอินเดียม 0.3 wt%

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	-	-

ตารางที่ 3.10 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่าง 0.3 wt% In

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ธาตุในตารางที่ 3.11 ซึ่งวิเคราะห์เฉพาะบริเวณของมาเทนไซต์ ในเฟสที่หนึ่ง ยืนยันเฟสสีขาวมีส่วนผสมของอินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าในบริเวณที่มีสีเทา (ยกเว้นตัวอย่าง 0%In ซึ่งไม่ได้เจืออินเดียม)

ตารางที่ 3.11 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดในชิ้นงานตัวอย่างต่าง ๆ

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

3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การศึกษาโครงสร้างจุ่ลภาคด้วยกล้องจุ่ลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมีข้อจำกัดในการ เตรียมตัวอย่าง เนื่องจากตัวอย่างที่ดีต้องมีความหนาต่ำกว่า 100 นาโนเมตร เพื่อให้บางเพียงพอและ ให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านชิ้นงานได้ และข้อจำกัดอีกประการคือโลหะผสมจำรูปนั้นอาจเปลี่ยนแปลง โครงสร้างเนื่องจากแรงจากการขัด งานวิจัยนี้จึงใช้การเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องโฟกัสไอออนบีม ดัง ได้อธิบายรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในหัวข้อ 2.6 การศึกษาในขั้นตอนนี้ได้เลือกชิ้นงานที่มี ส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่มีความสามารถในการจำรูปได้ที่ที่สุด โดย ชิ้นงานสำเร็จ (แสดงดังรูปที่ 2.12) มีความหนาประมาณ 80 นาโนเมตร

รูปที่ 3.12 แสดงภาพ Bright-field TEM ของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5%In สภาวะหลังหล่อ โดยในรูปที่ 3.10(a) ไม่มีการเอียงตัวอย่าง (no tilting) จากรูปแสดงให้เห็น โครงสร้างของมาเทนไซต์ลักษณะเป็นแผ่น (plate) ได้ชัดเจน ในรูปแสดงความแตกต่างของเฟส (phase contrast) เป็นเฟสสีขาวและดำ และเมื่อทำการเอียงตัวอย่างไปเป็นมุม 20° ในรูป 3.10(b) ลักษณะเฟสดังกล่าวมีการเปลี่ยนเป็นสีสลับกัน คือเฟสขาวจะค่อยๆ เห็นเป็นดำ และเฟสสีดำค่อยๆ เปลี่ยนและเห็นเป็นเฟสขาว โดยจากการเอียงตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าทั้งเฟสสีขาวและดำคือเฟสของ มาเทนไซต์ที่เรียงตัวในทิศทางต่างกัน ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในมุมที่ต่างกัน จึงทำให้ภาพ ที่เห็นเป็นเฟสสีต่างกัน



รูปที่ 3.12 Bright-field TEM โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป 0.5%In สภาวะหลังหล่อ เปรียบ เทียมมุมในการเอียงตัวอย่าง (a) ไม่มีการเอียงตัวอย่าง (b) หลังเอียงตัวอย่างมุม 20°

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 พบว่า ภายใต้โครงสร้างของมาเทนไซต์นั้นมีการเรียงตัวของระนาบแฝดขนาดเล็ก (microtwins) ลักษณะ คล้ายแผ่น (plate-like) ของเรียงตัวเป็นชั้นๆ และแนวรอยเลื่อน (stacking faults) เกิดขึ้น โดยแนว รอยเลื่อนและระนาบแฝดขนาดเล็กนี้มีการเรียงตัวใน 2 ทิศทาง แสดงด้วยอักษร A และ B โดย ทิศทางระนาบแฝดแสดงตามแนวเส้นประ ระนาบดังกล่าวทำมุมกับแนวรอยต่อ 90° และ 55° 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) ทั้งนี้รูปแบบการ เลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแสดงลักษณะเส้นแนวยาวหรือเรียกว่า streak ซึ่งเป็นลักษณะการเลี้ยวเบนของ อิเล็กตรอนที่เกิดจากโครงสร้างลักษณะแผ่นที่มีขนาดเล็กเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งทิศทางของ streak จะตั้งฉากกับทิศทางการเรียงตัวของโครงสร้างลักษณะแผ่นดังกล่าว

การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดที่บริเวณแผ่น A และ B แสดงดังตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ไม่พบความแตกต่างทางเคมีระหว่างบริเวณ A และ B ชี้ให้เห็นว่าแผ่น A และ B คือเฟสเดียวกันแต่เรียงตัวในทิศทางต่างกัน และจากการวิเคราะห์ธาตุพบว่าสังกะสีมีปริมาณน้อยกว่า สังกะสีเริ่มต้น คือปริมาณสังกะสีลดลงจาก 20.8 wt% เหลือเพียงประมาณ 18 wt% ทั้งนี้เนื่องจาก สังกะสีมีจุดหลอมเหลวต่ำ (ประมาณ 420 °C) และเกิดเป็นเขม่าในระหว่างการหลอมโลหะทำให้มีการ สูญเสียสังกะสีเกิดขึ้นในระหว่างการหลอม



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

ตารางที่ 3.12 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบจุดแนวแผ่น A และ B

บทที่ 4 สรุปผลโครงการวิจัย

4.1 สรุปผลโครงการวิจัย

- โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al มีสีเหลืองทอง สามารถใช้เป็นโลหะต้นแบบในการผลิต เครื่องประดับทองได้
- 2. โลหะผสมจำรูประบบ Cu-Zn-Al ที่มีส่วนผสมของอินเดียม 0.5 wt% มีความสามารถในการ จำรูปสูงสุดคือสามารถคืนรูปได้จำนวน 21 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร และคืนรูปได้ 13 ครั้ง สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามชิ้นงานทุก ชิ้นไม่สามารถคืนรูปได้สมบูรณ์ โดยมีอัตราการคืนรูปสูงสุดประมาณ 66% และอัตราการคืน รูปจะลดลงตามลำดับเมื่อจำนวนครั้งในการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากโลหะที่ผ่านการทดสอบ การคืนรูปจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับความเครียดจากการถูกดัดงอ
- สำหรับโลหะผสมจำรูป Cu-Al-Mn เจือด้วยแมงกานีส พบว่า โลหะที่เจื้อแมงกานีส 2.0 wt% มีค่าการคืนรูปสูงที่สุด คือสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ 100 %
- ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็น โดยทำการรีดลดความหนา 30% พบว่ามีการเสียรูปของโครงสร้างมาเทนไซต์ ทำให้ชิ้นงานสูญเสียความสามารถในการจำรูป
- การทดสอบการต้านทานการหมองด้วยเหงื่อเทียมที่เวลาท[ั]ดสอบ 0–240 ชั่วโมง พบว่าโ้ลหะ ที่มีส่วนผสมอินเดียม 0.3 wt% มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด คือมีค่าเปลี่ยนแปลงของสีน้อย ที่สุดคือความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ส่วนผสม อื่น
- 6. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูป Cu-20.8wt%Zn-5.8wt%Al แสดงให้เห็นว่าโลหะดังกล่าวประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์เป็นหลัก โดยโลหะผสมจำรูปที่ส่วนผสมดังกล่าวนี้มีค่าความแข็งสูงสุด คือประมาณ 213 HV ในขณะที่ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจำรูปที่มีการเจือด้วยอินเดียมปริมาณ 0.1–0.5 wt% พบเฟส ผสมระหว่างมาเทนไซต์และเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสแม่ โดยมีค่าความแข็งสูงสุดที่ ประมาณ 204 HV ในโลหะที่เจือด้วยอินเดียม 0.5 wt% ทั้งนี้หลังจากโลหะผ่านการทดสอบ การจำรูปโดยทำการดัดงอและให้ความร้อน ค่าความแข็งของโลหะในทุกเฟสจะเพิ่มขึ้นทำให้ โลหะดัดงอได้ยาก และส่งผลต่อการสูญเสียความสามารถในการจำรูป
- การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่า มาเทนไซต์ซึ่งเป็นเฟสหลักมีส่วนผสมของ อินเดียมและอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเฟสแม่ สำหรับสังกะสีนั้นมีการกระจายตัวอยู่ ทั่วไปในปริมาณเท่ากันในทุกเฟส
- การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาเทนไซต์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นระนาบแฝดขนาดเล็กลักษณะคล้ายแผ่นเรียงตัวเป็น ชั้นๆ และพบแนวรอยเลื่อนในโครงสร้าง โดยแนวรอยเลื่อนและระนาบดังกล่าวมีการเรียงตัว ใน 2 ทิศทางต่างกัน ทำมุม 90° และ 55° กับแนวเส้นรอยต่อของระนาบแฝด ซึ่งการปรากฏ ของระนาบแฝดและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อสมบัติการจำรูปของโลหะ เนื่องจาก อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในระหว่างการดัดงอและคืนรูป

 การผลิตชิ้นงานเครื่องประดับสร้างสรรค์สามารถทำได้ โดยเครื่องประดับบริเวณที่ต้องการดัด งอต้องมีความบางไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

4.2 ผลงานอื่น ๆ

ในระยะเวลาของการรับทุนวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้มีเข้าร่วมเสนอผลงานวิชาการในการ ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติจำนวน 2 ครั้ง รายละเอียดดังนี้

- **Chanmuang, C.**, Kumnerdphonpittaya, B., Juntakool, O. and Niyomsoan, S. (2016). Microtexture of Cu-based shape memory alloys. 11th 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 2nd 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 β'-phase (martensite) in borate buffer, *Electrochimica Acta*. 107, 238– 247.
- Bujoreanu, L.G. (2008) On the influence of austenitization on the morphology of αphase 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 β 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 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.

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

ประวัตินักวิจัย

1. นักวิจัยลำดับที่หนึ่ง

นางสาว สายสมร นิยมสรวญ Miss Saisamorn Niyomsoan

Contact information:

Faculty of Gems, Burapha University, Chanthaburi campus 57 M 1 Chonpratan Rd., Ka-mong Subdistrict, Tamai district, Chanthaburi, 22170, Thailand Phone: (+66)-3931-0000 Mobile: (+66)-81-351-5097 Fax. (+66)-3931-0128 E-mail: saisamor@buu.ac.th, sniyomsoan@gmail.com

Education:

1999 – 2003	Ph.D. (Materials Science)
	Department of Metallurgical and Materials Engineering,
	Colorado School of Mines, Colorado, USA
1996 – 1999	M.Sc. (Materials Science)
	Department of Metallurgical and Materials Engineering,
	Colorado School of Mines, Colorado, USA
1991 – 1995	B.Sc. (Materials Science)
	Department of Materials Science, Chulalongkorn University,

Professional experience:

Bangkok, Thailand

•	
June – August 2016	Federal University of São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil,
	Visiting researcher
	"Synergetic Effects of Carbon Catalyst and Ball Milling on
	Hydrogen Storage Properties of Mg-Al Alloys"
September – October 2014	Instituts für Komplexe Materialien am Leibniz-Institut für
	Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden, Germany
	Visiting researcher
	"Ball milling method of Mg-Al alloys as hydrogen storage
	materials"

July 2010 – May 2011 Instituts für Komplexe Materialien am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden, Germany *Postdoc*

"Rapid solidification of Silver-rich alloys"

June 1999 – September 2003

National Institute of Standard and Technology (NIST) Boulder, Colorado, USA Guest researcher "Magnetic properties of AB2- type Hydrogen Storage materials"

Fellowships awarded:

2016	Research fellowship awarded from São Paulo Research Foundation under
	the grant 2015/23505-6 at Federal University of São Carlos, São Carlos,
	São Paulo, Brazil; June 1, 2016 to August 31, 2016.
2014	Research fellowship awarded from EMECW-Erasmus Mundus: Swap &
	Transfer program to conduct a research in the field of materials science at
	Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) Dresden,
	Germany; September 1, 2014 to October 31, 2014.
2010	Research fellowship awarded from EMECW-Erasmus Mundus: Bridging the
	Gap Project L12 to conduct postgraduate research in the field of
	materials science at Instituts für Komplexe Materialien am Leibniz-Institut
	für Festkörper- und Werkstoffforschung; July 3, 2010 to May 3, 2011.
2007	Fellowship awarded from Santa Fe Symposium to attend the Santa Fe
	Symposium 2007: a premier conference for jewelry manufacturing
	technology, Albuquerque, New Mexico, USA; May 20 – 23, 2007.
1996 – 2003	Scholarship awarded from the Royal Thai Government to pursue graduate
	study at Colorado School of Mines, Colorado, USA; 1996 – 2003.

Articles in peer-reviewed journals:

Niyomsoan, S., Gargarella, P., Chomsaeng, N, Termsuksawad, P., Kühn, U., & Eckert, J. (2015). Phase Separation in Rapid Solidified Ag-rich Ag-Cu-Zr alloys. *Mat. Res. vol.18 (supl.1),* 120-126, doi:10.1590/1516-1439.317614

Niyomsoan, S., Gargarella, P., Stoica, M., Khoshkoo, M. S., Kühn, U., & Eckert, J. (2013). Phase formation in rapid solidified Ag–Y alloys. *Journal of Applied Physics*, 113, 104308. doi: 10.1063/1.4794806

- Niyomsoan, S., Termsuksawad, P., Goldfarb, R.B., Olson, D.L., Mishra, B., Kaydanov, V., & Gavra, Z. (2008). Hydrogenation of Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_xFe_{2-x} Intermetallic Compounds: Free Electron Model for Magnetic Susceptibility and Thermoelectric Power. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 27, 1109-1116.
- Termsuksawad, P., **Niyomsoan, S.**, Mishra, B., Olson, D.L., Gavra, Z., & Kaydanov, V. (2005). Prediction of hydrogen absorption behavior in AB₅ hydrogen storage alloys by electronic techniques. *Materials Science and Engineering B*, 117, 1, 45-51.
- Niyomsoan, S., Termsuksawad, P., Olson, D.L., Mishra, B., Kaydanov, V., & Gavra, Z. (2005). The relationship between the thermoelectric power and phase structure in AB₂ hydrogen storage materials. *Materials Science and Engineering A*, 391, 1-2, 264-271.
- Termsuksawad, P., **Niyomsoan, S.**, Goldfarb, R.B., Olson, D.L., Mishra, B., Gavra, Z., & Kaydanov, V. (2004). Measurement of Hydrogen in Alloys by Magnetic and Electronic Techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 373, 1-2, 86-95.
- Termsuksawad, P., Niyomsoan, S., Mishra, B., Goldfarb, R.B., Olson, D.L., & Gavra, Z.
 (2002). Measurement of Hydrogen by Magnetic and Electronic Techniques in Metallic
 Materials. 201st Electrochemical Society Meeting 2002. PA: Philadelphia
- Niyomsoan, S., Grant, W., Olson, D.L., & Mishra, B. (2002). Variation of Color in Titanium and Zirconium Nitride Decoration Thin Films. *Thin Solid Films*, 415, 1, 187-194.

Conference presentations:

- Niyomsoan, S., Chomsaeng, C., Intarasiri, S. & Boonyawan, D. (2016). Surface protective thin film on semi-precious gemstones by plasma-enhanced atomic layer (PE-ALD). Proceedings of Burapha University International Conference 2016, July 28 - July 29, 2016. Pattaya: Burapha University.
- Chanmuang, C., Juntakool, O., Kumnerdponpittaya, B., Niyomsoan, S. & Chomsaeng, N. (2014). The Microstructures and Bending Test of Cu-based Shape Memory Alloy for Jewelry Application, Proceedings of The 4th International Gem and Jewelry Conference 2014 (pp. 317-320). Chiang Mai: The Gem and Jewelry Institute of Thailand.
- Niyomsoan, S., Mattipong, R., **Chanmuang, C.**, & Chomsaeng, N. (2014). Jewelry casting of Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Proceedings of Burapha University International Conference 2014* (pp.580 - 586). Pattaya: Burapha University.
- Niyomsoan, S., & Gargarella, P. (2012). Rapid solidification for in-situ composite of silver alloys. *Proceedings of The 6th Thailand Metallurgy Conference: Metallurgy towards sustainable development 2012*, (pp. 11). Chiang Mai: Chiang Mai University.

- Niyomsoan, S., Prangsri-arron, S., & Viravathana, P. (2012). Dispersion of CuO/SiO₂ Nanocomposites by Microwave and Conventional Drying Processes. *Proceedings of Burapha University International Conference 2012* (pp. 363-367). Pattaya: Burapha University.
- Klumsomboon, A., Niyomsoan, S., Chaiyakun, S., & Chomsaeng, N. (2012). Aluminium
 Oxide Coating on Silver Alloy by DC Magnetron Sputtering [Abstract]. *Proceedings of the 29th MST Annual Conference, January 30,- February 1, 2012* (pp. 151-152).
 Cha-am: The Microscopy Society of Thailand.
- Promsri, C., Termsuksawad, P., & **Niyomsoan, S.** (2011). Effects of Powder Loading and Binder Mixture on Low-Pressure Injection Molding of Silver Clay. *International Conference on Materials Processing Technology 2011* (pp. 45-51). Thailand: Phuket.
- Niyomsoan, S., Laphasampan, P., Sricum, T., Chotikaphukkana, K., Witit-anun, N. (2016). Alumina Thin Film Coating by DC Magnetron Sputtering, *the* 11th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC11), May 23-27, 2016. Phuket; Thailand.
- Chanmuang, C., Kumnerdphonpittaya, B., Juntakool, O., Ponsantia, N. & Niyomsoan, S. (2016). Microtexture of Cu-based Shape Memory Alloys, the 11th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC11), May 23-27, 2016. Phuket; Thailand.
- Niyomsoan, S., Wanthanachaisaeng, B., Intarasiri, S. & Boonyawan, D. (2015). Al₂O₃ thin film on semiprecious gemstones by Plasma enhanced atomic layer deposition (PE-ALD). The 19th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB-19). Chiang Mai; Chiang Mai University.
- Arunrat, N., Niyomsoan, S., Wanthanachaisaeng, B., Intarasiri, S. & Boonyawan, D. (2015).
 Surface Protection on Semi-precious Gemstone by PE-ALD of Alumina Thin Film, *The* 41st Congress on Science and Technology of Thailand (STT41), Nakhonratchasima:
 Suranaree University of Technology.
- Niyomsoan, S., Gargarella, P., Chomsaeng, N., Termsuksawad, P., Kühn, U. & Eckert, J. (2014). Phase Separation in Rapid Solidified Ag-rich Ag-Cu-Zr alloys, The RQ15 Conference on Rapidly Quenched & Metastable Materials 2014. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
- Niyomsoan, S., Mattipong, R., Chanmuang, C., & Chomsaeng, N. (2014). Jewelry casting of Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Burapha University International Conference 2014*. Pattaya: Burapha University.

2. นักวิจัยลำดับที่สอง

นางสาว ชุติมันต์ จันทร์เมือง Miss Chutimun Chanmuang

Contact information:

Institut für Mineralogie und Kristallographie Phone: +43-1-4277-53281 Universität Wien Fax: +43-1-4277-9532 Althanstr. 14, 1090 Wien, Austria E-mail: chutimun.chanmuang@univie.ac.at

Education:

Ph.D. (Materials Science): Department of Physics, Chiang Mai University, Thailand, 2008.M.Sc. (Materials Science): Department of Physics, Chiang Mai University, Thailand, 2003.B.Sc. (Materials Science - Gemological Technology): Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand, 2000.

Professional Positions:

10/2015- present	Researcher (Senior PostDoc): Institut für Mineralogie und
	Kristallographie, Universität Wien
01/2012- 07/2015	Assistant President of Burapha Universty, Chanthaburi Campus,
	Thailand
05/2014- 09/2015	Assistant Professor (Materials Science): Faculty of Gems, Burapha
	University, Chanthaburi Campus, Thailand
10/2007- 04/2014	Lecturer (Materials Science): Faculty of Gems, Burapha University,
	Chanthaburi Campus, Thailand

Articles in peer-reviewed journals:

- Nasdala, L., Corfu, F., Valley, J.W., Spicuzza, M.J., Wu, F.-Y., Li, Q.-L., Yang, Y.-H., Fisher, C., Münker, C., Kennedy, A.K., Reiners, P.W., Kronz, A., Wiedenbeck, M., Wirth, R.,
 Chanmuang, C., Zeug, M., Váczi, T., Norberg, N., Häger, T., Kröner, A. and Hofmeister, W. (2016): Zircon M127 a homogeneous reference material for SIMS U–Pb geochronology combined with hafnium-, oxygen- and, potentially, lithium-isotope analysis. Geostandards and Geoanalytical Research (published online; doi:10.1111/ggr.12123).
- Wierzbicka-Wieczorek, M., Kolitsch, U., Panczer, G., Giester, G. and **Chanmuang, C.**: Crystal structures and photoluminescence properties of two novel sorosilicates with

an unprecedented ratio of di- and trisilicate groups: Ba2Ho10(Si2O7)3(Si3O10)2 and isotypic Ba2Er10(Si2O7)3(Si3O10)2. Journal of Luminescence (submitted; Journal of Solid State Chemistry).

- Roszjar, J., Moser, D.E., Hyde, B.C., **Chanmuang, C.** and Tait, K.T.: Comparing chemical and structural microstructures of early Solar System igneous zircon from 4 Vesta, Mars and the Earth. American Geophysical Union: Geophysical Monograph Series, Wiley Blackwell (submitted; American Geophysical Union: Geophysical Monograph Series, Wiley Blackwell).
- **Chanmuang, C.**, Kongmuang, W., Pearce, J.T.H. and Chairuangsri, T. (2012): Influence of casting techniques on hardness, tarnish behavior and microstructure of Ag-Cu-Zn-Si sterling silver jewelry alloys. Journal of Metals, Materials and Minerals, 22(2), 19-26.
- Kongmuang, W., Chairuangsri, T. and **Chanmuang, C.** (2012): Twin-jet electropolishing of cast sterling silver alloys using perchloric acid and potassium cyanide solutions. Journal of Metals, Materials and Minerals, 22(2), 97-104.
- **Chanmuang, C.**, Naksata, M., Chairuangsri, T., Jain H. and Lyman, C.E. (2008): Microscopy and strength of borosilicate glass-to-Kovar alloy joints, Materials Science and Engineering A, 474, 218-224.
- **Chanmuang, C.**, Jaimasith, M., Chairuangsri, T., Jain H. and Lyman C.E. (2006): Microstructure study of the interface between Fe-Ni-Co alloy and borosilicate glass. Scanning, 28(2), 83-84.
- Piyavit, W., **Chanmuang, C.**, Jaimasit, M., Thiemsorn, W., Puyusuk, A., Naksata, M. and Chairuangsri, T. (2006): Adhesion of borosilicate glass and Fe-Ni-Co alloy joined by direct fusion. Chiang Mai Journal of Science, 33(2), 191-202.

Articles in process:

- Piyavit, W. and **Chanmuang, C.**: Influence of plastic deformation on precipitation behaviors in CuAgZr alloy. Physics Procedia (submitted).
- **Chanmuang, C.**, Kongmuang, W., Klotz, U., Alexander, H.W., Kurata, H., Matsuda, K. and Chairuangsri, T.: HRTEM and HAADF-STEM of precipitates at peak-ageing in cast Ag-Cu-Pd sterling silver. Journal of Alloys and Compounds (in preparation; to be submitted in 2016).
- Wierzbicka-Wieczorek, M., Kolitsch, U., Panczer, G., Giester, G. and **Chanmuang, C.**: Crystal structures and photoluminescence properties of two novel sorosilicates with an unprecedented ratio of di- and trisilicate groups: Ba2Ho10(Si2O7)3(Si3O10)2 and isotypic Ba2Er10(Si2O7)3(Si3O10)2. Journal of Luminescence (in preparation; to be submitted in 2016).

- Roszjar, J., Moser, D.E., Hyde, B.C., **Chanmuang, C.** and Tait, K.T.: Comparing chemical and structural microstructures of early Solar System igneous zircon from 4 Vesta, Mars and the Earth. American Geophysical Union: Geophysical Monograph Series, Wiley Blackwell (in preparation; to be submitted in 2016).
- Nasdala, L., Akhmadaliev, S., Artač, A., **Chanmuang, C.**, Habler, G. and Lenz, C.: Irradiation effects in zircon and monazite–(Ce): Raman and photoluminescence study of Au-irradiated FIB foils. American Mineralogist (in preparation; to be submitted in 2016).

Conference presentations (since 2012):

- **Chanmuang, C.**, Habler, G., Lenz, C., Nasdala, L. and Váczi, T. (2016): Quantification of radiation effects in zircon: Focused-ion beam preparation of thin lamellae for ionirradiation experiments. 2nd European Mineralogical Conference, Rimini, Italy, September, 2016 (accepted).
- Nasdala, L., Blaimauer, D., Chanmuang, C., Corfu, F., Lengauer, C.L., Ruschel, K., Škoda,
 R., Wirth, R., Zeug, M. and Zoysa, E.G. (2016): Ekanite (Ca2ThSi8O20) from Sri Lanka:
 Concordant U–Th–Pb isotope system in spite of metamictization. New Minerals and
 Mineralogy in the 21st Century, Intl. Symposium, Jachymov, Czech Republic,
 September, 2016 (accepted).
- Roszjar, J., Moser, D.E., Hyde, B.C., **Chanmuang, C.**, Tait, K. and Nasdala, L. (2016): Comparison of chemical zoning of eucrite and Martian micor-zircon. The Meteoritical Society 79th Annual Meeting, Berlin, Germany, August, 2016 (accepted).
- **Chanmuang, C.**, Kumnerdphonpittaya, B., Juntakool, O. and Niyomsoan, S. (2016): Microtexture of Cu-based shape memory alloys. 11th Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, May, 2016. Program and Abstract, pp. 230.
- Chomsaeng, N., Chumrod, T., Imurai, S., Churmjitapirom, P. and **Chanmuang, C.** (2016): Microstructure and hardness of Ag alloys for invisible-setting Jewelry. 11th Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, May, 2016. Program and Abstract, pp. 231.
- Nasdala, L., Akhmadaliev, S., Artač, A., **Chanmuang, C.**, Habler, G. and Lenz, C. (2016): Raman study of ion-irradiated FIB foils of zircon (ZrSiO4). 11th Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, May, 2016. Program and Abstract, pp. 240.
- Piyawit, W. and **Chanmuang, C.** (2016): Influence of plastic deformation on precipitation behaviors in CuAgZr alloy. E-MRS: European Materials Research Society, Spring Meeting, May, 2016. Lille, France. Program and Abstract, Session P – ref. 18.
- **Chanmuang, C.**, Juntakool, O., Kumnerdponpittaya, B., Niyomsoan, S. and Chomsaeng, N. (2015): The Microstructures and bending test of Cu-based shape memory alloy for
jewelry application. 4th International Gem and Jewelry Conference, Chiang Mai, Thailand, December, 2015. Proceedings, pp. 317-320.

- Nasdala, L., Chanmuang, C., Häger, T., Hofmeister, W., Kennedy, A.K., Reiners, P.W., Váczi, T., Valley, J.W., Wanthanachaisaeng, B., Wu, F., Zeug, M. and Zoysa, E.G. (2015): The scientific importance of gem zircon as analytical reference materials. 34th International Gemological Conference, Vilnius, Lithuania, August, 2015. Proceedings, pp. 128–131.
- Singto, S., Wanthanachaisaeng, B. and **Chanmuang, C.** (2015): An investigation of natural opal Ethiopia, Madagascar and Australia. 8th Annual Microscopy Conference and 32nd Annual Conference and General Meeting of the Microscopy Society of Thailand, January, 2015. Nakhon Pathom, Thailand. Proceedings, pp. 317.
- Setthakorn, S., Charikun, A. and **Chanmuang, C.** (2014): Microstructure and appearance of shape memory alloys for jewelry. 31st Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, January, 2014. Proceedings, pp. 124.
- Kodtip, N., Mathangkul, P., Bunnag, N., Chomsaeng, N. and Chanmuang, C. (2013): Stone-in-place jewelry casting: influence of sprue design on the change of sapphire color.
 30th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Chanthaburi, Thailand, January, 2013. Proceedings, pp. 151.
- Talubthong, S., Chomsaeng, N. and **Chanmuang, C.** (2013): Improvement of Ag-Cu-Ge jewelry alloy by age-hardening. 30th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Chanthaburi, Thailand, January, 2013. Proceedings, pp. 152.
- Wanthanachaisaeng, B., Bunnag, N., Sutthirat, C., Atichat, W., Ounorn, P., Sripoonjan T. and **Chanmuang, C.** (2012): Influence of Be to phase change on the melted surface of high temperature-heated sapphire. 3rd International Gem and Jewelry Conference (GIT 2012), Bangkok, Thailand, December, 2012. Proceedings, pp. 217-219.
- Pongsawad, W. and **Chanmuang, C.** (2012): Cloisonnè enamel technique on gold-like alloy. Burapha University International Conference 2012, Chonburi, Thailand, July, 2012. Proceedings, pp. 121.
- Kongmuang, W., Chairuangsri, T. and **Chanmuang, C.** (2012): Effects of electrolytes and voltage in twin-jet electropolishing of 935 silver alloys containing Zn and Si. 29th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Phetchaburi, Thailand, January, 2012. Proceedings, pp. 199-200.
- Kongmuang, W., Chairuangsri, T., Pearce, J.T.H. and **Chanmuang, C.** (2012): Transmission electron microscope of Ag-3.5wt%Cu-0.93wt%Pd alloy. 5th Thailand Metallurgy

Conference: Metallurgical Research for Thailand Development, Bangkok, Thailand, January, 2012. Proceedings, pp. 91.

Conference awards:

- Micrograph Contest Award, 1st prize (Materials Science TEM) and Micrograph Contest Award, 3rd prize (Materials Science – light microscopy): 31st Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, January, 2014.
- Best poster presentation (Materials Science) and Micrograph Contest Award, 3rd prize (Materials Science – TEM): 30th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Chanthaburi, Thailand, January, 2013.

Best poster presentation (Materials Science): Third Thailand Metallurgy Conference: Metallurgical Research for Thailand Development, Bangkok, Thailand, October, 2009.

Micrograph Contest Award, 1st prize (Materials Science – TEM): 24th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, Bangkok, Thailand, February, 2007.