

การปรับปรุงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมโลหะผสม อะลูมิเนียม-สแกนเดียม และกระบวนการบ่มแข็ง

ปวิศร์ ชัยโฉม¹ สิริพร โรจนนันต์² และ ไพบุลย์ ช่างทอง³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลโดยกระบวนการเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมและกระบวนการบ่มแข็ง การทดลองเริ่มจากการเตรียมอินกอตที่มีส่วนผสมทางเคมีของ 93Ag-6Cu-1(AI-2Sc) จากโลหะเงินบริสุทธิ์ โลหะทองแดงบริสุทธิ์ และโลหะผสมของอะลูมิเนียม-สแกนเดียมในรูปของมาสเตอร์อัลลอย วัดความแข็งจุลภาคและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอินกอต หลังจากนั้นนำอินกอตไปรีดขึ้นรูปเย็นร้อยละ 80 แล้วนำไปผ่านกระบวนการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ตามด้วยการบ่มแข็งในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาค วัดความแข็งจุลภาค และทดสอบแรงดึง ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างงานหล่อเป็นเดนไดรต์ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และบริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เป็นเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าความแข็งเฉลี่ย 80 ± 5 วิกเกอร์ สมบัติทางกลขึ้นกับอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการบ่มแข็ง สรุปว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 180 ± 5 วิกเกอร์ ให้ค่าความต้านแรงดึงจุดสูงสุดเฉลี่ย และค่าความต้านแรงดึงจุดครากเฉลี่ย มีค่า 565 ± 5 และ 517 ± 5 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

คำสำคัญ : โลหะเงินสเตอร์ลิง / การเติมธาตุผสม / การบ่มแข็ง / โลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียม

¹ นักศึกษาปริญญาโท สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

³ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

Improvement of Mechanical Properties on Sterling Silver by Al-Sc Master Alloy Addition and Age Hardening Process

Pavarith Chaishom¹, Siriporn Rojananan², and Piboon Choungthong³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

The purpose of this work is to study the improvement of mechanical properties on sterling silver by aluminium-scandium master alloy addition coupled with age hardening process. The ingots of 93Ag-6Cu-1(Al-2Sc) alloy were prepared from pure elements of Ag, Cu and master alloy of Al-2Sc. Microstructure and microhardness of ingots were investigated. After that ingots were cold-rolled with 80% deformation, subsequently; age hardening process was performed by solution treatment at the temperature of 760 °C and aging at the temperatures of 250-350 °C. Microstructure, microhardness and tensile property of aged samples were studied. The result showed that the as-cast microstructure was dendrite which consisted of Ag-rich phase and the Cu-rich phase presented at the interdendritic dendrite with the averaged hardness of 80 ± 5 HV. The microstructure of aged samples showed equiaxed grains together with twin lines. The hardness of aged samples depended on the aging temperatures. It could be concluded that the averaged hardness was maximum by aging at 300 °C for 60 minutes, showed 180 ± 5 HV. The averaged maximum tensile strength and yield strength exhibited 565 ± 5 and 517 ± 5 MPa, respectively.

Keywords : Sterling Silver / Alloying Element / Age Hardening / Aluminium Scandium Master Alloy

¹ Graduate Student, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

² Assistant Professor, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

³ Lecturer, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering.

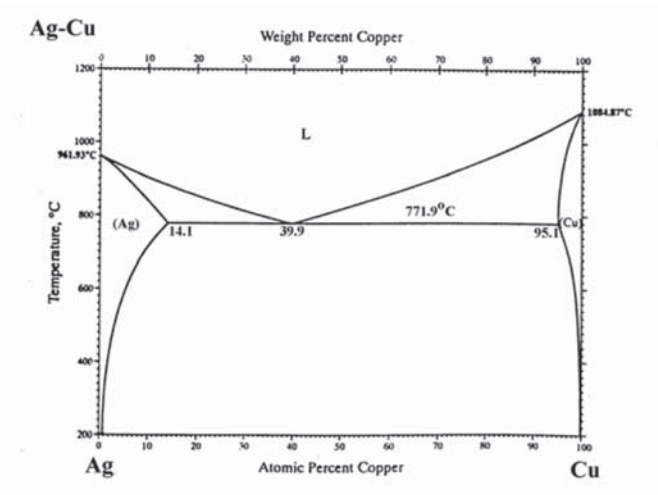
1. บทนำ

โลหะเงินบริสุทธิ์ไม่นิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องประดับและผลิตภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งและความแข็งแรงต่ำ จึงทำให้เกิดรอยขีดข่วนและบิดเบี้ยวเสียรูปทรงได้ง่าย จึงมีขีดจำกัดในการใช้งาน ทำให้มีความจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติทางกลให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการขึ้นรูปเย็น (Cold working) วิธีการเติมธาตุผสม (Alloying elements) และวิธีการใช้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส (Precipitation hardening) ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็ง และความแข็งแรงให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิงได้

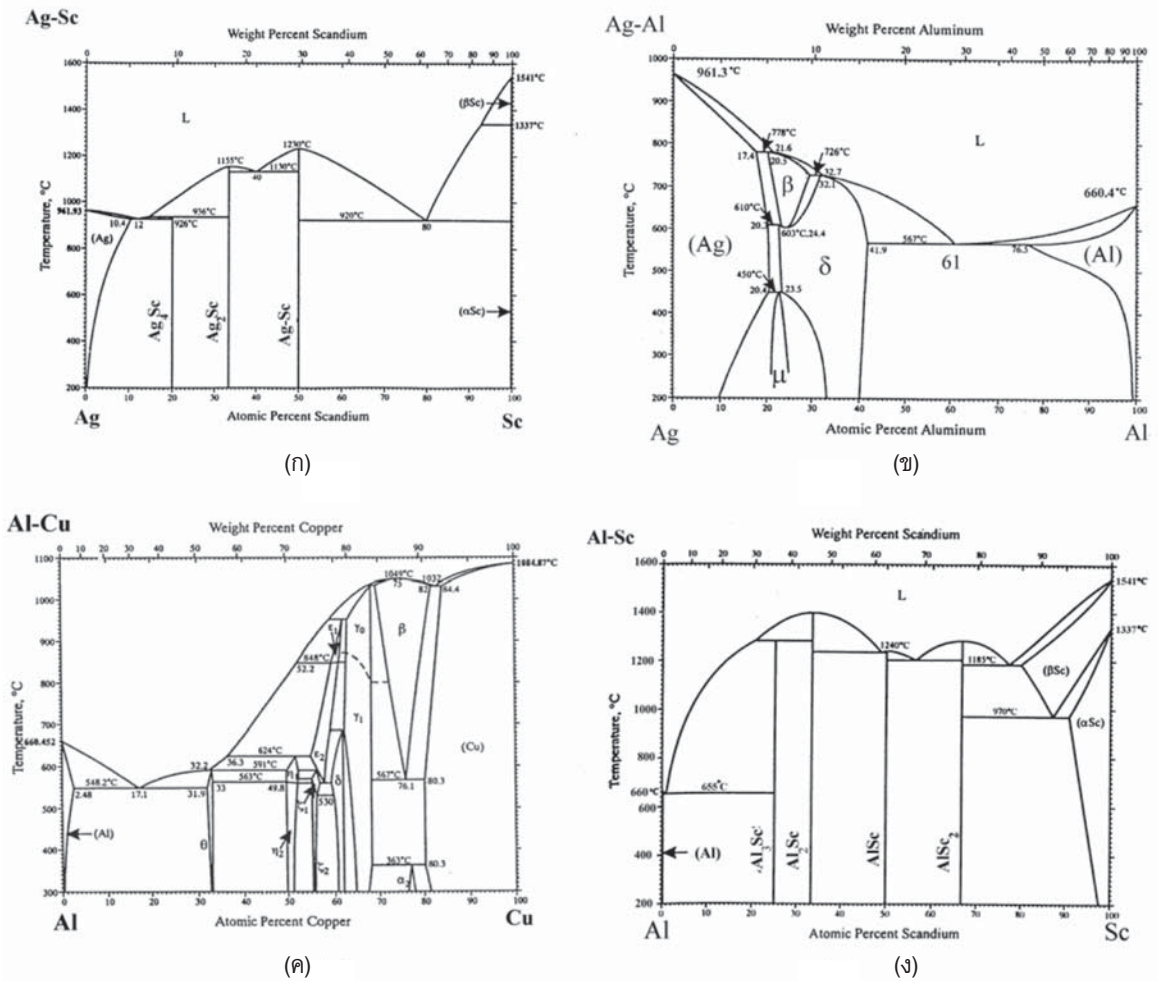
เงินสเตอร์ลิง 925 หมายถึงโลหะเงินผสมที่ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 92.5 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นธาตุผสมอื่นๆ ที่ต้องการปรับปรุงสมบัติตามต้องการ จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเติมธาตุผสม การเติมทองแดงบริสุทธิ์ และทองแดงผสมซิลิกอน [1] มีผลทำให้ค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวลดลง การเติมธาตุแมงกานีสปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก [2] ทำให้ความแข็งมีค่าลดลงเหลือ 52 วิกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ไม่เติมธาตุแมงกานีสซึ่งมีค่าความแข็งประมาณ 67 วิกเกอร์ แต่ธาตุแมงกานีสส่งผลต่อการเพิ่มความต้านทานความหมอง เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 1.3-1.6 การเติมซิลิกอน [3] ช่วยเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรง และความต้านทานการหมองได้ หากเติมเกินกว่าร้อยละ 0.20 จะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย (Network) ต่อเนื่องทำให้เปราะ การเติมติบุกไม่เกินร้อยละ 1 สามารถช่วยเพิ่มความแข็งให้กับเงินสเตอร์ลิงได้โดยการบ่มแข็ง [4, 5] แต่สภาวะของกรรมวิธีการบ่มถูกรายงานไว้แตกต่างกันขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบละลายเฟส (Solution treatment) และการบ่มแข็ง (Aging)

Bühner [6] รายงานว่าการบ่มแข็งเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีส่วนผสม 92.5Ag-7.5Cu หลังผ่านการรีดเย็นลดขนาดร้อยละ 66 เมื่อใช้อุณหภูมิอบละลายเฟส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ความแข็ง 140 วิกเกอร์ หากใช้อุณหภูมิอบละลายเฟสต่ำกว่า 730 องศาเซลเซียส จะไม่สามารถละลายเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักได้หมด ทำให้หลังการบ่มแล้วไม่ได้ความแข็งสูงสุด ส่วนการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเกรนโตเกินไป ทำให้ได้สมบัติไม่ดัดนัก นอกจากนี้จากข้อมูลในแผนภาพสมดุลเฟสสองธาตุ (Binary Phase Diagram) ของเงินกับทองแดง [7] ดังรูปที่ 1 และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 8] พบว่าอุณหภูมิการอบละลายเฟสที่ 760 องศาเซลเซียส สามารถละลายเฟสได้ทั้งหมด จึงเป็นที่มาในการเลือกใช้อุณหภูมิการอบละลายเฟสในการทดลองนี้เป็น 760 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาแผนภาพสมดุลเฟสของเงินกับสแกนเดียม เงินกับอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมกับทองแดง อะลูมิเนียมกับสแกนเดียม แสดงในรูปที่ 2 (ก)-(ง) ตามลำดับ [7] บอกได้ว่าธาตุสแกนเดียมสามารถละลายในเงินและสามารถบ่มแข็งได้ จึงเป็นธาตุที่สนใจ แต่เนื่องการจัดหาสแกนเดียมบริสุทธิ์ทำได้ยาก ปัจจุบันธาตุสแกนเดียมนิยมเติมเป็นโลหะผสมกับอะลูมิเนียม อยู่ในรูปของมาสเตอร์อัลลอย เพื่อใช้ปรับปรุงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม [9] และเมื่อพิจารณาแผนภาพสมดุลเฟสของเงินกับอะลูมิเนียมพบว่าอะลูมิเนียมสามารถละลายในเงินได้ ถ้านำโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมหลอมเข้ากับเงินสเตอร์ลิงจะเป็นผลดีต่อการเพิ่มความแข็ง ปัจจุบันไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมโลหะผสมของอะลูมิเนียม-สแกนเดียมในโลหะเงินสเตอร์ลิง จึงเป็นที่มาในการศึกษาเพื่อให้ได้องค์ความรู้ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง โดยการเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มแข็ง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน



รูปที่ 1 แผนภาพสมดุลเฟสของสองธาตุโลหะเงินกับทองแดง [7]



รูปที่ 2 แผนภาพสมดุลเฟสของสองธาตุ (ก) โลหะเงินกับสแกนเดียม (ข) โลหะเงินกับอะลูมิเนียม (ค) อะลูมิเนียมกับทองแดง (ง) อะลูมิเนียมกับสแกนเดียม [7]

2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงมีส่วนผสมทางเคมีของ 93Ag-6Cu-1(AI-2Sc) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก วัสดุดิบที่ใช้ประกอบด้วย โลหะเงินเม็ดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 โลหะทองแดงเม็ดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.50 และโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียม (AI-2Sc) เป็นก้อนในรูปมาสเตอร์อัลลอย ซึ่งมีส่วนผสมของสแกนเดียมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลอมด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้เบ้าหลอมทำจากกราไฟต์ แล้วหล่อเป็นก้อนอินกอตที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้างด้านละ 10 มม. นำไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma)

จากนั้นนำอินกอตไปรีดเย็นขึ้นรูปร้อยละ 80 โดยรีดลดขนาดได้ความหนาสุดท้ายมีค่า 2 มม. นำชิ้นงานไปทำการอบการบ่มแข็ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน ขั้นตอนแรกทำการอบละลายเฟส ใช้อุณหภูมิคงที่ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มน้ำเย็นทันที ขั้นตอนต่อมา นำชิ้นงานไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิ 250, 275, 300, 325 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

ต่อมาทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็งจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ ชิ้นงานหลังการอบละลายเฟส ชิ้นงานที่ได้จากการรีด และชิ้นงานหลังการบ่มแข็ง ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์แสง รุ่น Olympus BH และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL-5800 รวมทั้งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเฟสต่างๆ ด้วยเทคนิค EDS สารละลายกรดที่ใช้กัดผิวชิ้นงานประกอบด้วย CrO_3 1 กรัม H_2SO_4 1 มม. และ H_2O 500 มม. การทดสอบความแข็งจุลภาคใช้สเกลวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) หัวกดเพชรรูปปิรามิด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E38 ใช้เครื่องวัดความแข็งจุลภาคผลิตโดยบริษัท Future Tech รุ่น FM 7000e ใช้น้ำหนักกด 100 ก. เวลากด 15 วินาที ในการทดลองวัดความแข็งได้ทดสอบจำนวน 10 จุด แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย นอกจากนี้ทำการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งทั้งหมด ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M ใช้เครื่องทดสอบแรงดึงชนิด Universal

Testing Machine ซึ่งผลิตจากบริษัท LORD รุ่น LR50K ใช้ความเร็วในการทดสอบ 3 มม./นาที ทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้น แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

หลังการหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงเป็นอินกอตแล้ว ได้ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค ICP ที่ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ หมายเลขรายงานผล 0082/52 ผลการวิเคราะห์คำนวณแล้วมีส่วนผสมของ 92.8Ag-6.2Cu-1.0AI-0.0032Sc ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าแตกต่างจากส่วนผสมเริ่มต้นบ้าง ผลการทดลองจะกล่าวถึง ความแข็งจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังบ่มแข็ง ตามลำดับ

3.1 ความแข็งจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ

ผลการวัดความแข็งจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่เติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมหล่อ มีค่าเฉลี่ย 80 ± 5 วิกเกอร์ จะเห็นว่ามีความแข็งสูงกว่าเงินสเตอร์ลิง 925 (ที่ไม่เติมโลหะอื่น) ซึ่งมีส่วนผสมของ 92.5Ag-7.5Cu มีความแข็ง 67 วิกเกอร์ [2] โครงสร้างงานหล่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 3 เป็นโครงสร้างกิ่งไม้ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเดนไดรต์ (Dendrite) บริเวณช่องว่างระหว่างแขนของเดนไดรต์เกิดเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก (Cu-rich Phase) มีรูปร่างเป็นเกล็ด เป็นเส้นยาว มีขนาดความกว้างประมาณ 1-3 ไมครอน ความยาวแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ทั้ง 3 บริเวณแสดงในตารางที่ 1 พบว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นบริเวณเดนไดรต์ เห็นเป็นสีเทาและสีขาว ตามลำดับ เป็นเฟสสารละลายของของแข็ง ที่ประกอบด้วยธาตุเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag-rich Phase) มีธาตุทองแดงและอะลูมิเนียมเป็นตัวถูกละลายในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่วนผสมนี้ใกล้เคียงกับส่วนผสมตั้งต้น ตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณเฟสที่เป็นเส้นยาว พบว่าเป็นเฟสที่ประกอบด้วยธาตุทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก และมีธาตุอะลูมิเนียมสูงกว่าเดนไดรต์ เนื่องจากเฟสที่เป็นเส้นยาวนี้ มีขนาดความกว้างประมาณ 1-3 ไมครอน

ดังนั้นผลการวิเคราะห์จึงเป็นไปได้ที่มีผลมาจากโครงสร้างบริเวณข้างเคียงที่มีธาตุเงินเป็นส่วนผสมหลัก ทำให้ไม่สามารถคำนวณสูตรทางเคมีได้ว่าเป็นเฟสของสารประกอบอะไรที่แน่นอน ต้องศึกษาด้วยเทคนิคอื่นๆ

เพิ่มเติม ผลการวิเคราะห์ที่ไม่พบธาตุสแกนเดียมทั้ง 3 ตำแหน่ง เนื่องจากโดยปกติแล้วมักมีความไม่สม่ำเสมอของธาตุ (Microsegregation) ในแต่ละบริเวณของเดนไดรต์ และเนื่องจากธาตุสแกนเดียมที่เติมมีปริมาณน้อย



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการหล่อ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานหล่อ

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	เงิน	ทองแดง	อะลูมิเนียม	สแกนเดียม
ตำแหน่งที่ 1 บริเวณเดนไดรต์ สีเทา	95.5	4.0	0.5	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 2 บริเวณเดนไดรต์ สีขาว	92.5	6.5	1.0	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 3 เฟสที่เป็นเส้นยาว	11.6	82.1	6.3	ไม่พบ

เมื่อนำชิ้นงานไปรีดเย็นลดขนาดความหนาของรอยละ 80 ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเกรนยาวรี (Elongated Grains) ที่พบโดยทั่วไปของโครงสร้างงานรีด ความแข็งแรงมีค่าเฉลี่ย 150 ± 5 วิกเกอร์ ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเกิด Strain Hardening ขึ้น

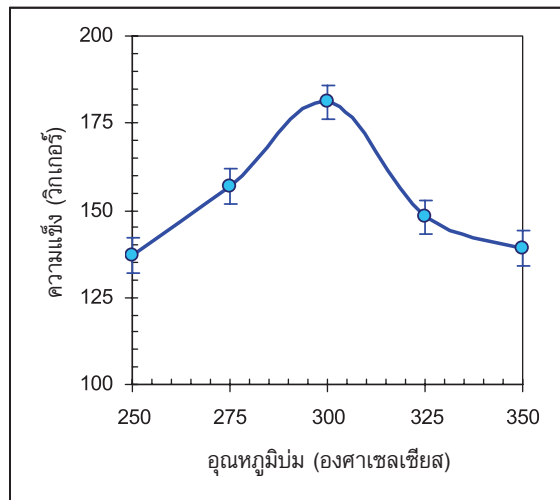
3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการบ่มแข็ง

ความแข็งแรงจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250, 275, 300, 325 และ 350 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4 พบว่าการบ่มแข็งที่

อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด มีค่า 180 ± 5 วิกเกอร์ แสดงว่าที่อุณหภูมินี้มีการตกตะกอนของอนุภาค (Precipitate particle) ที่มีขนาดปริมาณ การกระจาย ที่เหมาะสมในโครงสร้าง อนุภาคเหล่านี้ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น (โครงสร้างจุลภาคจะกล่าวในหัวข้อถัดไป)

เมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งแรงมีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ตามหลักการของกลไกการเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening Mecha-

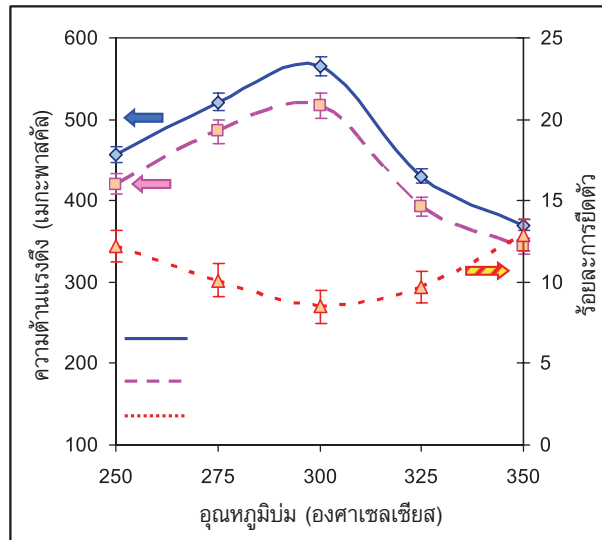
nism) [10] เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงสูญเสียความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง (Coherent) กับโครงสร้างพื้น ทำให้ความสามารถในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง จะเห็นได้ว่าการเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมปริมาณร้อยละ 1 ในเงินสเตอร์ลิง มีผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังบ่มแข็งได้สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ไม่มีการเติมธาตุอื่นผสมซึ่งมีค่าประมาณ 116-140 วิกเกอร์ [6, 8] และเมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกร้อยละ 0.3 มีค่าประมาณ 165-167 วิกเกอร์ [4, 5]



รูปที่ 4 ความแข็งแรงจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มในช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่เติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียม หลังผ่านการบ่มแข็งในช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าความต้านแรงดึงจุดสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 565 ± 5 เมกะพาสคัล และค่าความต้านแรงดึงจุดครากมีค่าเฉลี่ย 517 ± 5 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิอื่นๆ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกร้อยละ 0.3 ซึ่งมีส่วนผสมของ 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn

[5] พบว่าค่าความต้านแรงดึงจุดสูงสุดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่เติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียมนี้ มีค่าสูงกว่าค่าความต้านแรงดึงจุดสูงสุดของเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงสุด 415 ± 5 เมกะพาสคัล ส่วนค่าการยืดตัวของชิ้นงานในการทดลองนี้ หลังผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิต่างๆ ค่าการยืดตัวเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ $9 - 13 \pm 3$

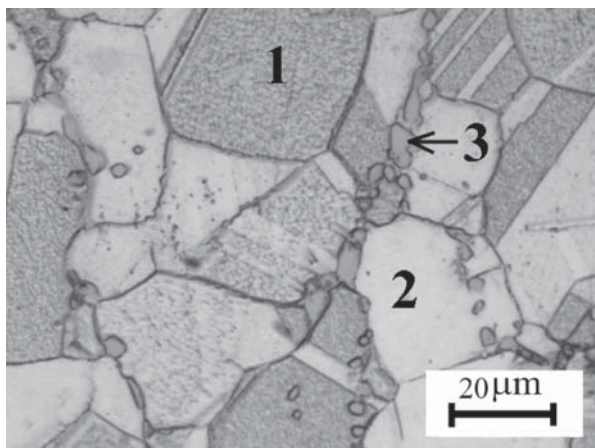


รูปที่ 5 สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังผ่านการอบแข็งในช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส

3.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบแข็ง

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการรีดเย็นรูปร้อยละ 80 แล้วนำไปทำการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ตามด้วยจุ่มน้ำเย็นทันทีเพื่อให้เกิดสารละลายของของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid Solution) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าในโครงสร้างของชิ้นงานมีลักษณะเป็นเกรนกลม ไม่พบลักษณะโครงสร้างของงานรีดที่เป็นเกรนยาวหรือหลงเหลือบางเกรนมีแถบทวินอยู่ภายใน (Twin grains) ที่เกิดจากความร้อนในการอบละลายเฟส พบเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก มีลักษณะเป็นก้อนเม็ดเกือบกลม เม็ดยาวรีขอบมน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 ไมครอน

อยู่ตามขอบเกรนบางเกรน การที่พบเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก แสดงว่าสภาวะการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งใช้กับเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม 92.5Ag-7.5Cu และ 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบละลายเฟสของเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม 92.8Ag-6.2Cu-1.0Al-0.0032Sc ที่กำลังศึกษา อาจต้องเพิ่มเวลาหรือเพิ่มอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงการเกิดเกรนโตเกินไปจากการอบละลายเฟสด้วย ควรศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการอบละลายเฟสไม่หมด และการโตเกินไปของเกรนหลังอบละลายเฟส มีผลต่อความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จากการอบแข็ง



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหลังการอบละลายเฟสด้วยเทคนิค EDS ในบริเวณต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 พบว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น ประกอบด้วยธาตุเงินเป็นส่วนผสมหลัก มีทองแดงและอะลูมิเนียมปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อย ตำแหน่งที่ 3 เป็นเฟสที่เป็นเม็ดกลมประกอบด้วยธาตุทอง

แดงเป็นส่วนผสมหลัก ที่เหลือเป็นเงินและอะลูมิเนียม เนื่องจากเม็ดกลมมีขนาดเล็ก จึงมีผลมาจากโครงสร้างพื้นเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีกับชิ้นงานหล่อ พบว่าเฟสเม็ดกลมมีส่วนผสมใกล้เคียงกับเฟสที่เป็นเส้นยาว แสดงว่าการอบละลายเฟสทำให้เฟสเส้นยาวละลายได้ไม่หมด

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายเฟส

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	เงิน	ทองแดง	อะลูมิเนียม	สแกนเดียม
ตำแหน่งที่ 1 บริเวณเดนไดรต์ สีเทา	95.7	3.7	0.6	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 2 บริเวณเดนไดรต์ สีขาว	95.1	4.0	0.9	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 3 เฟสที่เป็นเส้นยาว	10.5	80.9	8.6	ไม่พบ

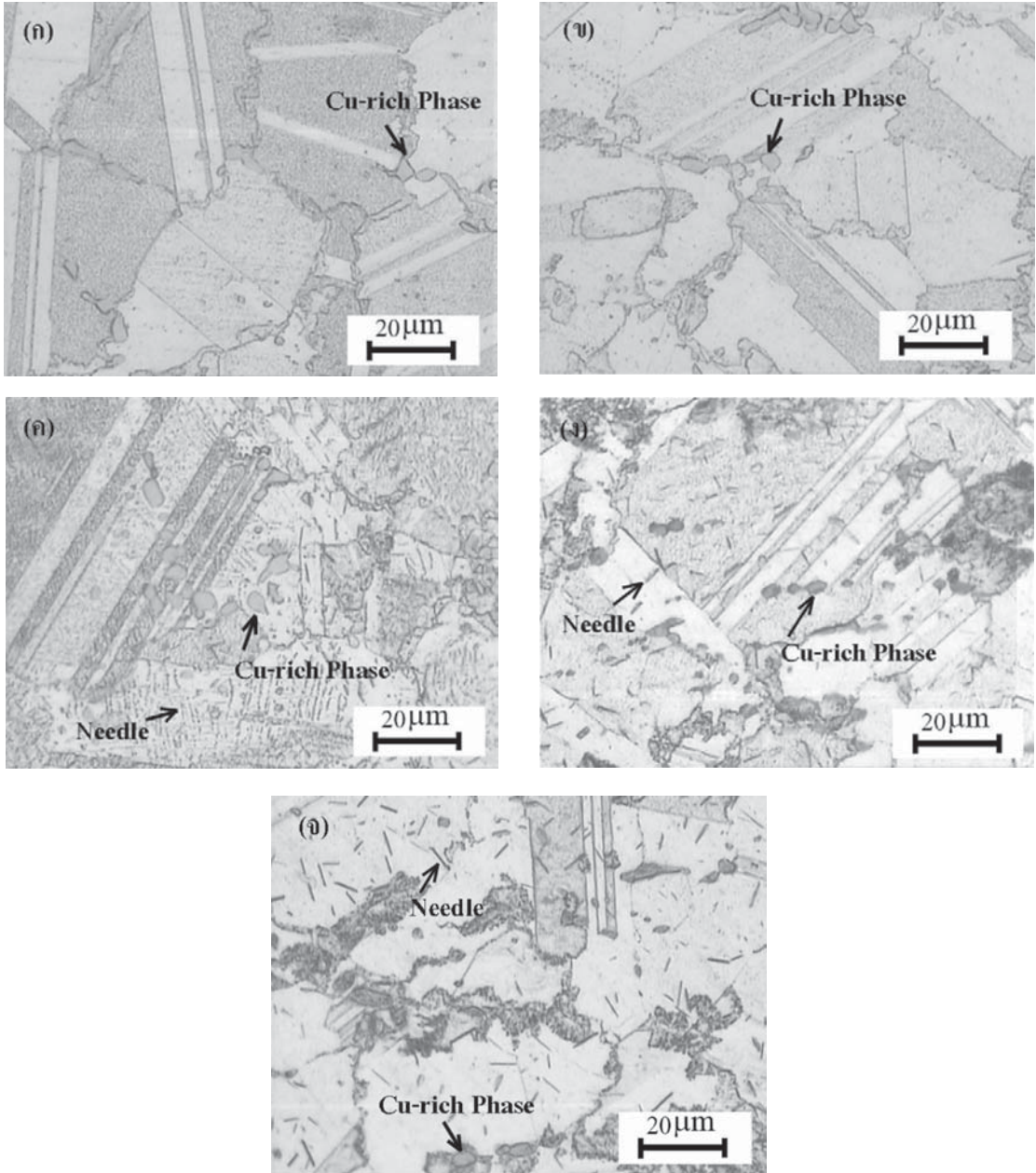
โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 250, 275, 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 7 (ก)-(จ) ตามลำดับพบว่าโครงสร้างของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 250 และ 275 องศาเซลเซียส มีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของชิ้นงานหลังการอบละลายเฟส ซึ่งประกอบด้วยเกรนค่อนข้างกลมมีเส้นทวิน พบเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักเป็นเม็ดเกือบกลมอยู่ตามขอบเกรน

สำหรับโครงสร้างของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 7 (ค) พบว่ามีเกรนค่อนข้างกลม มีเส้นทวิน และมีเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักเป็นเม็ด เหมือนกับชิ้นงานอื่นที่กล่าวมา นอกจากนี้ยังมีเฟสที่เป็นแท่งบางๆ คล้ายเข็ม (Needle) ขนาดเล็ก เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เฟสนี้มีผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

ส่วนชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส รูปที่ 7 (ง) และ (จ) ตามลำดับ พบว่า

เฟสที่เป็นแท่งรูปเข็มมีความหนาและโตขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบ Cellular Precipitation Reaction ที่บริเวณขอบเกรน โตเข้าไปในเกรนทั้งสองข้างระหว่างการบ่ม [11] จะเห็นได้ชัดเจนนที่บริเวณขอบเกรนของชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

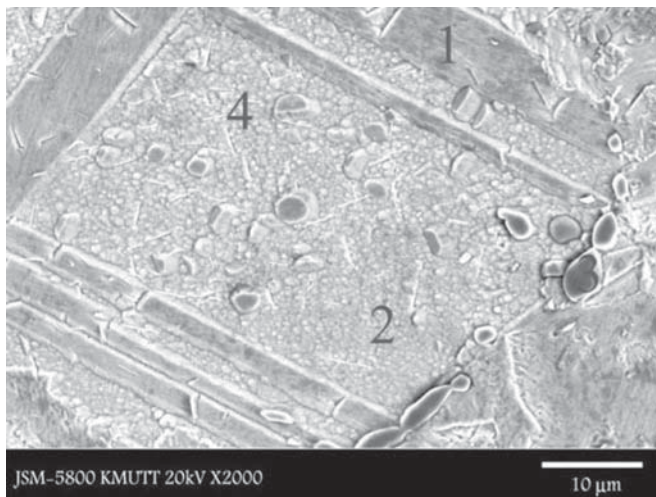
ลักษณะดังกล่าวนี้ สามารถพบได้จากโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของดีบุกหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส [4] เฟสที่เป็นแท่งรูปเข็มที่มีขนาดโตขึ้น และเฟสที่มีลักษณะเป็น Cellular Precipitate ที่ขอบเกรนทำให้ความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ (ก) 250, (ข) 275, (ค) 300, (ง) 325 และ (จ) 350 องศาเซลเซียส

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่ 300 องศาเซลเซียส และแสดงตำแหน่งของการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณพื้นเรียบ เห็นเป็นสีเทาเข้ม และตำแหน่งที่ 2 บริเวณโครงสร้างพื้นผิวขรุขระ เห็นเป็นสีเทาอ่อน มีส่วนผสมใกล้เคียงกันประกอบด้วยธาตุเงินเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนที่เหลือเป็นธาตุทองแดงและอะลูมิเนียม บริเวณเฟสที่เป็นเม็ดกลมในตำแหน่งที่ 3 ประกอบด้วยธาตุทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก ปริมาณทองแดงร้อยละ 83.6 โดยน้ำหนัก ตำแหน่งที่ 4 เฟสที่เป็นแท่งรูปเข็ม มีส่วนประกอบของ

ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 1.6 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่พบในโครงสร้างพื้น มีธาตุสแกนเดียมปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเฟสที่เป็นแท่งรูปเข็มมีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีส่วนผสมของธาตุเงินและทองแดงเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปการเติมธาตุสแกนเดียมปริมาณน้อยๆ ในอะลูมิเนียมเพื่อปรับขนาดเกรนให้เล็กลง (Grain Refinement) โดยเกิดอนุภาคขนาดเล็กของ Al_3Sc ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสในการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างกระบวนการบ่มแข็ง [9] ดังนั้นเป็นไปได้ว่าในการบ่มแข็งเงินสเตอร์ลิง แล้วเกิดอนุภาคขนาดเล็กที่เป็นสารประกอบของสแกนเดียม ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสในการเกิดเฟสที่เป็นแท่งรูปเข็ม



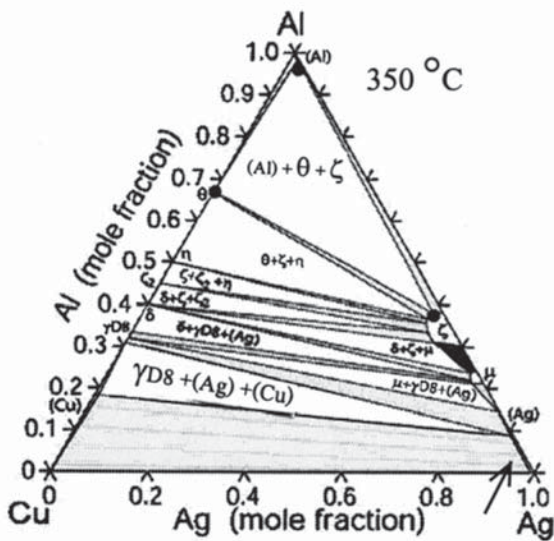
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็ง

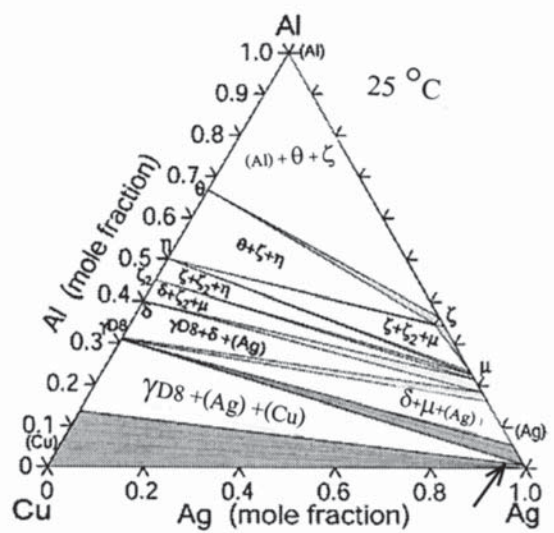
บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	เงิน	ทองแดง	อะลูมิเนียม	สแกนเดียม
ตำแหน่งที่ 1 พื้นเรียบ สีเทาเข้ม	95.6	3.8	0.6	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 2 พื้นผิวขรุขระ สีเทาอ่อน	95.2	4.2	0.6	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 3 เม็ดกลม	8.4	83.6	8.0	ไม่พบ
ตำแหน่งที่ 4 เป็นแท่งรูปเข็ม	89.6	8.7	1.6	0.1

จากผลการทดลองพบว่าเฟสที่เป็นแท่งรูปเข็ม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน การศึกษาชนิดของเฟสจากแผนภาพสมดุลเฟสระบบสองธาตุ อนุภาคที่เกิดจากการบ่มแข็งอาจเป็นสารประกอบ Ag_4Sc , μ , Al_2Cu , Al_3Sc หรือ $\gamma D8$ จากแผนภาพสมดุลเฟสระบบสามธาตุ (Ternary Phase Diagram) ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง [12] แสดงในรูปที่ 9 (ก)-(ข) ส่วนผสมที่

ศึกษาอยู่บริเวณที่มีลูกศรชี้ จะเห็นว่าเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเฟสสารละลายของของแข็งที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และเฟสสารละลายของของแข็งที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก เฟสของสารประกอบเป็นเฟส γD_8 เฟสที่เป็นแท่งนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอย่างเดียว ต้องศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงชัน หรือใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 แผนภาพสมดุลเฟสสามธาตุของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม [12]

(ก) อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4. สรุปผลการทดลอง

1. การเติมโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอยของอะลูมิเนียม-สแกนเดียมปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในเงินสเตอร์ลิง ทำให้ความแข็งแรงของงานหล่อมีค่าเฉลี่ย 80 ± 5 วิกเกอร์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ไม่เติมโลหะผสมดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค ICP พบว่ามีส่วนผสมของ $92.8Ag-6.2Cu-1.0Al-0.0032Sc$ ร้อยละโดยน้ำหนัก

2. การบ่มแข็งโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม $92.8Ag-6.2Cu-1.0Al-0.0032Sc$ ร้อยละโดยน้ำหนัก มีผลทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น ความแข็งแรงและความต้านแรงดึงจุด

สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 180 ± 5 วิกเกอร์ ให้ค่าความต้านแรงดึงจุดสูงสุดและค่าความต้านแรงดึงจุดครากมีค่าเฉลี่ย 565 ± 5 และ 517 ± 5 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

3. การอบละลายเฟสของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม $92.8Ag-6.2Cu-1.0Al-0.0032Sc$ ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ยังไม่สามารถละลายเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักได้หมด ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางกลโดยการบ่ม

แข็งให้มีค่าสูงสุด ควรใช้อุณหภูมิหรือเวลาเพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

1. สุรัตน์ วรรณศรี สมนึก วัฒนศรียกุล และ ศิริพร ดาวพิเศษ, 2547, “อิทธิพลของทองแดง-ซิลิคอนต่อสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง”, *ศาสตร์และศิลป์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับด้วยงานวิจัย*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, พี เอส พรินส์ นนทบุรี, หน้า 18-28.

2. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ ศิริรัตน์ นิสารัตนพร, 2547, “อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม”, *ศาสตร์และศิลป์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับด้วยงานวิจัย*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, พี เอส พรินส์ นนทบุรี, หน้า 51-67.

3. Nisaratanaporn, E. and Nisaratanaporn, S., 2003, “The Anti-tarnishing, Microstructure Analysis and Mechanical Properties of Sterling Silver with Silicon Addition”, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 12, No. 2, pp. 13-18.

4. เกศราพร วทัญญู สิทธิพร โรจนนันต์ และ จุลศิริ ศรีงามพ่อง, 2550, “อิทธิพลของดีบุกที่มีผลต่อมุมการคืนตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิง”, *การประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุ ครั้งที่ 4*, วันที่ 4-5 มกราคม 2550, กรุงเทพฯ, หน้า 51-58.

5. สิทธิพร โรจนนันต์ สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ เกรียงไกร แสงอำนาจเดช สุริยงค์ ช่างนิล และเอนก พานแววาว, 2551, “อิทธิพลของการอบบ่มที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะเงินผสม 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn”, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, เม.ย. - มิ.ย. 2551, หน้า 399-410.

6. Bühner, J. F., 2003, “An Update on Hardening of Sterling Silver Alloys by Heat Treatment”, *The Proceeding of the 17th Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing and Technology*, pp. 29-47.

7. ASM Handbook, 1992, Vol. 3, *Alloy Phase Diagrams*, Baker, H. Editor, ASM International, The Materials Information Society, The United States of America.

8. Colombo, S., Battaini, P., and Airoidi, G., 2007, “Precipitation Kinetics in Ag-7.5 wt.% Cu Alloy Studied by Isothermal DSC and Electrical-Resistance Measurements”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 437, pp. 107-112.

9. Kharakterova, M.L., Eskin, D.G., and Toropova, L.S., 1994, “Precipitation Hardening in Ternary Alloys of the Al-Sc-Cu and Al-Sc-Si Systems”, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 42, No. 7, pp. 2285-2290.

10. George, E.D., 2001, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, SI Metric Edition, Singapore, Kim Hup Lee Pring Co. Pte Ltd., pp. 184 - 240.

11. *Metal Handbook, Metallography, Structures and Phase Diagrams*, 8th Edition, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, Vol. 8, pp. 175-183.

12. Witusiewicz, V.T., Hecht, U., Fries S.G., and Rex, S., 2005, “The Ag-Al-Cu System II. A Thermodynamic Evaluation of the Ternary System”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 387, pp. 217-227.

