

ผลของกระบวนการตกตะกอนต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินสปริง 935



นางสาวนรรัตน์ ไชยฤกษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of precipitation process on mechanical properties of Spring Silver Alloy 935



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของกระบวนการตกตะกอนต่อสมบัติทางกลของ

โลหะผสมเงินสปริง 935

โดย

นางสาวนรรัตน์ ไชยฤกษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญรัตน์ โฉมวิวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี)

นวรรตน์ ไชยฤกษ์ : ผลของกระบวนการตกตะกอนต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินสปริง 935 (Effects of precipitation process on mechanical properties of Spring Silver Alloy 935) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 288 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของธาตุผสมและกระบวนการตกตะกอนต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการร่อนของโลหะเงินสปริง 935 โดยไม่มีการอบเนื้อเดียว ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยธาตุเงิน 93.5% ทองแดง 5.4-6.5% เบริลเลียม 0.3% ดีบุก 0.2-0.5% และอะลูมิเนียม 0.3% โดยน้ำหนัก พบว่า อะลูมิเนียมปรับปรุงความต้านทานการร่อนสมบัติความเป็นสปริง และความแข็ง โดยสมบัติทางกลอื่น ๆ ยังเหมาะสม ในขณะที่การเติมดีบุกนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลไม่มาก แต่ช่วยเพิ่มสมบัติต้านทานการร่อน การเติมธาตุดีบุกร่วมกับธาตุเบริลเลียม ทำให้เฟสเบตา (β -phase) มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีลักษณะเกือบกลมมน ส่วนการเติมธาตุอะลูมิเนียมโครงสร้างจุลภาคที่ได้ มีลักษณะคล้าย ๆ เดิม การเติมธาตุผสมส่งผลให้เกรนขนาดเล็กลง 3-6 เท่า มีขนาดประมาณ 0.5-2.0 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานระหว่างสภาพหลังหล่อกับหลังการอบบ่มของโลหะผสม AgCu0.3Al พบว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบบ่มที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิบ่ม 350 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการอบบ่มในช่วง 15-30 นาที ได้ค่าความเป็นสปริงที่สูง ประมาณ 2.6-3.6 MPa และค่าความเค้น ณ จุดคราก 232-310 MPa เหมาะสำหรับการผลิตเป็นชิ้นส่วนเงินสปริง มีสมบัติทางกลอื่น ๆ เหมาะสม สีผิวของชิ้นงานมีความสวยงาม ตรงความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ในทางตรงกันข้าม โลหะผสม AgCu ซึ่งถึงแม้ว่าจะให้ค่าความเป็นสปริงสูงที่สุดในสภาวะหลังหล่อ และหลังการอบบ่ม แต่มีปัญหาการแตกเปราะหลังหล่อ และการเกิดฝ้าฝงลึก

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570260121 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: SILVER STERLING 935 / SPRING PROPERTY / TARNISH RESISTANCE /
PRECIPITATION HARDENING / AGING CONDITION

NAVARAT CHAIRERK: Effects of precipitation process on mechanical properties of Spring Silver Alloy 935. ADVISOR: ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., 288 pp.

Effects of alloying elements and precipitation process without solution treatment on mechanical and anti-tarnish properties of Spring Silver Alloy 935 were studied. The chemical composition of tested specimens composed of 93.5%wt Ag, 5.4-6.5%wt Cu, 0.3%wt Be, 0.2-0.5%wt Sn and 0.3%wt Al. It was found that aluminium improved anti-tarnish resistance, spring properties and hardness with proper mechanical properties, whereas the addition of tin had no significant effect on improvement of mechanical properties but increase anti-tarnish properties. By adding tin and beryllium, size of β -phase was increased and formed in nearly around shape. However, aluminium had no significant effect on changing the microstructure. The addition of alloying elements improved grains size, resulted in a smaller 3-6 times was about 0.5-2.0 mm. In comparison between as-cast and aging condition of the AgCu0.3Al alloy, it was found that the suitable aging condition was 350°C for 15-30 minutes. The modulus of resilience and yield stress were about 2.6-3.6 MPa and 232-310 MPa with proper mechanical properties and beautiful surface appearance meeting the requirements of jewellery production industry. On the other hand, although the AgCu alloy possesses the highest modulus of resilience in both as-cast and aged conditions, the remained problems are as-cast cracking and deep oxide strains on its surface.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรณินทร์ ไชยเรืองศรี ที่ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบภายนอก อีกทั้งยังให้คำแนะนำ ขณะทำทำการตีพิมพ์ผลงานวิจัยอีกด้วย และขอขอบพระคุณอาจารย์ศิริรัตน์ นิสารัตนพร ที่ให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ คำปรึกษาที่ดี และกำลังใจ ทั้งเรื่องเรียนตลอดจนการดำเนินการทดลองขณะทำการวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท โอลด์มูน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการหล่อหลอมชิ้นงานทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง, คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อการใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องวัดเทียบสี อีกทั้งศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณฉวีวัลย์ บุญประคอง ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) การใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) และคุณสุจิน ชุมประเสริฐ ช่วยในการตรวจสอบปริมาณธาตุโดยใช้เครื่องมือ Inductively Couple Plasma Spectroscopy (ICP-OES) ในหลาย ๆ ครั้ง และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบความแข็ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณ คุณสิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย เป็นอย่างยิ่งที่ให้คำปรึกษาและคอยสอนในทุกๆ เรื่อง ช่วยแสดงความคิดเห็น ชี้แนะให้ความรู้ต่าง ๆ ที่ดีและมีประโยชน์เสมอมา รวมไปถึงขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ มหาบัณฑิตทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดี

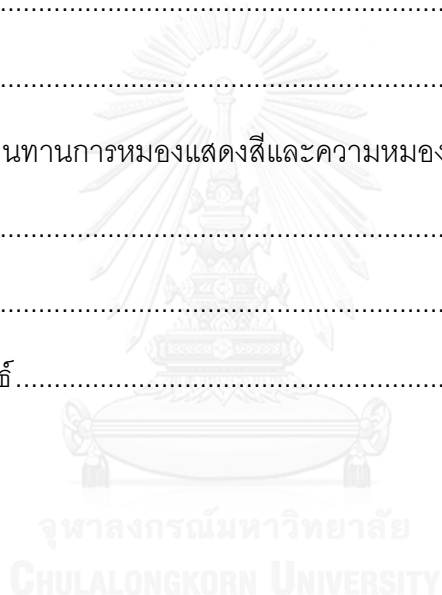
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจให้เสมอมาอย่างดียิ่ง ประโยชน์หรือความดีอันใด เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และบุพพการีทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอนเลี้ยงดู และส่งแรงใจให้ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญรูปภาพ | ญ |
| สารบัญตาราง | บ |
| บทที่ 1..... | 1 |
| บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2..... | 5 |
| ปริทรรศน์วรรณกรรม | 5 |
| 2.1 ข้อมูลทั่วไปของโลหะเงิน | 5 |
| 2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง..... | 7 |
| 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางกลของบรอนซ์เบริลเลียม..... | 9 |
| 2.4 สมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง เบริลเลียม ดีบุกและอะลูมิเนียม | 10 |
| 2.5 สมบัติทางกลของวัสดุ | 13 |
| 2.6 ระบบสมดุลเฟสของเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม-ดีบุก | 27 |
| 2.7 กลไกเพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง | 36 |
| 2.8 สมบัติกันหมองและสีของโลหะเงินสเตอร์ลิง | 40 |

| | |
|---|-----|
| 2.9 ธาตุผสมที่มีผลต่อเงินสเตอร์ลิง | 45 |
| 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 46 |
| บทที่ 3..... | 58 |
| ระเบียบวิธีการวิจัย | 58 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... | 58 |
| 3.2 วัตถุประสงค์ | 60 |
| 3.3 สารเคมี..... | 60 |
| 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 60 |
| 3.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล..... | 63 |
| บทที่ 4..... | 67 |
| รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง | 67 |
| 4.1 ลักษณะและชิ้นงานตัวอย่างหลังการหล่อเงินสเตอร์ลิง | 67 |
| 4.2 ส่วนผสมทางเคมี | 70 |
| 4.3 โครงสร้างจุลภาค..... | 71 |
| 4.4 การหาธาตุและสารประกอบต่างๆ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน | 87 |
| 4.5 ผลของสมบัติต้านทานการหมองและการเปลี่ยนสีหลังการทดสอบ | 93 |
| 4.6 สมบัติทางกล..... | 125 |
| บทที่ 5..... | 145 |
| สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 145 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 145 |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ | 146 |
| รายการอ้างอิง..... | 147 |

| | |
|---|-----|
| ภาคผนวก ก. | 153 |
| ลักษณะต้นโลหะเงินสเตอร์ลิงและสีของชิ้นงานสภาพหลังหล่อ..... | 153 |
| ภาคผนวก ข. | 157 |
| ข้อมูล ICP-OES จากศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย | 157 |
| ภาคผนวก ค. | 175 |
| โครงสร้างจุลภาค | 175 |
| ภาคผนวก ง..... | 250 |
| การทดสอบสมบัติการต้านทานการหมองแสดงสีและความหมอง ก่อน – หลังการทดสอบ..... | 250 |
| ภาคผนวก จ. | 263 |
| สมบัติทางกล | 263 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 288 |



สารบัญรูปภาพ

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 2.1 แร่โลหะเงิน..... | 5 |
| ภาพที่ 2.2 เม็ดโลหะเงิน..... | 6 |
| ภาพที่ 2.3 โลหะเบริลเลียมเป็นโลหะแข็งสีเทาขาว..... | 9 |
| ภาพที่ 2.4 แร่ดีบุก..... | 11 |
| ภาพที่ 2.5 (ก) แร่ทองแดง และ (ข) ม้วนแผ่นทองแดงที่ผ่านการแปรรูปแล้ว | 11 |
| ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับปริมาณธาตุชนิดต่างๆ ในเงินผสม ... | 12 |
| ภาพที่ 2.7 (ก) อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99% และ (ข) อะลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูปแล้ว..... | 13 |
| ภาพที่ 2.8 กราฟความเค้น - ความเครียดของโลหะ | 14 |
| ภาพที่ 2.9 Leaf Spring ภายใต้การรับ Load | 16 |
| ภาพที่ 2.10 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบบริลเนลล์ | 19 |
| ภาพที่ 2.11 ลักษณะการทดสอบความแข็งบริลเนลล์ที่ไม่ถูกต้อง | 19 |
| ภาพที่ 2.12 ลักษณะการทดสอบการวัดความแข็งแบบรีอคเวลล์ | 22 |
| ภาพที่ 2.13 ลักษณะการทดสอบการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส | 25 |
| ภาพที่ 2.14 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดงเบริลเลียม | 27 |
| ภาพที่ 2.15 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม ช่วง 1-4%Be | 28 |
| ภาพที่ 2.16 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง..... | 29 |
| ภาพที่ 2.17 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – เบริลเลียม..... | 30 |
| ภาพที่ 2.18 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ดีบุก | 30 |
| ภาพที่ 2.19 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – ดีบุก..... | 31 |
| ภาพที่ 2.20 แผนภูมิสมดุลแสดงเส้นลิกวิดัสของระบบเงิน – ทองแดง – ดีบุก..... | 32 |
| ภาพที่ 2.21 แผนภูมิสมดุลแสดงเส้นลิกวิดัสของระบบเงิน – ทองแดง – อะลูมิเนียม..... | 32 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 2.22 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเบริลเลียม – ดีบุก..... | 33 |
| ภาพที่ 2.23 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน – อะลูมิเนียม..... | 34 |
| ภาพที่ 2.24 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบอะลูมิเนียม – ทองแดง..... | 35 |
| ภาพที่ 2.25 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบอะลูมิเนียม – ดีบุก..... | 36 |
| ภาพที่ 2.26 กลไกและโครงสร้างการเย็นตัวของการตกตะกอนของ อะลูมิเนียม – ทองแดง..... | 38 |
| ภาพที่ 2.27 การเคลื่อนที่ดิสโลเคชันผ่านผลึกมีอนุภาคของตะกอนโดยกลไกแบบ Orowan..... | 39 |
| ภาพที่ 2.28 Coherency ของอนุภาค..... | 39 |
| ภาพที่ 2.29 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง..... | 42 |
| ภาพที่ 2.30 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส..... | 42 |
| ภาพที่ 2.31 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ..... | 43 |
| ภาพที่ 2.32 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ..... | 44 |
| ภาพที่ 2.33 (ก)-(ง) โครงสร้างเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกหลังอบเนื้อเดียว..... | 53 |
| ภาพที่ 2.34 (ก)-(ง) โครงสร้างจุลภาคหลังอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 740°C..... | 54 |
| ภาพที่ 2.35 ความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกหลังผ่านการอบเนื้อเดียวที่ 740°C..... | 55 |
| ภาพที่ 2.36 ความแข็งจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มในช่วงอุณหภูมิ 250-350°C..... | 56 |
| ภาพที่ 2.37 สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งในช่วงอุณหภูมิ 250-350°C..... | 56 |
| ภาพที่ 2.38 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็ง..... | 57 |
| ภาพที่ 3.1 ภาพขึ้นทดสอบแรงดึง..... | 63 |
| ภาพที่ 3.2 แผนผังสรุปกระบวนการทดลอง..... | 66 |
| ภาพที่ 4.1 ชิ้นงานหลังหล่อของโลหะผสมทั้ง 7 ชุด..... | 69 |
| ภาพที่ 4.2 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping ใช้กำลังขยาย 2000x..... | 72 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 4.3 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Al$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping ใช้กำลังขยาย 2000x..... | 73 |
| ภาพที่ 4.4 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Sn$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2000x | 74 |
| ภาพที่ 4.5 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500x..... | 76 |
| ภาพที่ 4.6 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500x..... | 77 |
| ภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500x..... | 78 |
| ภาพที่ 4.8 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$ จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500x ... | 79 |
| ภาพที่ 4.9 ขนาดเกรนชิ้นงานสภาพหลังหล่อของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (ก) $AgCu_{0.3}Sn$ และ (ข) $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$ | 80 |
| ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม หลังผ่านกระบวนการอบบ่มที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ เวลา 120 นาที..... | 83 |
| ภาพที่ 4.11 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu$ สภาพหลังหล่อ..... | 88 |
| ภาพที่ 4.12 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu$ หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ เวลา 2 ชั่วโมง | 88 |
| ภาพที่ 4.13 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu_{0.3}Al$ สภาพหลังหล่อ | 89 |
| ภาพที่ 4.14 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu_{0.3}Al$ หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ เวลา 2 ชั่วโมง | 89 |
| ภาพที่ 4.15 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu_{0.3}Sn$ สภาพหลังหล่อ | 90 |
| ภาพที่ 4.16 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu_{0.3}Sn$ หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ เวลา 2 ชั่วโมง | 90 |
| ภาพที่ 4.17 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn$ สภาพหลังหล่อ..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| ภาพที่ 4.18 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง | 91 |
| ภาพที่ 4.19 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al สภาพหลังหล่อ..... | 92 |
| ภาพที่ 4.20 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง | 92 |
| ภาพที่ 4.21 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม AgCu - AgCu _{0.3} Al - AgCu _{0.3} Sn | 98 |
| ภาพที่ 4.22 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม AgCu _{0.3} Sn - AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn - AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn - AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn | 101 |
| ภาพที่ 4.23 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม AgCu _{0.3} Al - AgCu _{0.3} Sn - AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn - AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al..... | 102 |
| ภาพที่ 4.24 กราฟเส้นแสดงค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีชิ้นงานทดสอบของโลหะผสมทั้ง 7 ชุดสภาวะหลังหล่อ (As-cast)..... | 105 |
| ภาพที่ 4.25 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน | 108 |
| ภาพที่ 4.26 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu _{0.3} Al ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน..... | 111 |
| ภาพที่ 4.27 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu _{0.3} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน..... | 113 |
| ภาพที่ 4.28 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน | 116 |
| ภาพที่ 4.29 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน | 118 |
| ภาพที่ 4.30 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน | 120 |

| | |
|--|-----|
| ภาพที่ 4.31 กราฟแท่งแสดงค่า dE^* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบ ต่าง ๆ กัน | 124 |
| ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงค่าสมบัติความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 129 |
| ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 130 |
| ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 131 |
| ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 132 |
| ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงค่าสมบัติความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 135 |
| ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C | 136 |
| ภาพที่ 4.38 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C | 137 |
| ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C | 138 |
| ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงสมบัติ Modulus of Resilience ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C..... | 141 |
| ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C..... | 142 |

ภาพที่ 4.42 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C 143

ภาพที่ 4.43 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C..... 144

ภาพที่ ก1. ภาพต้นโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อ (As-cast) ของโลหะผสมทั้ง 7 ชุด..... 154

ภาพที่ ค1. โครงสร้างจุลภาคสภาพหลังหล่อ ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะเงินสเตอร์ลิง..... 176

ภาพที่ ค2. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 150x..... 177

ภาพที่ ค3. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 1000x 178

ภาพที่ ค4. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 400°C โดยใช้กำลังขยาย 150x 179

ภาพที่ ค5. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 400°C โดยใช้กำลังขยาย 1000x 180

ภาพที่ ค6. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) - ชุดโลหะผสม AgCu : สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C โดยใช้ กำลังขยาย 150x(ซ้าย), 1000x(ขวา) 181

ภาพที่ ค7. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) - ชุดโลหะผสม AgCu0.3Al : สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C โดยใช้ กำลังขยาย 150x(ซ้าย), 1000x(ขวา)..... 182

ภาพที่ ค8. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) - ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn : สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C โดยใช้ กำลังขยาย 150x(ซ้าย), 1000x(ขวา)..... 183

ภาพที่ ค9. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) – ชุดโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn$: สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ และ $400^{\circ}C$ โดยใช้ กำลังขยาย $150x$ (ซ้าย), $1000x$ (ขวา) 184

ภาพที่ ค10. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) – ชุดโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn$: สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ และ $400^{\circ}C$ โดยใช้ กำลังขยาย $150x$ (ซ้าย), $1000x$ (ขวา) 185

ภาพที่ ค11. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) – ชุดโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn$: สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ และ $400^{\circ}C$ โดยใช้ กำลังขยาย $150x$ (ซ้าย), $1000x$ (ขวา) 186

ภาพที่ ค12. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) – ชุดโลหะผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$: สภาพหลังหล่อ และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ และ $400^{\circ}C$ โดยใช้ กำลังขยาย $150x$ (ซ้าย), $1000x$ (ขวา) 187

ภาพที่ ค13. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu$: 202

ภาพที่ ค14. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Al$: 203

ภาพที่ ค15. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Sn$: 204

ภาพที่ ค16. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn$: 205

ภาพที่ ค17. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn$: 206

ภาพที่ ค18. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn$: 207

ภาพที่ ค19. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$: 208

| | |
|--|-----|
| ภาพที่ ค31. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn หลังหล่อ | 220 |
| ภาพที่ ค32. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn หลังหล่อ | 221 |
| ภาพที่ ค33. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn หลังหล่อ | 222 |
| ภาพที่ ค34. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที..... | 223 |
| ภาพที่ ค35. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า..... | 224 |
| ภาพที่ ค36. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที..... | 225 |
| ภาพที่ ค37. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) | 226 |
| ภาพที่ ค38. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) | 227 |
| ภาพที่ ค39. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) | 228 |

ภาพที่ ค49. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังหล่อ (As-cast) 238

ภาพที่ ค50. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังหล่อ (As-cast) 239

ภาพที่ ค51. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังหล่อ (As-cast) 240

ภาพที่ ค52. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที 241

ภาพที่ ค53. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที 242

ภาพที่ ค54. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะ
 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที 243

ภาพที่ ค55. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al
 สภาวะหลังหล่อ (As-cast)..... 244

ภาพที่ ค56. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al
 สภาวะหลังหล่อ (As-cast)..... 245

ภาพที่ ค57. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และ
 กราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al
 สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที... 246

ภาพที่ ค58. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที... 247

ภาพที่ ค59. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที.... 248

ภาพที่ ค60. ขนาดเกรนของชิ้นงานสภาพหลังหล่อถ่ายภาพด้วยกล้องธรรมดา 249

ภาพที่ ค61. ขนาดเกรนของชิ้นงานสภาพหลังหล่อถ่ายภาพด้วยกล้อง LCD..... 249

ภาพที่ ง1 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น ในชิ้นงานสภาพหล่อ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด 254

ภาพที่ ง2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด.. 256

ภาพที่ ง3 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 350°C เวลา 60 นาที โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด 258

ภาพที่ ง4 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 400°C เวลา 30 นาที โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด 260

ภาพที่ ง5 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 400°C เวลา 60 นาที โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด 262

ภาพที่ จ1 ค่าความแข็งแบบกราฟแท่งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลด (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60 ,120 นาทีของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม 264

ภาพที่ จ2 ค่าความแข็งแบบกราฟแท่งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลด (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60 ,120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม 265

| | |
|---|-----|
| <p>ภาพที่ ๑3 ค่าความแข็งแบบกราฟเส้นที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 266 |
| <p>ภาพที่ ๑4 ค่าความแข็งแบบกราฟเส้นที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 266 |
| <p>ภาพที่ ๑5 ค่าความเป็นสปริง (Modulus of resilience) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60 ,120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 267 |
| <p>ภาพที่ ๑6 ค่าความเป็นสปริง (Modulus of resilience) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 267 |
| <p>ภาพที่ ๑7 ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 268 |
| <p>ภาพที่ ๑8 ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 268 |
| <p>ภาพที่ ๑9 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 269 |
| <p>ภาพที่ ๑10 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม</p> | 269 |

สารบัญตาราง

| | |
|--|-----|
| ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง..... | 8 |
| ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของ เงิน ทองแดง เบริลเลียมและดีบุก..... | 10 |
| ตารางที่ 2.3 ค่า Modulus of Resilience ของวัสดุชนิดต่างๆ | 18 |
| ตารางที่ 2.4 ตารางเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบแบบบรินเนลล์ | 20 |
| ตารางที่ 2.5 สเกลและแรงกดที่ใช้สำหรับการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์..... | 24 |
| ตารางที่ 2.6 ตารางเทียบค่าความแข็งของวิธีวัดแบบต่าง ๆ | 26 |
| ตารางที่ 2.7 รายละเอียดเพิ่มเติมของธาตุผสมเพิ่มสมบัติทางกลด้วยการอบชุบความร้อน | 48 |
| ตารางที่ 2.8 เป็นปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ควรจะมีอยู่ในโลหะผสมเงินงานวิจัย Croce Scott M ซึ่งโลหะต่างๆ เหล่านี้เพิ่มลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของโลหะผสม | 49 |
| ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณธาตุผสมที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความสามารถในด้านกัน หมองของโลหะผสมเงินสำหรับโลหะอัดขึ้นรูปที่ใช้ในเครื่องประดับ | 50 |
| ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเงินผสม 935 ที่ทำการทดลองทั้ง 7 ชุดโลหะผสม | 61 |
| ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุและส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES..... | 70 |
| ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคแต่ละบริเวณด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ชิ้นงานสภาพหลังหล่อ (As-cast)..... | 81 |
| ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองชุดอ้างอิง AgCu - AgCu0.3Al - AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) | 97 |
| ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn สภาพหลังหล่อ.. | 100 |
| ตารางที่ 4.5 ผลของการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาพหลังหล่อ.... | 103 |
| ตารางที่ 4.6 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของโลหะผสมทั้ง 7 ชุดสภาวะหลังหล่อ (As-cast)..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 4.7 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu ก่อนและหลังการอบบ่ม | 107 |
| ตารางที่ 4.8 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Al ก่อนและหลังการอบบ่ม | 110 |
| ตารางที่ 4.9 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม | 112 |
| ตารางที่ 4.10 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม | 115 |
| ตารางที่ 4.11 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม | 117 |
| ตารางที่ 4.12 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมอง ของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม | 119 |
| ตารางที่ 4.13 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al ก่อนและหลังการอบบ่ม | 123 |
| ตารางที่ ค1. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu | 188 |
| ตารางที่ ค2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Al | 190 |
| ตารางที่ ค3. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Sn .. | 192 |
| ตารางที่ ค4. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn | 194 |
| ตารางที่ ค5. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn | 196 |
| ตารางที่ ค6. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn | 198 |
| ตารางที่ ค7. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al | 200 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ ๑1. ชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง - ชุดที่ 1 | 251 |
| ตารางที่ ๑2. ชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง - ชุดที่ 2..... | 252 |
| ตารางที่ ๑3. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง (สภาพหลังหล่อ) ทดสอบ ใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด..... | 253 |
| ตารางที่ ๑4. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง ผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 30 นาที (Age 350°C – 30 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด | 255 |
| ตารางที่ ๑5. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง ผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที (Age 350°C – 60 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด | 257 |
| ตารางที่ ๑6. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง ผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที (Age 400°C – 30 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด | 259 |
| ตารางที่ ๑7. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง ผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที (Age 400°C – 60 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด | 261 |
| ตารางที่ ๑๑. ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ของชิ้นงาน ทดสอบการต้านทานแรงดึงทั้ง 7 ชุดโลหะผสม | 270 |
| ตารางที่ ๑๒. ค่าความแข็งจากการทดสอบแบบรีอคเวลล์ ชุด AgCu และ AgCu0.3Al..... | 278 |
| ตารางที่ ๑๓. ค่าความแข็งจากการทดสอบแบบรีอคเวลล์ ชุด AgCu0.3Sn และ AgCu0.3Be0.2Sn..... | 280 |
| ตารางที่ ๑๔. ค่าความแข็งจากการทดสอบแบบรีอคเวลล์ ชุด AgCu0.3Be0.3Sn และ AgCu0.3Be0.5Sn..... | 282 |
| ตารางที่ ๑๕. ค่าความแข็งจากการทดสอบแบบรีอคเวลล์ ชุด AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al..... | 285 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเงินได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสมบัติของเงินที่เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยน เป็นสินทรัพย์ที่สามารถสะสมมูลค่า อีกทั้งโลหะเงินมีมูลค่าที่ถูก ราคาไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับทองคำ (Gold; Au) และทองขาว (Platinum; Pt) ดังนั้น จึงทำให้นักลงทุนหลายกลุ่มเข้ามาสนใจในตัวโลหะเงินกันมากขึ้น อุปสงค์ของโลหะเงินนั้นมาจากปัจจัยหลัก ๆ 3 ส่วน คือ

1. อุตสาหกรรมเครื่องประดับ
2. อุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมภาพถ่าย การใช้งานในอุปกรณ์เครื่องครัวต่าง ๆ
3. ความต้องการด้านความลงทุน

โดยภาคอุตสาหกรรมทั่วไปนับว่ามีความต้องการหลักของโลหะเงิน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 70 ของความต้องการทั้งหมด ในขณะที่ความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับนั้นอยู่ที่ร้อยละ 20 ส่วนอีก 10 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือนั้นเป็นความต้องการของการลงทุน เพราะสมบัติและประโยชน์ที่หลากหลายทำให้เงินเป็นที่ต้องการตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ราคาของโลหะเงินมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเศรษฐกิจเติบโตมากขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมโลหะเงินนี้สามารถทำเงินให้กับประเทศเป็นอันดับต้น ๆ ของมูลค่าการส่งออกเลยทีเดียว

สำหรับงานในส่วนของการวิจัยฉบับนี้ จะมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ งานวิจัยนี้เป็นศึกษาสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมเพื่อไปใช้ในเครื่องประดับเงินต่าง ๆ เช่น สปริงข้อต่อนาฬิกา ข้อเกี่ยวหรือตะขอของสร้อยคอเงิน สร้อยข้อมือเงิน ล้วนสปริงในงานเครื่องประดับ หรืออาจจะใช้ในการผลิตเครื่องประดับโดยตรงที่ต้องการความยืดหยุ่นและความเป็นสปริงสูง ทำเป็นกำไลข้อมือที่ไม่ต้องมีตัวยึด และสามารถตอบสนองต่ออุตสาหกรรมหรือผู้บริโภคที่ต้องการให้ชิ้นส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องประดับที่ใช้มีส่วนผสมของเนื้อเงินที่เท่ากันทั้งชิ้น หรือกล่าวได้ว่าผู้บริโภคต้องการเครื่องประดับที่มีความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่สูงปริมาณของเนื้อเงินก็ต้องมีปริมาณเท่ากันทุก ๆ ชิ้นส่วนของเครื่องประดับนั้น โดยทั่วไปโลหะเงินบริสุทธิ์จัดเป็นโลหะอ่อน ไม่สามารถรักษารูปทรง ไม่ทนรอยขีดข่วน และยึดเกาะอัญมณีได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในการพัฒนาเครื่องประดับเงิน จึงมีความต้องการสมบัติด้าน

ความแข็ง ซึ่งการเพิ่มความแข็งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold work) การเติมธาตุผสม (Alloying element) และการบ่มแข็ง (Aging) เป็นต้น ส่วนใหญ่ในการทำเครื่องประดับนิยมใช้โลหะเงินสเตอร์ลิง (Sterling silver) หรือที่นิยมเรียกว่าโลหะเงิน 925 โดยส่วนผสมทางเคมีจะประกอบด้วย ธาตุเงินร้อยละ 92.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ส่วนอีก 7.5 เปอร์เซนต์จะเป็นโลหะผสมอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการให้แก่เงิน โลหะผสมที่นิยมใช้ เช่น ทองแดง (Copper; Cu) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับโลหะเงินและราคาถูก ซิลิคอน (Silicon; Si) และแคลเซียม (Calcium; Ca) ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอะลูมิเนียม (Aluminum; Al) ช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองและเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

จากงานวิจัยของสงวนลักษณ์ [1] ศึกษาผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง และงานวิจัยของตระกูลศักดิ์ [2] เรื่องการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียม เกรด 935 ซึ่งจากผลของการทดลองนั้นมีแนวโน้มไปทางเดียวกันคือ ผลของดีบุกและเบริลเลียมต่างก็สามารถเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมได้ประมาณ 2 เท่าของโลหะเงินที่ไม่ได้ผสมธาตุเหล่านี้ ทำให้เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ที่จะทำการศึกษาและพัฒนาผลของการเติมธาตุดีบุก-เบริลเลียม รวมทั้งตัวแปรหรือปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ปริมาณธาตุผสมที่เหมาะสม อุณหภูมิและเวลาในการอบทางความร้อน การอบบ่ม ที่เหมาะสม

ส่วนงานวิจัยโครงการของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพรและคณะ [3] ในหัวข้อการปรับปรุงโลหะเงินสปริง เกรด 935 เพื่อการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยมีการศึกษาต่อเนื่องมาจากงานวิจัยของสงวนลักษณ์ [1] และตระกูลศักดิ์ [2] ซึ่งทำการปรับส่วนผสมของธาตุให้เหมาะสมและใช้การเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) รวมถึงปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาที่ส่งเพิ่มสมบัติสปริงของวัสดุ โดยมีการอบให้ความร้อนที่เรียกว่า อบเนื้อเดียว (Solution treatment) ที่ 750-800 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 0.5-1 ชั่วโมงก่อน หลังจากนั้นตามด้วยกระบวนการอบบ่มที่ 200, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 7-120 นาที และยังทำการอบบ่มแบบไม่ผ่านการอบเนื้อเดียว (Non-solutionization) เปรียบเทียบความแตกต่างข้อดีข้อเสียกันอีกด้วย ซึ่งพบว่ากระบวนการอบชุบความร้อนที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นชิ้นงานมีสมบัติเป็นสปริงนั้น สามารถทำได้ทั้งสองแบบคือ ผ่านการอบเนื้อเดียวแล้วไปอบบ่มแข็ง หรือทำการอบบ่มแข็งโดยไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวเลยก็ได้ แต่ควบคุมตัวแปรให้ต่างกัน โดยจากการสังเกตแล้วชิ้นงานที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนจะทำการอบบ่มแข็งนั้น เนื่องจากการอบเนื้อเดียวใช้อุณหภูมิสูงทำให้เงินผสมที่มีธาตุหลักเป็นทองแดงจะ

สามารถเกิดคราบทองแดงออกไซด์ที่กินลึกมาก ที่เรียกว่า ฝ้าแดง-ดำ (Fire scale) ที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความสวยงามของชิ้นงาน คราบเหล่านี้ฝังลึกและไม่สามารถปัดและตกแต่งออกได้หมด และยังส่งผลต่อการเสียความแข็งแรงและความแข็งเนื่องจากปริมาณทองแดงไม่เพียงพอ ในขณะที่หลังจากการหล่อ แล้วนำชิ้นงานไปอบบ่มแข็งโดยไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวไม่เกิดปัญหาคราบฝ้าแดง-ดำขึ้น สมบัติความเป็นสปริงไม่ลดลง ไม่จำเป็นต้องปกคลุมผิวชิ้นงานด้วยสารประกอบโบรอนเพื่อป้องกันการแพร่ซึมของออกซิเจน และยังมีข้อดีทำให้ช่วยประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตงานเครื่องประดับเงินอีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งประกอบกับปัจจุบันแทบจะไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมโลหะผสมของเบริลเลียม-ดีบุกและอะลูมิเนียมในโลหะเงินสเตอร์ลิง แล้วเพิ่มความแข็งแรงโดยการอบบ่มแข็งทันทีโดยไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวหลังจากการหล่อ จึงเป็นที่มาของงานวิจัย เพื่อให้ได้องค์ความรู้ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความแข็งแรง ความต้านแรงดึงสูงสุด และเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ผสมทองแดง ดีบุก เบริลเลียมและอะลูมิเนียม โดยการอบทางความร้อนด้วยวิธีการอบบ่มแข็ง โดยไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งการศึกษาสมบัติทางกล และความต้านทานการหมอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมและกระบวนการอบทางความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของโลหะเงินผสมเกรด 935 มีปริมาณของธาตุเงิน 93.5% ทองแดง 5.4-6.5% เบริลเลียม 0.3% ดีบุก 0.2-0.5% และอะลูมิเนียม 0.3% โดยน้ำหนัก
2. เพื่อศึกษาผลของกระบวนการอบทางความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมเกรด 935 ที่เติมธาตุผสมต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสม ต่อโครงสร้างจุลภาค และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้น ในโลหะเงินสปริง
2. ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมและกระบวนการทางความร้อนต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของโลหะ ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง สมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงิน และการเปลี่ยนแปลงสีผิว
3. ศึกษาปริมาณของธาตุผสม ในอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโลหะเงินสปริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบปริมาณส่วนผสมของโลหะเงินผสมทองแดง เบริลเลียม ดีบุก และอะลูมิเนียมที่เหมาะสมต่อการผลิตสปริง
2. ได้ทราบถึงการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมต่อการอบชุบทางความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติของสปริงที่ดี
3. ได้ทราบถึงอิทธิพลของธาตุผสมต่าง ๆ ที่เติมลงในโลหะเงินซึ่งส่งผลต่อสมบัติความเป็นสปริงและสมบัติทางกล อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงสีและสมบัติการกันหมองที่เปลี่ยนไปของโลหะเงินผสม
4. สามารถนำข้อมูลงานวิจัยโลหะเงินสปริงไปปรับใช้และพัฒนาการเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการผลิตเครื่องประดับเงินในอุตสาหกรรมต่อไปได้



บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ข้อมูลทั่วไปของโลหะเงิน

โลหะเงิน [4] หรือในภาษาอังกฤษ เรียกว่า ซิลเวอร์ (Silver) สัญลักษณ์ที่ใช้ Ag (เป็นตัวย่อมาจากคำในภาษาละตินว่า Argentum) มีเลขอะตอม 47 เป็นธาตุที่ 2 ของหมู่ IB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน น้ำหนักอะตอม 107.870 amu จุดหลอมเหลวของโลหะเงินมีค่า 960.8°C จุดเดือดที่ 2210°C ความหนาแน่น 10.5 g/cc ที่ 20°C และมีโครงสร้างผลึกเป็น FCC (Face-center-cubic) โลหะชนิดนี้มีลักษณะสีขาวเงิน เป็นประกายสวยงาม ในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่น ๆ หรืออยู่อิสระ



ภาพที่ 2.1 แร่โลหะเงิน [4]

โลหะเงินใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง พอสรุปได้ดังนี้

1. ใช้ทำขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchange coils) และอุปกรณ์การระเหย ท่อลำเลียง
2. ใช้ทำอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาเคมี
3. ใช้เตรียมซิลเวอร์ไนเตรต ซิลเวอร์โบรไมด์ ซึ่งใช้เป็นน้ำยาการถ่ายภาพ
4. ใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์
5. ใช้เป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในปฏิกิริยาหลายประเภท เช่น ปฏิกิริยาการเตรียมเอทีลีน

6. ใช้ทำอัญมณีและเครื่องเงิน โดยโลหะเงินสามารถใช้ร่วมกับโลหะชนิดอื่น เพื่อประกอบเป็นเครื่องประดับอันสวยงาม เช่น ทองคำ ทองแดง เหล็ก ทองเหลือง นอกจากนี้เครื่องเงินยังมีประโยชน์มากในด้านใช้สอย เช่น ช้อน ช้อม มีด เป็นต้น
7. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าบางชนิดก็มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น สายเคเบิล สายลำโพง นาฬิกาที่ยังใช้แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น
8. ด้านการแพทย์ เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์การแพทย์ต่าง ๆ อาจถูกใช้เพื่อรักษาโรคติดเชื้อภายนอก เงินยังใช้ในการใช้งานทางการแพทย์บางอย่าง เช่น สายสวนปัสสาวะ และท่อช่วยหายใจ เป็นต้น
9. เสื้อผ้า เงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราบนเสื้อผ้า เช่น ถุงเท้า เสื้อกีฬา เพื่อลดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ ความเสี่ยงของการติดเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา ที่รวมอยู่ในเสื้อผ้าหรือรองเท้า โดยใช้อนุภาคซิลเวอร์นาโนในพอลิเมอร์จากเส้นด้ายเคลือบด้วยเงิน



ภาพที่ 2.2 เม็ดโลหะเงิน [4]

ส่วนความเป็นพิษของโลหะเงิน เงินในรูปของธาตุอิสระเป็นพิษไม่มากนัก แต่เกลือส่วนใหญ่เป็นพิษ (เพราะแอนไอออน) สารประกอบของเงินเมื่อเข้าสู่ร่างกายถูกดูดเข้าสู่ระบบการหมุนเวียนของโลหิตได้ และถูกรีดิวซ์ทำให้โลหะเงินตกค้างตามเนื้อเยื่อต่าง ๆ ผลก็คือผิวหนังเกิดจุดสีเทา สภาวะเช่นนี้เรียกว่า 'Argyria'

แหล่งที่พบโลหะเงิน

ประเทศไทย : พบปนในแร่ตะกั่วที่ จังหวัดกาญจนบุรี ในแหล่งแร่ตะกั่วเกือบทุกแห่ง

ต่างประเทศ : พบในเยอรมนี เปรู เม็กซิโก สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย

2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

เงินหรือโลหะเงินที่เรารู้จักกันนั้นเป็นทั้งเงินบริสุทธิ์ 100% และเงินผสมเพื่อความแข็งแรง ในการทำรูปพรรณหรือทำเครื่องประดับเงินทั่วไป ที่เรียกว่า ‘เงินสเตอร์ลิง’ (Sterling silver) [5] จำกััดความของเงินสเตอร์ลิง คือ โลหะเงินที่มีโลหะชนิดอื่นผสมหรือปนอยู่ไม่เกิน 7.5% (ธาตุผสมอื่น ๆ เช่น ทองแดง ดีบุก สังกะสี ซีลีคอน ทองคำ ตะกั่ว หรือธาตุโลหะอื่น ๆ) เป็นมาตรฐานสากลของเครื่องเงินที่มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2515) เพราะถ้าใช้โลหะเงินบริสุทธิ์ 100% ในการทำเครื่องประดับหรือมาทำเป็นเงินรูปพรรณนั้น จะไม่แข็งแรงพอ เนื่องจากเงินบริสุทธิ์มีลักษณะอ่อนนุ่ม ดัดงอให้เป็นรูปร่างที่แข็งแรงนั้นทำได้ยาก จึงต้องมีการผสมโลหะอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การทำเพื่อผลิตเงินสปริง จึงเลือกใช้ธาตุผสมเป็นระบบเงิน-ทองแดง-ดีบุก-เบริลเลียม-อะลูมิเนียม (Ag-Cu-Sn-Be-Al)

สาเหตุที่เลือกระบบโลหะผสมดังกล่าวในการผลิตเป็นโลหะเงินสปริงนั้น เนื่องจากได้ศึกษางานวิจัยของ นางสาวสงวนลักษณ์ โฉ่ววานิชย์เจริญ [1] เป็นงานวิจัยหัวข้อ “ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง” ซึ่งดีบุกที่เติมลงไปนั้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ความแข็งที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากสาเหตุสามประการ คือ ประการแรก ดีบุกเข้าไปละลายอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้น ลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) ประการที่สอง ดีบุกเข้าไปอยู่ในเฟสที่มีทองแดงสูง (Second phase) ทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ประการที่สาม โครงสร้างที่อยู่โดยรอบโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเล็กละเอียด โดยเมื่อแนวโน้มการเติมดีบุกเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะลดลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มมากขึ้น ส่วนสมบัติความเป็นสปริงของโลหะก็มีความเหมาะสม เพราะค่าโมดูลัสรีไซเคิล ($\sigma_y/2E$) มีค่าที่สูงพอสำหรับการทำเป็นลึ้นสปริง และเนื่องจากสีผิวของเครื่องประดับมีความสำคัญมาก การที่สีผิวเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความหมองขึ้นหลังการอบทางความร้อนต่าง ๆ (Heat treatment) ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ งานวิจัยของคุณสงวนรักษ์ยังมีการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสีผิวโลหะเงินสเตอร์ลิงจากผลของการเติมดีบุกลงไป พบว่าลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุกหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีสีดำที่สุด แต่เมื่อเติมดีบุกเข้าไปจะทำให้สีผิวเป็นสีเทาขาว สีผิวจะขาวมากขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น ลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุกที่พบเกิดจากการแพ้วของทองแดงจากบริเวณใจกลางชิ้นงานไปยังผิวของชิ้นงานแล้วทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในบรรยากาศ เกิดเป็นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ปกคลุมบนผิวหน้า ส่วนโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติม

ตีบุกก็อธิบายได้ในลักษณะเดียวกันแต่สีผิวของชิ้นงานที่มีสีอ่อนกว่าก็เนื่องมาจากปริมาณทองแดงที่มีน้อยกว่าในโลหะเงินนั้น ถึงแม้ว่าการเติมทองแดงเพียงอย่างเดียวจะมีความแข็งสูงขึ้นมา แต่ก็สีผิวจะดำคล้ำ ดังนั้น จึงต้องมีการเติมตีบุกเข้าไปด้วยเพื่อช่วยให้ผิวของชิ้นงานไม่เป็นสีดำและลดการสูญเสียทองแดงขณะอบให้ความร้อน

นายตระกูลศักดิ์ สุขี [2] ได้วิจัยในหัวข้อ “การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียมเกรด 935” พบว่าการเติมเบริลเลียมลงในเงินสเตอร์ลิง 935 สามารถเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงได้มากขึ้น โดยค่าที่แสดงสมบัติความเป็นสปริงคือ ค่าโมดูลัสรีไซเคิลชิ้นงานวิจัยนี้เมื่อเติมเบริลเลียมในการปรับปรุงส่วนผสมสามารถเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงได้มากถึง 2 เท่า และหลังจากการอบบ่มเพิ่มความแข็ง เห็นได้ชัดว่าค่าความแข็ง สมบัติทางกลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ความเค้นจุดคราก ของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเบริลเลียมมีค่าสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมเบริลเลียม เนื่องจากการตกตะกอนขนาดเล็กของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) ภายในโครงสร้างเนื้อพื้น และในโครงสร้างยูเทคติก

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง [6]

| สมบัติ | เงิน | ทองแดง | ตีบุก | เยอรมาเนียม | สังกะสี | ซิลิกอน |
|--|-------------|--------------------|---------|-------------|-----------------|------------------|
| สัญลักษณ์ | Ag | Cu | Sn | Ge | Zn | Si |
| เลขอะตอม | 47 | 29 | 50 | 32 | 30 | 14 |
| น้ำหนักอะตอม | 196.8665 | 63.546 | 118.69 | 72.61 | 65.39 | 28.086 |
| โครงสร้างผลึกที่ 25°C | FCC | FCC | - | - | HCP | Diamond Cubic |
| สี | ขาวเงา | แดงเงา | ขาว,เทา | ขาวเงา | ขาวเงา | ดำ |
| ความถ่วงจำเพาะ | 10.5 | 8.96 | 7.28 | 5.323 | 7.14 | 2.33 |
| ความหนาแน่นที่ 20°C (Kg/m ³) | 10,500 | 8,960 | 7,280 | 5,323 | 7,140 | 2,330 |
| จุดหลอมเหลว (°C) | 960 | 1,083 | 231.9 | 938.2 | 419.6 | 1,423 |
| จุดเดือด (°C) | 2,195 | 2,600 | 2,602 | 2,833 | 907 | 2,355 |
| สีสารประกอบออกไซด์ | ใส-น้ำตาลดำ | น้ำตาลแดง, ดำ | ดำ เทา | ขาว | ขาวอมเหลือง | ใส |
| สีสารประกอบซัลไฟด์ | ใส-ดำ | ขาวอมเขียว-ฟ้า, ดำ | ขาว | - | ใส, ขาวอมเหลือง | - |

2.3 สมบัติทางกายภาพและทางกลของบรอนซ์เบริลเลียม

บรอนซ์เบริลเลียม [7] จัดเป็นโลหะทองแดงและสังกะสีผสมเบริลเลียมที่มีความแข็งแรงดึง ความแข็งความเหนียวสูง และความยืดหยุ่นอยู่ในระดับเหล็กกล้าผสม มีสมบัติทางกลที่ดี ความต้านทานการกัดกร่อนสูง สมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังชุบแข็งได้ดี แต่มีราคาแพงและใช้งานอย่างจำกัดในชิ้นงานบางประเภท ได้แก่ สปริง สปริงนาฬิกาซึ่งต้องต่อต้านอำนาจแม่เหล็กและไดอะเฟรมทนการกัดกร่อน แบริ่งในเครื่องมือเครื่องจักร เครื่องมือไม่เกิดประกายไฟ (Non-sparking tools) ส่วนประกอบแม่พิมพ์พลาสติกที่นำความร้อนดีและทนการกัดกร่อน ถ้าใช้เป็นโลหะผสมจะทำให้โลหะผสมเหล่านั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมาก แต่ไอหรือฝุ่นของเบริลเลียมเป็นพิษต่อร่างกาย ระดับการทนได้ของร่างกายคือ 0.002 mg/m^3 ของอากาศ เกล็ดของเบริลเลียมเมื่อสัมผัสกับผิวหนังอาจเป็นพิษได้ แต่เข้าสู่ร่างกายในปริมาณไม่มากไม่ปรากฏเป็นพิษต่อร่างกาย



ภาพที่ 2.3 โลหะเบริลเลียมเป็นโลหะแข็งสีเทาขาว [4]

เนื่องจากปริมาณเบริลเลียมในทองแดงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลใช้ในสัดส่วนไม่เกิน 2.7% โดยน้ำหนัก จึงอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิสูงและลดอุณหภูมิต่ำลงมาความสามารถในการละลายเบริลเลียมในเนื้อทองแดงลดลง ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้ด้วยการตกตะกอน โดยความแข็งภายหลังการอบป่มจะเพิ่มความแข็งสูงถึง $40 H_{RC}$ และความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ $1300-1400 \text{ MPa}$ โดยมีอัตราการยืดตัวประมาณ 2% ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าทองแดงผสมกลุ่มอื่น การเพิ่มปริมาณเบริลเลียมให้สูงเกิน 2.7% ไม่ทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณเบริลเลียมต่ำกว่า 2.7% โดยเติมธาตุอื่นเช่น โคบอลต์ ซึ่งจะให้บรอนซ์ที่มีคุณภาพดีเทียบเท่ากับบรอนซ์เบริลเลียม 2.7%

2.4 สมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง เบริลเลียม ดีบุกและอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง และเบริลเลียม พบว่า เบริลเลียมเป็นธาตุเบาสามารถลอยแยกตัวออกจากน้ำโลหะเงินที่มีความหนาแน่นสูงมาก และเกิดออกซิเดชันได้ง่ายทำให้สูญเสียเบริลเลียมได้ในขณะหลอม

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของ เงิน ทองแดง เบริลเลียมและดีบุก [8]

| ธาตุ | น้ำหนักอะตอม (amu) | โครงสร้างผลึกที่ 20°C | รัศมีอะตอม (nm) | ความหนาแน่นที่ 20°C (g/cm ³) | จุดหลอมเหลว (°C) | ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E(10 ⁶ psi) |
|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|--|------------------|---|
| เงิน (Ag) | 107.87 | FCC | 0.144 | 10.49 | 960 | 16.3 |
| ทองแดง (Cu) | 63.54 | FCC | 0.128 | 8.94 | 1083 | 36 |
| เบริลเลียม (Be) | 9.01 | HCP | 0.149 | 1.85 | 1278 | 40-44 |
| ดีบุก (Sn) | 118.69 | BCT | 0.145 | 7.29 | 231.9 | 50 |
| อะลูมิเนียม (Al) | 26.98 | FCC | 0.143 | 2.70 | 660.32 | 70 |

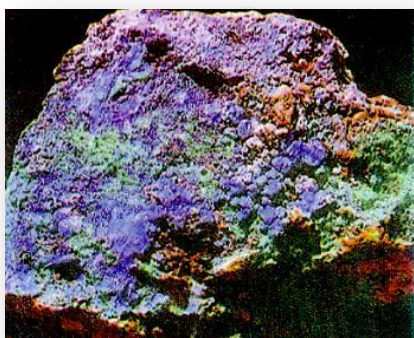
ดีบุก [9] (Tin) คือ ธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 50 และสัญลักษณ์คือ Sn (มาจากคำในภาษาลาตินว่า Stannum) ดีบุกเป็นโลหะที่ไม่ดี หลอมเหลวได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน และถูกออกซิไดซ์ในอากาศได้ดี พบในโลหะผสมหลายชนิด ใช้ประโยชน์ในการเคลือบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ดีบุกส่วนใหญ่สกัดได้จากแร่แคสสิเทอไรต์ (Cassiterite) สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งให้กับเงินสเตอร์ลิงได้โดยการอบบ่ม

ทองแดง [10] (Copper) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี ทองแดงนั้นเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติประโยชน์นานัปการ โดยเฉพาะทองแดงในวงการของอุตสาหกรรม เช่น สายลวดทองแดง เครื่องจักรต่าง ๆ ฯลฯ บทบาทของทองแดงกับเครื่องประดับอาจจะไม่เป็นที่ประจักษ์ชัด แต่หลายคนอาจลืมไปว่า โลหะผสมมีค่าหลายชนิด มีทองแดงเป็นส่วนประกอบสำคัญที่จะขาดไปไม่ได้ เช่น นาก ลักษณะเด่นของนาก คือมีสีออกทองแดงผสมทอง โดยมีทองคำผสมอยู่ในอัตราประมาณ 37%



ภาพที่ 2.4 แร่ดีบุก [9]

นอกจากนั้นจะเป็นส่วนประกอบของทองแดง และเงิน ส่วนทองชมพู ลักษณะเด่นของทองชมพู คือจะมีสีสุกใส ทองอมชมพู สีชมพูอ่อนนั้น ได้มาจากการผสมทองแดงในสัดส่วนที่น้อยกว่าทองแดงที่ผสมในโลหะนาก โดยใช้ทองเป็นส่วนผสมประมาณ 75% และโลหะอื่น ๆ เป็นลำดับต่อมา ลำดับสุดท้ายคือ ทองแดง เรดโกลด์ ลักษณะเด่นของเรดโกลด์ จะคล้ายคลึงกับทองชมพูมาก มีส่วนผสมของโลหะแต่ละชนิดเหมือนกัน โดยปัจจัยหลักที่ทำให้ทองสองชนิดต่างกันคือ ปริมาณของทองแดง โดยจะเพิ่มทองแดงในอัตราส่วนที่มากกว่าทองชมพู การเติมทองแดงลงในโลหะเงินผสม จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะเงินได้มากขึ้น



(ก)

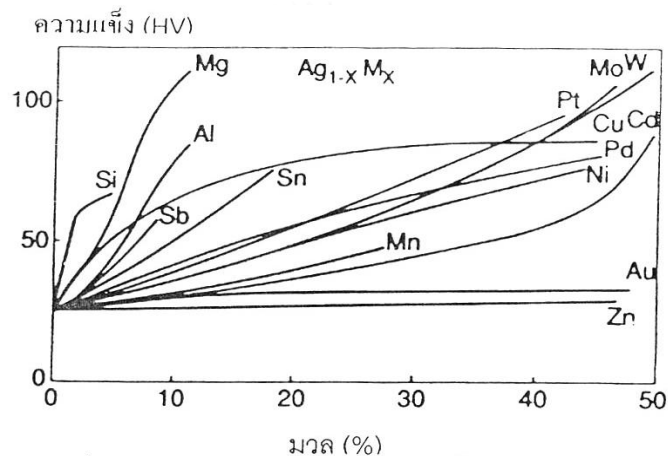


(ข)

ภาพที่ 2.5 (ก) แร่ทองแดง และ (ข) ม้วนแผ่นทองแดงที่ผ่านการแปรรูปแล้ว [10]

ธาตุผสมหลายชนิดที่มีบทบาทเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งให้กับโลหะเงินแสดงในภาพที่ 2.6 พบว่าแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมให้ความแข็งแรงสูง และสามารถบ่มเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน แต่ธาตุทั้งสองสามารถออกซิไดซ์กับอากาศเป็นสารประกอบออกไซด์ได้ง่ายและยัง

ทำให้น้ำโลหะมีความเหนียวเพิ่มสูงขึ้น ธาตุสังกะสีและนิกเกิลเพิ่มความแข็งในโลหะเงินจากการเกิดสารละลายของแข็งจึงไม่อาจใช้ร่วมกับทองแดงกับเบริลเลียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน ดังนั้น ธาตุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเงินสปริงประกอบด้วย ทองแดง และเบริลเลียม แต่เนื่องจากในอดีตการเติมเบริลเลียมในเนื้อเงินมีข้อจำกัดเนื่องจากแหล่งการเติมเบริลเลียมจะได้จากบรอนซ์เบริลเลียมที่มีเบริลเลียม 2.7% เท่านั้น เบริลเลียมสามารถละลายในเงินเกรด 935 ในปริมาณ 0.17% โดยน้ำหนัก ปัจจุบันมีการนำเข้าทองแดงที่มีปริมาณเบริลเลียมมากขึ้น เช่น ทองแดงผสมเบริลเลียม 10 % ทำให้สามารถผสมเบริลเลียมในเนื้อเงินได้มากขึ้นถึง 0.65% ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเงินสปริงเกรด 935 ได้มากขึ้นและสามารถศึกษาอิทธิพลของธาตุเบริลเลียมได้ชัดเจนขึ้นด้วย [11]



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับปริมาณธาตุชนิดต่างๆ ในเงินผสม [11]

อะลูมิเนียม [12] (Aluminum) คือ ธาตุในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย มีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อด้านการออกซิเดชันเป็นเยี่ยม (เนื่องจากปรากฏการณ์ Passivation) แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ ของการขนส่งและการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง มีการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1820 ณ แหล่งบอไกสต์ ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งต่อมาได้ใช้เป็นที่เรียกแร่อะลูมิเนียมจนถึงปัจจุบัน แม้โลหะอะลูมิเนียมจะเป็นธาตุชนิดใหม่ แต่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ และสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ทำให้การใช้ประโยชน์จากโลหะอะลูมิเนียม มีปริมาณเพิ่มขึ้นมาโดยตลอด จนนับเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในโลก

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากบริเวณเปลือกโลก เป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสาม รองจากธาตุซิลิคอน คือ พบประมาณ 7.5% โดยมวล อะลูมิเนียมในธรรมชาติอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดต่าง ๆ เช่น บอกไซต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไครโอไลต์ (Na_3AlF_6) แต่ในธรรมชาติ อะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีสีขาวเงิน นำไฟฟ้าได้ดี และนำได้ดีขึ้นเมื่อมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น มีความว่องไวในการป้องกันไม่ให้ผุกร่อน ต่อไป ทับทิม ไพลิน และบุศราคัมที่ใช้เป็นเครื่องประดับ เป็นพลอยประเภทคอรัันดัมสูตรเคมี คือ Al_2O_3 ซึ่งมีความแข็งรองจากเพชร แต่มีสีต่างกันเพราะมีธาตุอื่นที่เป็นมลทินต่างกัน ถ้ามีโครเมียมออกไซด์ปนอยู่จะมีสีชมพูถึงแดงเข้มเรียกว่า ทับทิม ถ้ามีไทเทเนียมและเหล็กออกไซด์ปนอยู่จะมีสีน้ำเงินเรียกว่า ไพลิน และถ้ามีเหล็กออกไซด์ปนอยู่จะมีสีเหลืองเรียกว่า บุศราคัม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.7 (ก) อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99% และ (ข) อะลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูปแล้ว [12]

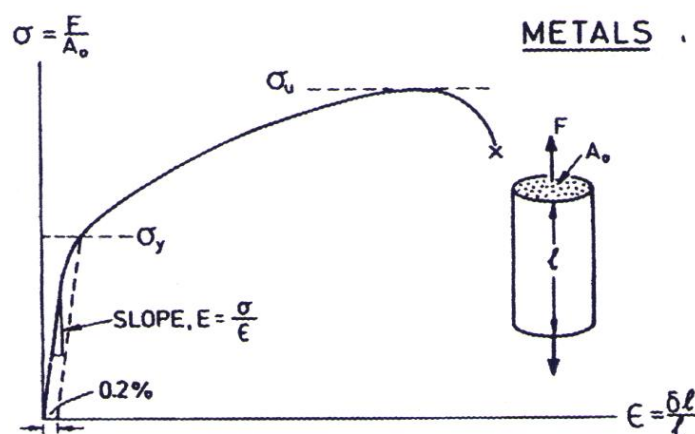
2.5 สมบัติทางกลของวัสดุ

สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [13] ก็คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ สมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ในงานวิศวกรรมสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมาก เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใด ๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ สมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใด ๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้น ๆ เป็นสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาและพัฒนาโลหะเงินที่มีความเป็นสปริงที่ดีในการใช้ทำเครื่องประดับ โดยค่าจำเป็นที่ต้องใช้ในการดูความเหมาะสมของสมบัติความเป็นสปริง มีดังนี้

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) มีหน่วยเป็น GPa หรือ GN/m^2 คืออัตราส่วนของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ในบริเวณที่ต่ำกว่าขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional Limit) ความชันเส้นตรงคือค่า Stiffness หรือ Springiness โดย Stiffness คือความสามารถของวัสดุที่ยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้เมื่อถูกแรงกระทำ ถ้าภาระเป็นแบบแรงดึงหรือแรงอัดจะเรียกว่า Young's modulus หรือ Modulus of Elasticity (E) ถ้าเป็นแรงเฉือนจะเรียกว่า Modulus of Rigidity หรือ Shear Modulus (G) ซึ่งค่าโมดูลัสจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) การวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ดีสามารถใช้ค่าที่ได้จากการทดลองแรงดึง (Tensile Test) และวัดโดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติจากการสั่นสะเทือนทางกล (Natural Frequency of Vibration)

ความเค้นจุดคราก (Yield Strength, σ_y) มีหน่วยเป็น MPa หรือ MN/m^2 จะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมหรือทองแดง ไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่สามารถกำหนดความเครียดที่ 0.1-0.2% ของความยาวกำหนดเดิม แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังภาพที่ 2.8

ความเป็นสปริง การพิจารณาความเป็นสปริง ค่าที่จะนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสม คือ ค่าโมดูลัสรีไซเคิล, Modulus of Resilience ($\sigma_y^2/2E = U_r$) เนื่องจากสปริงเป็นชิ้นส่วนที่เมื่อได้รับแรงกระทำแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เมื่อเอาแรงกระทำออกก็สามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ดังนั้นสมบัติที่สำคัญของสปริงก็คือ การเก็บพลังงานช่วงยืดหยุ่น (Elastic energy storing) สมบัติทางกลที่บ่งชี้ถึง Modulus of Resilience คือพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรในการออกแรงทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นจากสภาพที่ไม่มีภาระกรรมใดๆ ไปจนถึงจุดที่เกิดการคราก (Yielding)



ภาพที่ 2.8 กราฟความเค้น - ความเครียดของโลหะ [13]

การคำนวณค่าโมดูลัสรีไซเคิลของวัสดุที่ถูกทดสอบแรงดึงตามแนวแกนแบบทิศทางเดียว
หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม

$$U_r = \int^{\sigma=\sigma_y} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

หากสมมติว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นสามเหลี่ยม

$$U_r = 1/2\sigma_y\varepsilon_y \quad (2)$$

โดย σ_y คือ ค่าความเค้น ณ จุดที่เกิดการคราก
 ε_y คือ ค่าความเครียดที่เกิดจากการคราก

หน่วยของสมบัติสปริงหรือค่าโมดูลัสรีไซเคิล จึงเท่ากับผลคูณของหน่วยแกนทั้งสองใน
กราฟความเค้น-ความเครียด สำหรับระบบ SI จะมีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3 หรือ Pa)
ในระบบอังกฤษมีหน่วยเป็น นิ้ว - ปอนด์แรงต่อลูกบาศก์เมตร ($in-lb/in^3$ หรือเทียบเท่ากับ psi)
สรุปได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั่นเอง

จากกฎของฮุก (Hook's law)

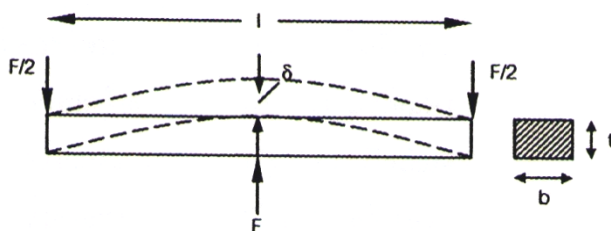
$$E = \sigma_y/\varepsilon_y \quad (3)$$

เมื่อแทนค่า ε_y ในสมการ 2 จะได้

$$U_r = 1/2\sigma_y\varepsilon_y = 1/2\sigma_y(\sigma_y/E) = \sigma_y^2/2E \quad (4)$$

สำหรับสปริงต้องการค่าสมการ 3 มีค่าสูง และเพื่อไม่ให้สปริงเกิดความเสียหายค่าความ
เค้นที่ใช้ได้ ต้องไม่เกินค่าความเค้นจุดคราก σ_y นั่นคือ $\sigma \leq \sigma_y$

ถึงแม้ว่า Leaf Spring จะมีหลายรูปแบบแต่โดยพื้นฐานจะมีลักษณะเป็นคานอิลาสติก รับแรงดัด โดยคานที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัวรองรับอย่างง่ายรับภาระ F ตรงกลาง จะมีระยะแอ่น δ ดังภาพ 2.9



ภาพที่ 2.9 Leaf Spring ภายใต้การรับ Load [14]

ดังนั้นระยะแอ่น

$$\delta = \frac{Fl^3}{4Ebt^3} \quad (5)$$

เมื่อ

F = แรงดัด

l = ความยาวของคาน

t = ความหนา

b = ความกว้าง

E = โมดูลัสของวัสดุที่นำมาใช้ทำสปริง

ค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ผิวตรงจุดกึ่งกลางของคาน (เพราะมีโมเมนต์ดัดมากที่สุด)

ดังนั้น

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bt^2} \quad (6)$$

สปริงจะไม่เสียรูปร่างอย่างถาวรระหว่างใช้งาน นั่นคือเกิด Spring Back จะต้องมีความเค้นสูงสุดต่ำกว่าค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength)

$$(\sigma_y/E) > 6 \delta T/l^2 \quad (7)$$

จากสมการ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสปริงรับภาระ F แล้วจะแอ่นตัวไปเป็นระยะ δ ดังนั้นอัตราส่วน σ_y/E จะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะหลีกเลี่ยงการเสียรูปแบบถาวร สปริงที่ดีควรทำด้วยวัสดุที่มีค่านี้นสูง

ตัวอย่างการเลือกวัสดุทำสปริง

กำหนดให้คานสปริงมี

ความหนา $(t) = 2$ มิลลิเมตร

ความกว้าง $(b) = 50$ มิลลิเมตร

ความยาว $(l) = 127$ มิลลิเมตร

ระยะแอ่น ≤ 6.35 มิลลิเมตร

แทนค่าในสมการที่ 7

$$(\sigma_y/E) > 6 \times 6.35 \times 2 / 127^2 = 4.7 \times 10^{-3}$$

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ $\sigma_y^2/2E$ วัสดุที่จะนำมาทำสปริงจะต้องมีค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength) ที่สูง ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความแข็งแรงด้วยทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening, Work hardening) และการอบบ่ม (Precipitation strengthening) เช่น ในสปริงของเหล็กกล้า (Spring Steel) การอบอ่อนทำให้ความแข็งแรงต่ำลงและเป็นสาเหตุให้อนุภาคตกตะกอนหยาบขึ้น ค่าความเค้นจุดครากที่ลดลงจะทำให้วัสดุไม่เหมาะทำสปริง เมื่อเทียบค่า $\sigma_y^2/2E$ จากตาราง แล้วจะเห็นได้ว่าสปริงของเหล็กกล้า (Spring Steel) ซึ่งเป็นวัสดุที่ราคาถูกที่สุดในตารางก็สามารถนำมาเป็นวัสดุสำหรับสปริงได้ แต่จะมีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) น้อย ส่วนบรอนซ์เบริลเลียม มีความเหมาะสมสำหรับทำสปริง เนื่องจากมีค่าความปลอดภัยมากที่สุด แต่มีราคาแพง

ตารางที่ 2.3 ค่า Modulus of Resilience ของวัสดุชนิดต่างๆ [15, 16]

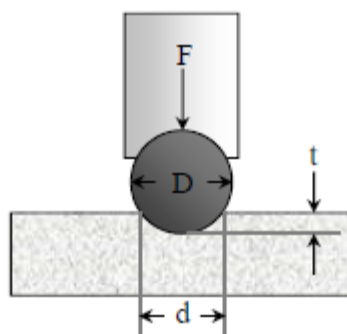
| ชนิดของวัสดุ | $\sigma_y^2 / 2E$ (MPa) |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Wrought iron | 0.048265 |
| Steel 0.13 % C | 0.075845 |
| Steel 0.25 % C | 0.16548 |
| Steel 0.53 % C | 0.6895 |
| Steel 1.2 % C | 1.9306 |
| Steel Spring | 2.2064 |
| Cast iron | 0.006985 |
| Nickel cast iron | 0.062055 |
| Rolled Bronze | 0.4137 |
| Duralumin | 0.117215 |
| Brass (cold-rolled) | 3.38 |
| Stainless steel (cold-rolled) | 5.00 |
| Beryllium copper | 15.9 |

- การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness test) ค่าความแข็งของวัสดุ นั้น ถือได้ว่าเป็นสมบัติเชิงกลเบื้องต้น ที่สามารถบอกถึงคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุ นั้นได้ ซึ่งสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ต้องใช้ทั้งเครื่องมือในการวัด และการเตรียมชิ้นงานซับซ้อนหลากหลายขั้นตอนมากกว่า ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความเหนียว ความยืดหยุ่นของวัสดุ การทนต่อแรงเสียดสีหรือการสึกหรอต่าง ๆ สมบัติความเป็นสปริง เป็นต้น โดยการวัดค่าความแข็งนั้น ชิ้นงานเตรียมแค่ผิวให้มีความเรียบ และปัจจุบันการวัดค่าสามารถทำได้ง่ายขึ้น เพราะอุปกรณ์และเครื่องวัดความแข็งส่วนใหญ่ นั้นจะเป็นระบบอัตโนมัติแทบทั้งสิ้น แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก คือ วิธีทดสอบต้องมีการเลือกให้เหมาะสมเนื่องจากหลายประเภท โดยวิธีการวัดค่าความแข็งที่นิยมใช้งานในวัสดุโลหะนั้นมี 3 วิธี ดังนี้

1. การทดสอบแบบบริลเนลล์ (Brinell hardness test) การทดสอบความแข็งแบบบริลเนลล์ ใช้การกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือทังสเตนคาร์ไบด์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ดังรูป โดยยังคงค้างแรงกดไว้เป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาที สำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค้างแรงเป็นระยะเวลา

30 วินาที สำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และทองเหลือง ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก t และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย d ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่า แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด นั่นคือ

$$\text{Brinell Hardness} = \frac{F}{A} = \frac{0.102F}{0.5\pi D[(D - \sqrt{D^2 - d^2})]} \quad (8)$$



ภาพที่ 2.10 ลักษณะการกดทดสอบความแข็งแบบบริลเนลล์ [17]



ภาพที่ 2.11 ลักษณะการกดทดสอบความแข็งบริลเนลล์ที่ไม่ถูกต้อง [18]

ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (d) และขนาดแรงกดที่ใช้ เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริลเนลล์ คือ BHN หรือ H_B

ข้อดีสำหรับการทดสอบวิธีนี้คือ การวัดค่าความแข็งแบบบริลเนลล์ จะให้รอยกดที่กว้างและลึก เพราะหัวกดมีขนาดใหญ่ ดังนั้น ความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคจะส่งผลน้อยต่อค่าทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุทดสอบ ส่วนข้อเสีย ค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็ก หรือชิ้นงานที่บางมาก ๆ ได้

ตารางที่ 2.4 ตารางเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบแบบบรินเนลล์ [17]

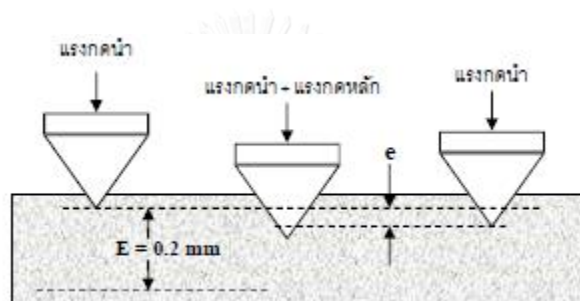
| เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm) | ค่าความแข็งบรินเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 500 kgf | 1000 kgf | 1500 kgf | 2000 kgf | 2500 kgf | 3000 kgf |
| 2.00 | 158 | 316 | 473 | 632 | 788 | 945 |
| 2.05 | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 899 |
| 2.10 | 143 | 286 | 428 | 572 | 714 | 856 |
| 2.15 | 136 | 272 | 408 | 544 | 681 | 817 |
| 2.20 | 130 | 260 | 390 | 520 | 650 | 780 |
| 2.25 | 124 | 248 | 372 | 496 | 621 | 745 |
| 2.30 | 119 | 238 | 356 | 476 | 593 | 712 |
| 2.35 | 114 | 228 | 341 | 456 | 568 | 682 |
| 2.40 | 109 | 218 | 327 | 436 | 545 | 653 |
| 2.45 | 104 | 208 | 313 | 416 | 522 | 627 |
| 2.50 | 100 | 200 | 301 | 400 | 500 | 601 |
| 2.55 | 96.3 | 193 | 289 | 385 | 482 | 578 |
| 2.60 | 92.6 | 185 | 278 | 370 | 462 | 555 |
| 2.65 | 89.0 | 178 | 267 | 356 | 445 | 534 |
| 2.70 | 85.7 | 171 | 257 | 343 | 429 | 514 |
| 2.75 | 82.6 | 165 | 248 | 330 | 413 | 495 |
| 2.80 | 79.6 | 159 | 239 | 318 | 398 | 477 |
| 2.85 | 76.8 | 154 | 230 | 307 | 384 | 461 |
| 2.90 | 74.1 | 148 | 222 | 296 | 371 | 444 |
| 2.95 | 71.5 | 143 | 215 | 286 | 358 | 429 |
| 3.00 | 69.1 | 138 | 207 | 276 | 346 | 415 |
| 3.05 | 66.8 | 134 | 200 | 267 | 334 | 401 |
| 3.10 | 64.6 | 129 | 194 | 258 | 324 | 388 |
| 3.15 | 62.5 | 125 | 188 | 250 | 313 | 375 |
| 3.20 | 60.5 | 121 | 182 | 242 | 303 | 363 |
| 3.25 | 58.6 | 117 | 176 | 234 | 293 | 352 |
| 3.30 | 56.8 | 114 | 170 | 227 | 284 | 341 |
| 3.35 | 55.1 | 110 | 165 | 220 | 276 | 331 |
| 3.40 | 53.4 | 107 | 160 | 214 | 267 | 321 |
| 3.45 | 51.8 | 104 | 156 | 207 | 259 | 311 |
| 3.50 | 50.3 | 101 | 151 | 201 | 252 | 302 |
| 3.55 | 48.9 | 97.8 | 147 | 196 | 244 | 293 |
| 3.60 | 47.5 | 95.0 | 142 | 190 | 238 | 285 |
| 3.65 | 46.1 | 92.2 | 138 | 184 | 231 | 277 |
| 3.70 | 44.9 | 89.8 | 135 | 180 | 225 | 269 |
| 3.75 | 43.6 | 87.2 | 131 | 174 | 218 | 262 |
| 3.80 | 42.4 | 84.8 | 127 | 170 | 212 | 255 |
| 3.85 | 41.3 | 82.6 | 124 | 165 | 207 | 248 |
| 3.90 | 40.2 | 80.4 | 121 | 161 | 201 | 241 |
| 3.95 | 39.1 | 78.2 | 117 | 156 | 196 | 235 |
| 4.00 | 38.1 | 76.2 | 114 | 152 | 191 | 229 |
| 4.05 | 37.1 | 74.2 | 111 | 148 | 186 | 223 |
| 4.10 | 36.2 | 72.4 | 109 | 145 | 181 | 217 |
| 4.15 | 35.3 | 70.6 | 106 | 141 | 177 | 212 |
| 4.20 | 34.4 | 68.8 | 103 | 138 | 172 | 207 |
| 4.25 | 33.6 | 67.2 | 101 | 134 | 167 | 201 |
| 4.30 | 32.8 | 65.6 | 98.3 | 131 | 164 | 197 |
| 4.35 | 32.0 | 64.0 | 95.9 | 128 | 160 | 192 |
| 4.40 | 31.2 | 62.4 | 93.6 | 125 | 156 | 187 |
| 4.45 | 30.5 | 61.0 | 91.4 | 122 | 153 | 183 |

| เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm) | ค่าความแข็งบริเนลล์ที่ขนาดน้ำหนักต่างๆ | | | | | |
|---------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 500 kgf | 1000 kgf | 1500 kgf | 2000 kgf | 2500 kgf | 3000 kgf |
| 4.25 | 33.6 | 67.2 | 101 | 134 | 167 | 201 |
| 4.30 | 32.8 | 65.6 | 98.3 | 131 | 164 | 197 |
| 4.35 | 32.0 | 64.0 | 95.9 | 128 | 160 | 192 |
| 4.40 | 31.2 | 62.4 | 93.6 | 125 | 156 | 187 |
| 4.45 | 30.5 | 61.0 | 91.4 | 122 | 153 | 183 |
| 4.50 | 29.8 | 59.6 | 89.3 | 119 | 149 | 179 |
| 4.55 | 29.1 | 58.2 | 87.2 | 116 | 145 | 174 |
| 4.60 | 28.4 | 56.8 | 85.2 | 114 | 142 | 170 |
| 4.65 | 27.8 | 55.6 | 83.3 | 111 | 139 | 167 |
| 4.70 | 27.1 | 54.2 | 81.4 | 108 | 136 | 163 |
| 4.75 | 26.5 | 53.0 | 79.6 | 106 | 133 | 159 |
| 4.80 | 25.9 | 51.8 | 77.8 | 104 | 130 | 156 |
| 4.85 | 25.4 | 50.8 | 76.1 | 102 | 127 | 152 |
| 4.90 | 24.8 | 49.6 | 74.4 | 99.2 | 124 | 149 |
| 4.95 | 24.3 | 48.6 | 72.8 | 97.2 | 122 | 146 |
| 5.00 | 23.8 | 47.6 | 71.3 | 95.2 | 119 | 143 |
| 5.05 | 23.3 | 46.6 | 69.8 | 93.2 | 117 | 140 |
| 5.10 | 22.8 | 45.6 | 68.3 | 91.2 | 114 | 137 |
| 5.15 | 22.3 | 44.6 | 66.9 | 89.2 | 112 | 134 |
| 5.20 | 21.8 | 43.6 | 65.5 | 87.2 | 109 | 131 |
| 5.25 | 21.4 | 42.8 | 64.1 | 85.6 | 107 | 128 |
| 5.30 | 20.9 | 41.8 | 62.8 | 83.6 | 105 | 126 |
| 5.35 | 20.5 | 41.0 | 61.5 | 82.0 | 103 | 123 |
| 5.40 | 20.1 | 40.2 | 60.3 | 80.4 | 101 | 121 |
| 5.45 | 19.7 | 39.4 | 59.1 | 78.8 | 98.5 | 118 |
| 5.50 | 19.3 | 38.6 | 57.9 | 77.2 | 96.5 | 116 |
| 5.55 | 18.9 | 37.8 | 56.8 | 75.6 | 95.0 | 114 |
| 5.60 | 18.6 | 37.2 | 55.7 | 74.4 | 92.5 | 111 |
| 5.65 | 18.2 | 36.4 | 54.6 | 72.8 | 90.8 | 109 |
| 5.70 | 17.8 | 35.6 | 53.5 | 71.2 | 89.2 | 107 |
| 5.75 | 17.5 | 35.0 | 52.5 | 70.0 | 87.5 | 105 |
| 5.80 | 17.2 | 34.4 | 51.5 | 68.8 | 85.8 | 103 |
| 5.85 | 16.8 | 33.6 | 50.5 | 67.2 | 84.2 | 101 |
| 5.90 | 16.5 | 33.0 | 49.6 | 66.0 | 82.5 | 99.2 |
| 5.95 | 16.2 | 32.4 | 48.7 | 64.8 | 81.2 | 97.3 |
| 6.00 | 15.9 | 31.8 | 47.7 | 63.6 | 79.5 | 95.5 |
| 6.05 | 15.6 | 31.2 | 46.8 | 62.4 | 78.0 | 93.7 |
| 6.10 | 15.3 | 30.6 | 46.0 | 61.2 | 76.7 | 92.0 |
| 6.15 | 15.1 | 30.2 | 45.2 | 60.4 | 75.3 | 90.3 |
| 6.20 | 14.8 | 29.6 | 44.3 | 59.2 | 73.8 | 88.7 |
| 6.25 | 14.5 | 29.0 | 43.5 | 58.0 | 72.6 | 87.1 |
| 6.30 | 14.2 | 28.4 | 42.7 | 56.8 | 71.3 | 85.5 |
| 6.35 | 14.0 | 28.0 | 42.0 | 56.0 | 70.0 | 84.0 |
| 6.40 | 13.7 | 27.4 | 41.2 | 54.8 | 68.8 | 82.5 |
| 6.45 | 13.5 | 27.0 | 40.5 | 54.0 | 67.5 | 81.0 |

2. การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test) เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือ ลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยงอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์นี้ สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วย การทดสอบจากการใช้แรงกด และหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ

- ร็อกเวลล์ซี (Rockwell-C)
- ร็อกเวลล์บี (Rockwell-B)
- ร็อกเวลล์เอ (Rockwell-A)

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซี (Rockwell - C) ใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120° ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ลักษณะการกดของการวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ [17]

ในการคิดเป็นค่าความแข็งนั้น ถ้าให้ E คือค่าคงที่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 มิลลิเมตร และ e คือความลึกที่เกิดจากการเสียรูปอย่างถาวรจากการกด ก็จะสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ดังนี้

$$HRC = 100 - \frac{e}{0.002} \quad (9)$$

ดังนั้น วัสดุที่ถูกกดเขาไปลึกมากกว่า 0.2 mm หรือวัสดุอ่อน จะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซี (Rockwell - C) ได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์บี (Rockwell - B) หรือเอ (Rockwell - A) แทน

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์บี (Rockwell – B) มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) แต่ใช้หัวกดที่ทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว หรือ 1.59 มิลลิเมตร ใช้แรงกดหลัก 90 kgf เหมาะกับการทดสอบวัสดุอ่อน เพราะมีการยืดช่วงของ E เป็น 0.26 มม. และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 มม. ฉะนั้นค่าความแข็งจึงคำนวณได้จาก

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002} \quad (10)$$

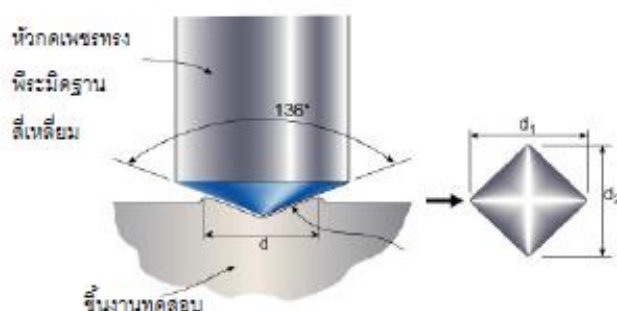
การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์เอ (Rockwell – A) จะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) คือใช้หัวกดเพชรทรงกรวย และกำหนดระยะ E = 0.2 มม. แต่ใช้แรงกดหลัก 60 kgf เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนลง ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็ง หรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ สามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขโดยตรง การวัดความแข็งด้วยสเกลเอนี้ เนื่องด้วยน้ำหนักกดที่น้อยกว่านี้เอง ทำให้รอยกดของการทดสอบกับวัสดุเดียวกันตื้นกว่าเมื่อเทียบกับร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) จึงสามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ในช่วงที่กว้างกว่าตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงเซรามิกส์ ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ข้อเสียในทางกลับกันก็คือ ความละเอียดในการแจกแจงระดับความแข็งจะหยาบกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามร็อกเวลล์เอสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานบาง ที่ความหนาต่ำสุดน้อยกว่ากรณีร็อกเวลล์ซี ทั้งนี้ขึ้นกับค่าความแข็งของวัสดุด้วย ถ้าความแข็งมากรอยกดจะตื้น และความหนาต่ำสุดที่จะทดสอบได้ก็จะมีค่าน้อย หน่วยของสเกล A คือ HRA หรือ H_A โดยในตารางที่ 2.5 แรงที่ใช้สำหรับสเกลต่าง ๆ และการสเกลที่เหมาะสมสำหรับใช้งานทั่วไปของเครื่องวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์

ตารางที่ 2.5 สเกลและแรงกดที่ใช้สำหรับการวัดความแข็งแบบรีอคเวลด์ [17]

| สเกล | ประเภทหัวกด | Major load, kgf | การใช้งานทั่วไป |
|------|--|-----------------|--|
| A | หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel) | 60 | ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case-hardening steel) |
| B | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.) | 100 | โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออ่อนเหนียว (malleable iron) |
| C | หัวกดเพชร | 150 | เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออ่อนเหนียวชนิดเพอร์ริติก, โทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB |
| D | หัวกดเพชร | 100 | เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออ่อนเหนียวชนิดเพอร์ริติก |
| E | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.) | 100 | เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแข็ง |
| F | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.) | 60 | โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง |
| G | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.) | 150 | บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออ่อนเหนียว, โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย |
| H | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.) | 60 | อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว |
| K | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.) | 150 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| L | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.) | 60 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| M | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.) | 100 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| P | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง | 150 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ |

| สเกล | ประเภทหัวกด | Major load, kgf | การใช้งานทั่วไป |
|------|---|-----------------|--|
| | 1/4 นิ้ว (6.350 มม.) | | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| R | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.) | 60 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| S | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.) | 100 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |
| V | ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.) | 150 | โลหะสำหรับผลิตแข็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect |

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test) เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีระมิดมุม 136° ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ (1–120 kgf) โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่ง ขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่นเหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้นรอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังภาพที่ 2.13 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



ภาพที่ 2.13 ลักษณะการกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส [19]

$$\begin{aligned}
 HV &= \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} \\
 &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} = \frac{0.189F}{d^2} \quad (11)
 \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้ ที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ H_V หรือ VHN

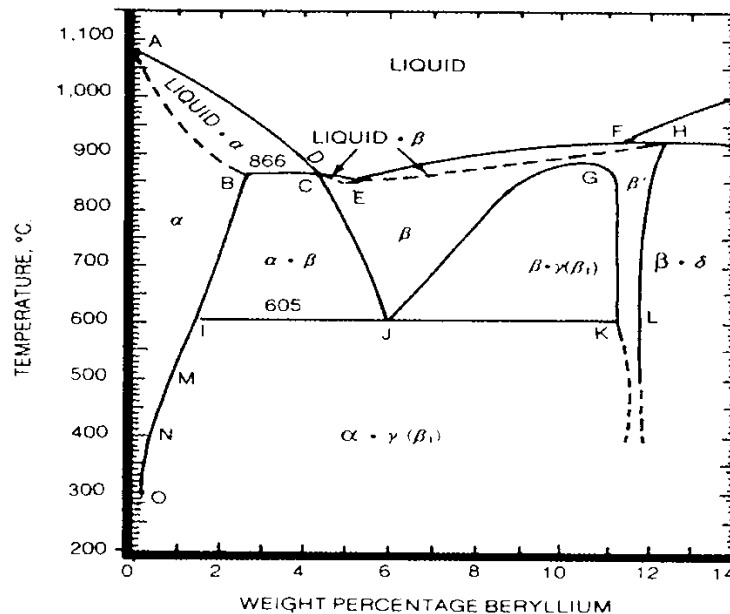
ตารางที่ 2.6 ตารางเทียบค่าความแข็งของวิธีวัดแบบต่าง ๆ [17]

| Rockwell C, 150 kgf (HRC) | Rockwell A, 60 kgf (HRA) | Rockwell B, 100 kgf (HRB) | Brinell 10-mm Standard Ball 3000-kgf (HB) | Brinell 10-mm Carbide Ball 3000-kgf (HB) | Vickers Hardness Number (HV) |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---|--|------------------------------|
| 68 | 85.6 | | --- | --- | 940 |
| 67 | 85.0 | | --- | --- | 900 |
| 66 | 84.5 | | --- | --- | 865 |
| 65 | 83.9 | | --- | (739) | 832 |
| 64 | 83.4 | | --- | (722) | 800 |
| 63 | 82.8 | | --- | (705) | 772 |
| 62 | 82.3 | | --- | (688) | 746 |
| 61 | 81.8 | | --- | (670) | 720 |
| 60 | 81.2 | | --- | (654) | 697 |
| 59 | 80.7 | | --- | 634 | 674 |
| 58 | 80.1 | | --- | 615 | 653 |
| 57 | 79.6 | | --- | 595 | 633 |
| 56 | 79.0 | | --- | 577 | 613 |
| 55 | 78.5 | | --- | 560 | 595 |
| 54 | 78.0 | | --- | 543 | 577 |
| 53 | 77.4 | | --- | 525 | 560 |
| 52 | 76.8 | | (500) | 512 | 544 |
| 51 | 76.3 | | (487) | 496 | 528 |
| 50 | 75.9 | | (475) | 481 | 513 |
| 49 | 75.2 | | (464) | 469 | 498 |
| 48 | 74.7 | | 451 | 455 | 484 |
| 47 | 74.1 | | 442 | 443 | 471 |
| 46 | 73.6 | | 432 | 432 | 458 |
| 45 | 73.1 | | 421 | 421 | 446 |
| 44 | 72.5 | | 409 | 409 | 434 |
| 43 | 72.0 | | 400 | 400 | 423 |
| 42 | 71.5 | | 390 | 390 | 412 |
| 41 | 70.9 | | 381 | 381 | 402 |
| 40 | 70.4 | | 371 | 371 | 392 |
| 39 | 69.9 | | 362 | 362 | 382 |
| 38 | 69.4 | | 353 | 353 | 372 |
| 37 | 68.9 | | 344 | 344 | 363 |
| 36 | 68.4 | | 336 | 336 | 354 |
| 35 | 67.9 | | 327 | 327 | 345 |
| 34 | 67.4 | | 319 | 319 | 336 |
| 33 | 66.8 | | 311 | 311 | 327 |
| 32 | 66.3 | | 301 | 301 | 318 |
| 31 | 65.8 | | 294 | 294 | 310 |
| 30 | 65.3 | | 286 | 286 | 302 |
| 29 | 64.8 | | 279 | 279 | 294 |
| 28 | 64.3 | | 271 | 271 | 286 |
| 27 | 63.8 | | 264 | 264 | 279 |
| 26 | 63.3 | | 258 | 258 | 272 |
| 25 | 62.8 | | 253 | 253 | 266 |
| 24 | 62.4 | | 247 | 247 | 260 |
| 23 | 62.0 | | 243 | 243 | 254 |
| 22 | 61.5 | | 237 | 237 | 248 |
| 21 | 61.0 | | 231 | 231 | 243 |

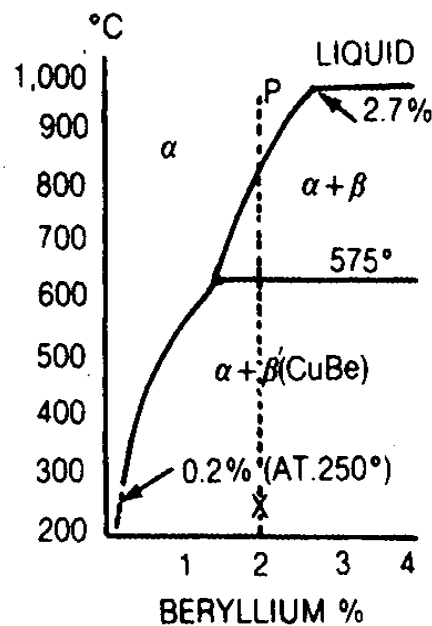
2.6 ระบบสมดุลเฟสของเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม-ดีบุก

จากแผนภูมิสมดุลในภาพที่ 2.14 และ 2.15 พบว่า เบริลเลียมสามารถละลายให้สารละลายของแข็ง (α) สูงสุดได้ 2.7% ที่ 866°C เฟส α มีระบบผลึก FCC เป็นโครงสร้างที่มีความเหนียวสูงที่ 866°C เกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติก ของเหลวรวมตัวกับเฟส α เกิด เฟส β ในระบบผลึก BCC โดยการวางตัวของอะตอมเบริลเลียมไม่เป็นระเบียบ (Disordered phase) มีความแข็งสูงกว่าเฟส α ที่ 605°C เกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ โดย เฟส β สลายตัวเป็น α และ β_1 หรือ γ โดยอัตราการละลายของเบริลเลียมในทองแดงสูงสุดที่ 866°C เบริลเลียมละลายได้ 2.7% และอัตราการละลายลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 0.25% ที่อุณหภูมิปกติ ในขณะที่อะตอมของเบริลเลียมถูกผลักออกจากเฟส α ไปรวมตัวเป็น β หรือ β_1 ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์ตกตะกอน (Precipitation Hardening) [20] เช่นเดียวกับในระบบ Al-Cu

ขั้นตอนการอบตกตะกอน จะอบที่ $700\text{-}800^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้เฟส β_1 สลายตัว เกิดสารละลายของแข็งเฟสเดียวของ α นำแท่งบรอนซ์ออกจากเตาทำให้เย็นตัวรวดเร็วในน้ำ เกิดเฟส α' ในลักษณะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation solid solution) ขั้นตอนนี้เรียกว่า Solution treatment ความแข็งของบรอนซ์เบริลเลียมในสภาพนี้สูงเพียง 60 HR_B หลังจากนั้นนำมาอบบ่มที่ 330°C เพื่อให้ α' สลายตัวเป็น α และ β_1 ในลักษณะการตกผลึกขนาดเล็กของ β_1 กระจุกกระจายในเฟส α ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจสูงถึงระดับ 40 HR_C เทียบได้กับเหล็กกล้าผ่านการอบชุบทางความร้อน



ภาพที่ 2.14 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดงเบริลเลียม [20]



ภาพที่ 2.15 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม ช่วง 1-4%Be [20]

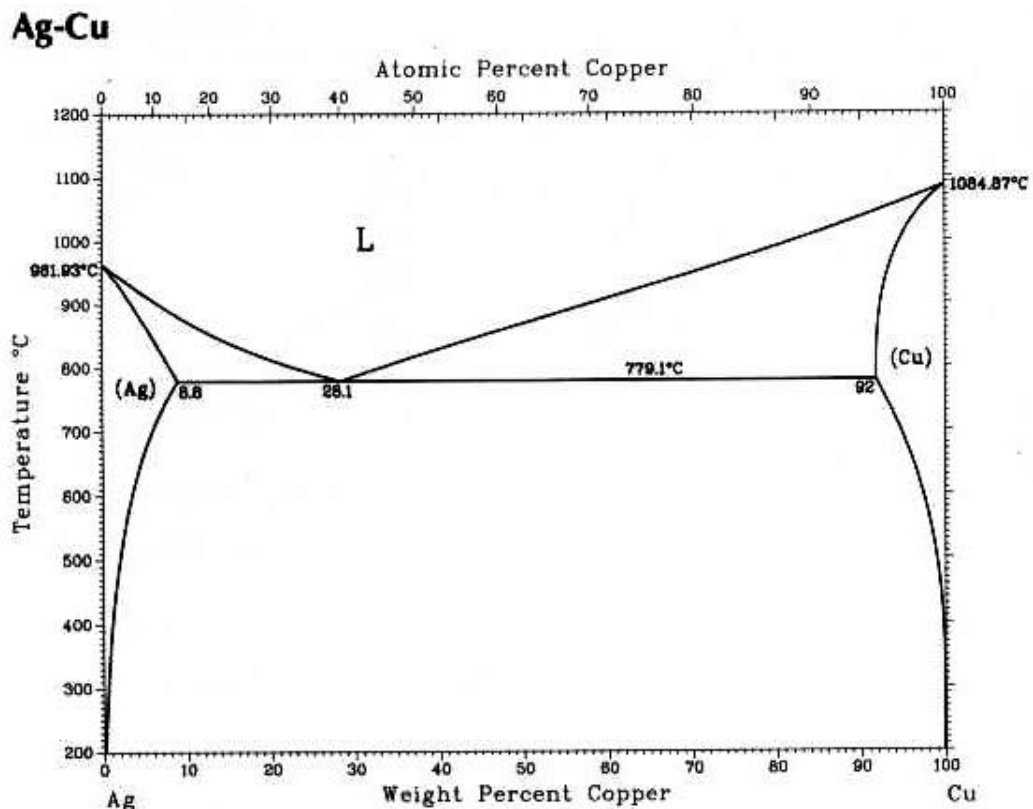
แผนภูมิสมดุลในภาพที่ 2.16 แสดงว่าทองแดงสามารถละลายในเงินเป็นสารละลายของแข็งเฟส α ได้สูงสุด 8.8% โดยน้ำหนัก ที่ 779.1°C และที่อุณหภูมินี้จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ส่วนผสมทองแดง 28.1% ความสามารถในการละลายของทองแดงในเฟส α ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงโดยการตกตะกอนได้ โดยมีขั้นตอนการอบชุบความร้อนดังนี้

1. การทำให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solutionizing) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 750°C ได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็ง เพื่อให้อะตอมตัวถูกละลายกระจายอย่างสม่ำเสมอ

2. ชุบชิ้นงานในน้ำทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้เกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) โดยมีทองแดงมากกว่าสมดุล ในขั้นตอนนี้โลหะผสมจะอ่อนนุ่มความแข็งอาจจะมาจากความบิดเบี้ยวในโครงสร้างของสารละลายของแข็ง และเกิดการแพร่เข้าจันเฟส α สามารถคงสภาพอยู่เป็นเวลานาน

3. อบบ่มเพิ่มความแข็ง (Aging) ที่ 300°C โดยจะเกิดการตกตะกอนของเฟส β ที่มีทองแดงสูง และมีขนาดเล็กมาก ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น

เงินสเตอร์ลิง (ทองแดง 7.5% โดยน้ำหนัก) สามารถเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนได้ โดยให้ความร้อนแก่โลหะเงินที่ 750°C เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ - 1 ชั่วโมง ขึ้นกับขนาดชิ้นงาน แล้วชุบน้ำหลังจากนั้นบ่มเพิ่มความแข็งที่ 300°C จะได้โลหะเงินที่มีความแข็งสูงถึง 145 HB

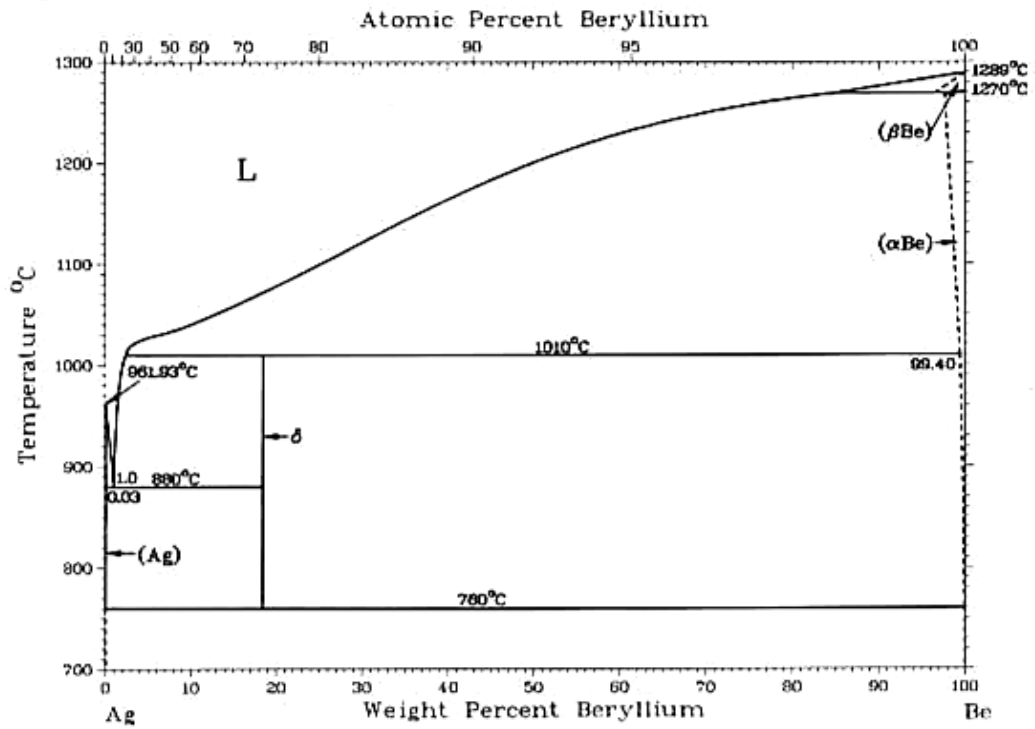


ภาพที่ 2.16 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง [21]

จากแผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียม ดังภาพ 2.17 พบว่าความสามารถในการละลายของเบริลเลียมในเงินมีปริมาณสูงสุด 0.03% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง มีสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นซึ่งมีสมบัติเปราะคือเฟส δ มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และเสถียรระหว่างช่วง $760-1010^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิประมาณ 880°C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกซึ่งส่วนประกอบที่มีส่วนผสมของเบริลเลียม 0.03% เมื่อปริมาณของเบริลเลียมมากกว่า 1.5% สารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูง (α) จะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1010°C

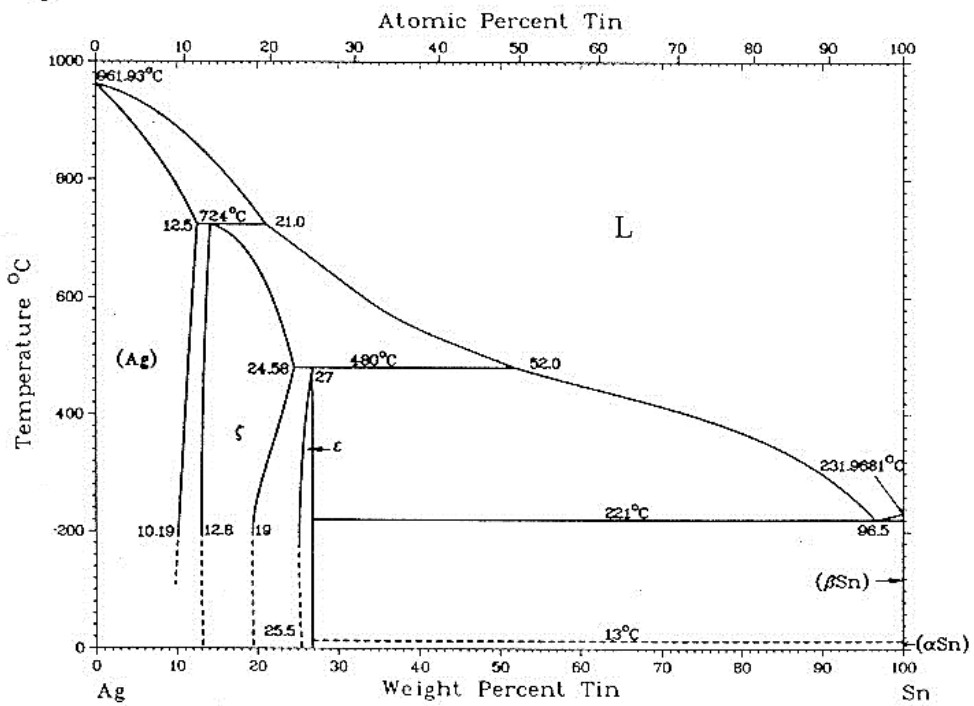
ภาพที่ 2.18 แสดงแผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ดีบุก จากภาพจะพบว่าความสามารถในการละลายได้สูงสุดของดีบุกในเงินคือ 12.5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 724°C สารละลายของแข็งที่ได้มีระบบผลึกแบบ FCC และความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

Ag-Be



ภาพที่ 2.17 แผนภูมิสมดุคเฟสระบบเงิน - เบริลเลียม [21]

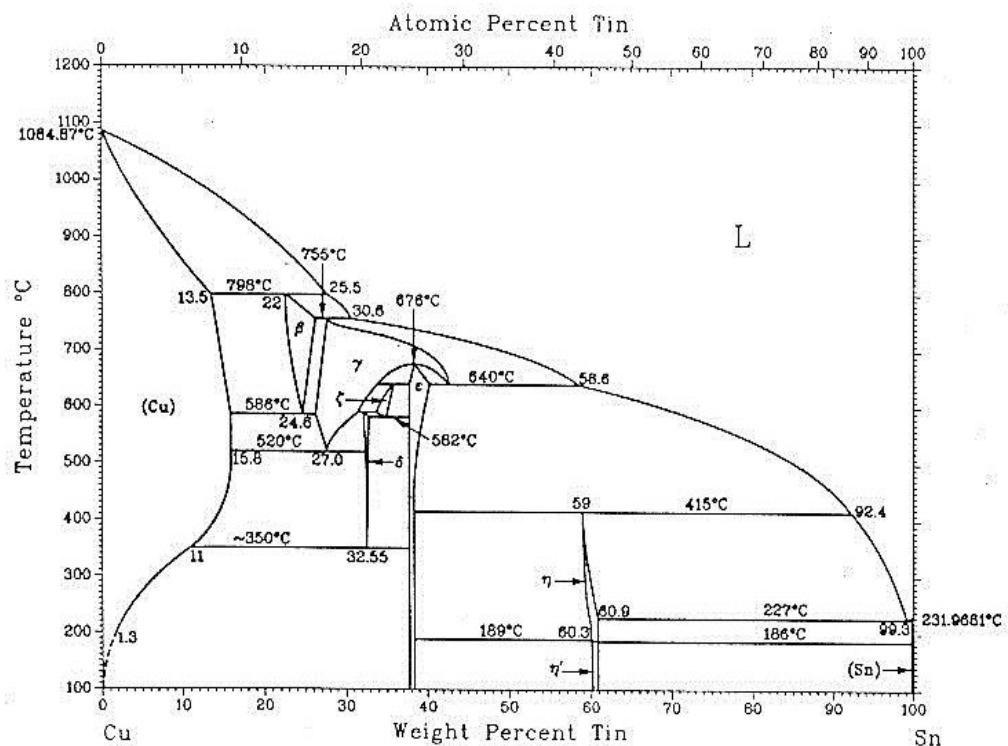
Ag-Sn



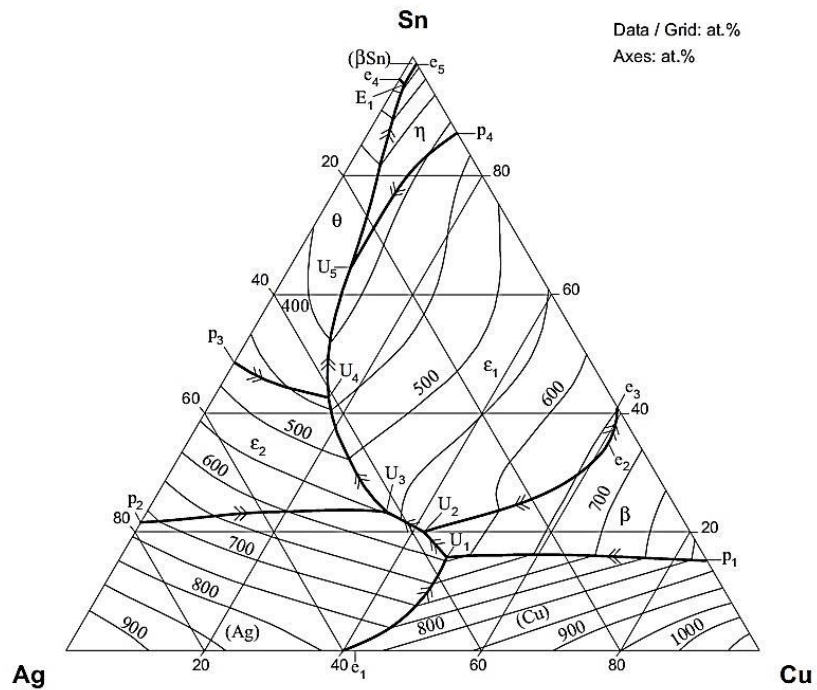
ภาพที่ 2.18 แผนภูมิสมดุคเฟสระบบเงิน - ดีบุก [21]

ภาพที่ 2.19 แสดงแผนภูมิเฟสระบบทองแดง-ดีบุก พบว่าดีบุกสามารถละลายในทองแดงได้ 13.5% โดยน้ำหนัก ได้สารละลายของแข็งเฟสอัลฟา (α phase) ที่อุณหภูมิ 798°C และความสามารถในการละลายจะเพิ่มได้สูงสุดเป็น 16% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 586°C จากนั้นอัตราการละลายของดีบุกในเฟสอัลฟาจะลดลงเป็น 11% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 350°C และลดลงอีกเหลือ 1.3% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200°C

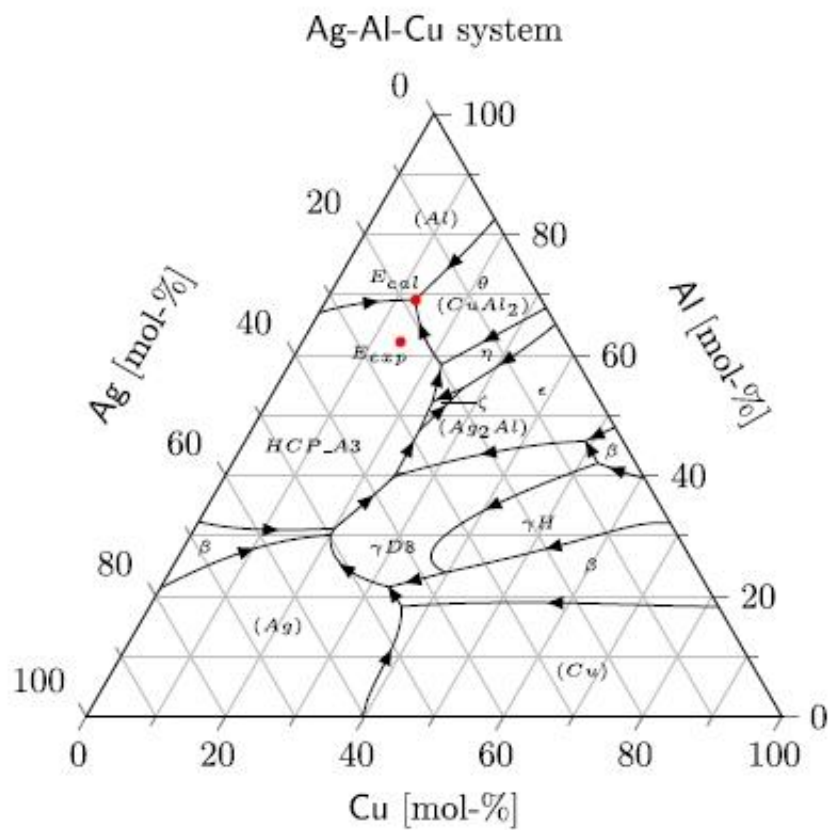
Cu-Sn



ภาพที่ 2.19 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง - ดีบุก [21]

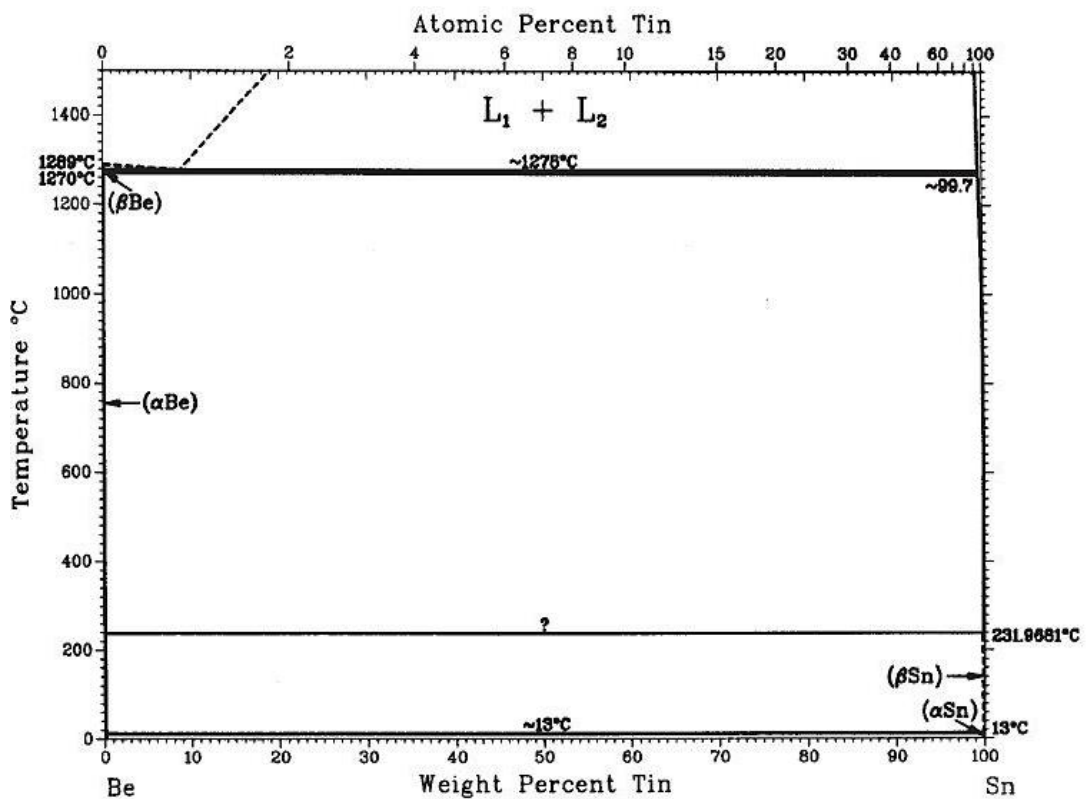


ภาพที่ 2.20 แผนภูมิสมดุลแสดงเส้นลิกวิดัสของระบบเงิน - ทองแดง - ดีบุก [22]



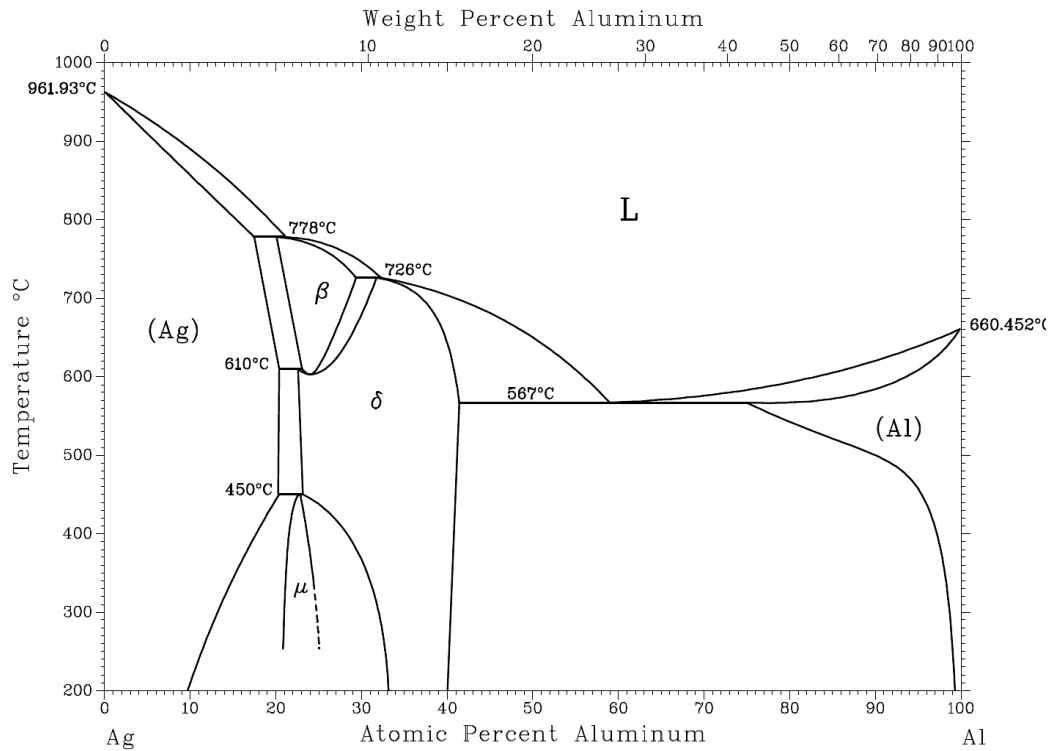
ภาพที่ 2.21 แผนภูมิสมดุลแสดงเส้นลิกวิดัสของระบบเงิน - ทองแดง - อะลูมิเนียม [23]

แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเบริลเลียม-ดีบุก ระบบนี้เป็นแบบโมโนเทคติก (Monotectic) โดยมี Liquid miscibility gap ที่ค่อนข้างกว้างและมีอุณหภูมิโมโนเทคติก (Monotectic) ประมาณ 1276°C (2330°F) ซึ่งไม่มีความสามารถการละลายระหว่างโลหะดีบุกกับโลหะเบริลเลียม แต่เบริลเลียมสามารถในโลหะดีบุกได้ประมาณ 1% ปฏิกริยาบริเวณที่มีดีบุกหนาแน่นอาจจะเกิดปฏิกริยาเพอริเทคติก (Peritectic) ขึ้นได้แต่อุณหภูมิที่เกิดไม่ชัดเจนดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเบริลเลียม - ดีบุก [24]

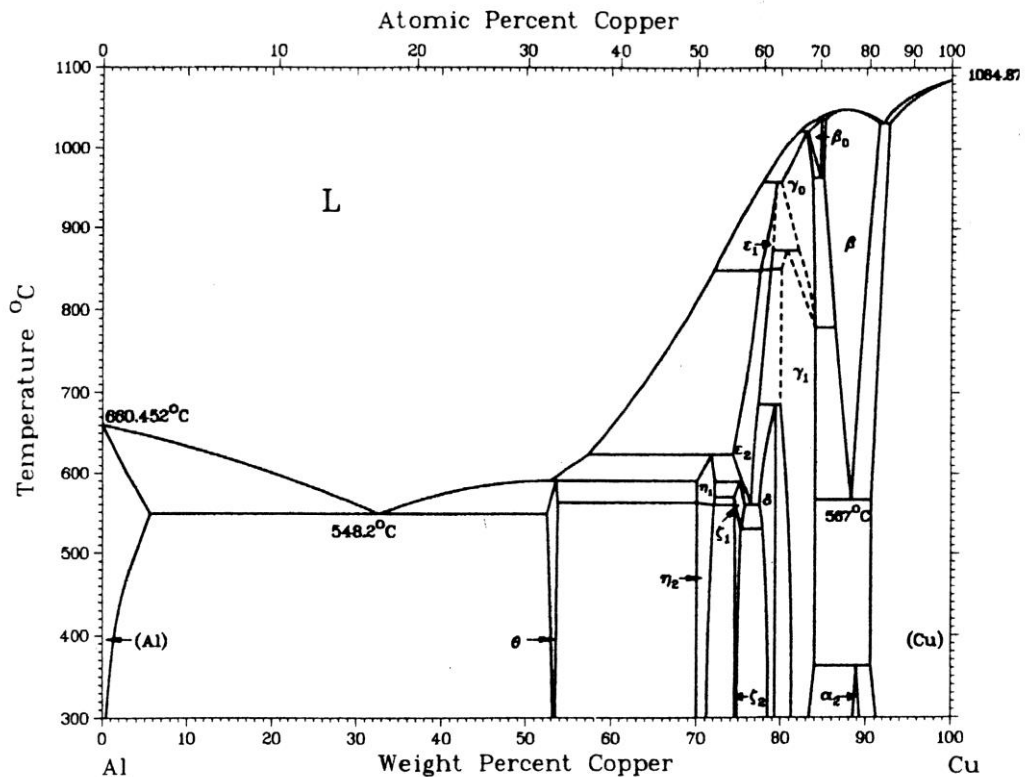
จากภาพที่ 2.23 จะเห็นได้ว่ามีปฏิกริยาที่เกิดขึ้นหลายปฏิกริยาเมื่ออุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โดยบริเวณ Ag rich Solid solution นั้นอะลูมิเนียมมีความสามารถในการละลายได้ปริมาณ 19.5%at ที่อุณหภูมิ 450°C และที่อุณหภูมิ 610°C ปริมาณอะลูมิเนียมละลายได้ 21%at ส่วนเฟสที่ได้หลังจากอุณหภูมิและส่วนผสมเปลี่ยนคือ δ เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 726°C ส่วนเฟส β เสถียรที่อุณหภูมิเหนือ 603°C จนถึง 727°C และยังพบว่าที่อุณหภูมิต่ำเกิดเฟส μ ขึ้นโครงสร้างซับซ้อน โดยจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C จนถึง 448°C ดังแสดง



ภาพที่ 2.23 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน - อะลูมิเนียม [25]

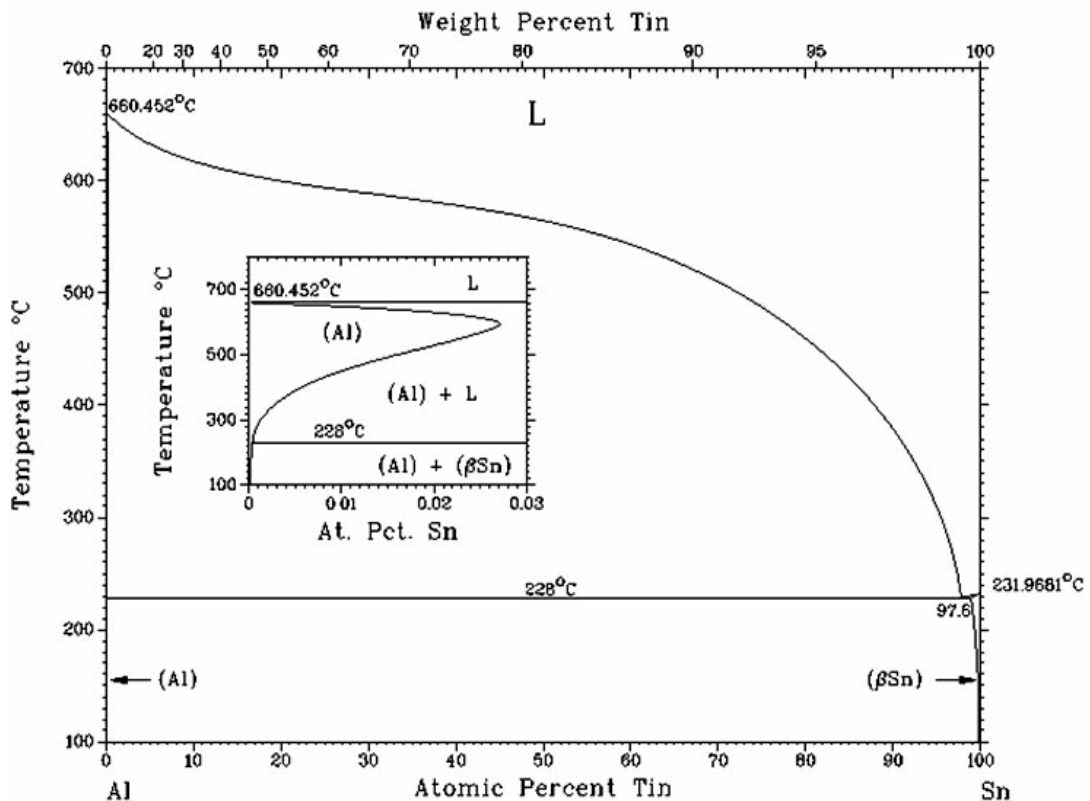
แผนภูมิสมดุลเฟสระบบอะลูมิเนียม-ทองแดง เป็นลักษณะของระบบของยูเทคติกที่ปริมาณของทองแดง 0-60 %wt โดยอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเทคติกเกิดที่ 548.2°C ซึ่งความสามารถของทองแดงที่ละลายได้สูงสุดที่อุณหภูมินี้เช่นกันโดยทองแดงละลายได้ 5.78 %wt และยังเกิดเฟส θ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic) และเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 60%wt แล้วนั้น ปฏิกิริยาและเฟสที่เกิดร่วมกับสารประกอบอื่น ๆ จำนวนมาก จากแผนภาพจะดูค่อนข้างซับซ้อน มีทั้งเฟส α , β , γ , ζ , ε เป็นต้น ตามภาพที่ 2.24

Al-Cu



ภาพที่ 2.24 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบอะลูมิเนียม - ทองแดง [21]

ภาพที่ 2.25 แสดงแผนภูมิ เฟสระบบอะลูมิเนียม-ดีบุก เป็นลักษณะของระบบที่เรียกว่า ยูเทคติก จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 228.5°C โดยมีปริมาณดีบุก 97.6 (%at) ความสามารถในการละลายของดีบุกในอะลูมิเนียมมีอย่างจำกัด พบ Al โครงสร้างเป็น FCC (Faced-center cubic) ร่วมกับเฟส β Sn โครงสร้างเป็น Tetragonal ขณะที่อุณหภูมิต่ำลงเรื่อย ๆ ดีบุกบริสุทธิ์เปลี่ยนแปลงเป็น β Sn (Body-center tetragonal) และเปลี่ยนเป็น α Sn โครงสร้าง Diamond cubic อีกครั้งเมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก ซึ่งความสามารถในการละลายสูงสุดอุณหภูมิ 500°C เป็น 0.011-0.014%at หรือประมาณ 0.05-0.06%wt ของดีบุก



ภาพที่ 2.25 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบอะลูมิเนียม - ดีบุก [21]

2.7 กลไกเพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง

การเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงที่เกิดจากการหล่อ [26] ทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1. กลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากสารละลายของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากขนาดอะตอมที่แตกต่างกันเกิดการแทรกที่ห รือแทนที่ภายในโครงสร้างผลึก ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น เงินผสมทองแดง และเงินผสมอัลลอยทางการค้าทั่วไป แนวโน้มการเติมธาตุผสมเกือบทุกชนิดสนับสนุนการเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งเป็นไปตาม Hume Rothery Rule ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ของขนาดอะตอม ลักษณะโครงสร้างผลึกและ พลังงานพันธะในการสร้างสารละลายของแข็งต่าง ๆ

2. การเพิ่มความแข็งแรงจากผลของขนาดเกรน (Grain size effect) การเพิ่มความแข็งแรงลักษณะนี้เป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ของขอบเกรน ดังนั้นเมื่อขนาดเกรนเล็กลงก็ส่งผลให้มีปริมาณขอบเกรนเพิ่มขึ้น ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ยากขึ้นทำให้

ต้องการออกแรงกระทำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ต่อไป ดังนั้น ความแข็งแรงและความแข็งของโลหะเพิ่มขึ้นนั่นเอง

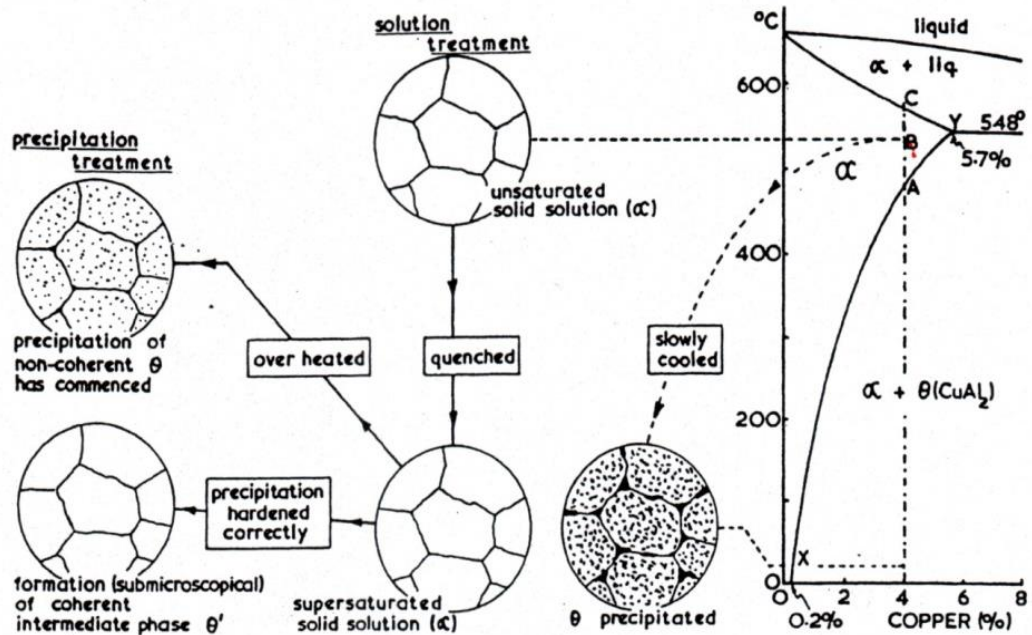
3. การเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) เป็นกลไกที่เกิดจากการตกตะกอนแยกตัวของเฟสที่มีทองแดงสูง (Cu-rich phase) ออกจากเฟสอัลฟา (α Ag-rich phase) เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงในเนื้อเงินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงตามเส้นแสดงความสามารถในการละลายสูงสุด (Solvus line) และหากทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วขณะโลหะกำลังแข็งตัว จะสามารถยับยั้งการตกตะกอนของทองแดงได้ เกิดเป็นสภาวะอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดและเมื่อทำการอบกระดุนหรือบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ก็เกิด Cu-rich phase ที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก

การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน [20] (Precipitation hardening) เป็นการอบชุบความร้อนให้เกิดการตกตะกอนขนาดเล็กในเนื้อพื้น ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการ 3 ขั้นตอน (ในกรณีอะลูมิเนียมผสมทองแดง ภาพที่ 2.26) ได้แก่

ขั้นตอนแรก การอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solution treatment) จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้เพื่อให้เฟส θ ที่อยู่ตามขอบเกรนละลายกลับเข้าไปในเฟส α ทั้งหมด โดยการปฏิบัติในขั้นตอนนี้คือการอบด้วยความร้อนให้อุณหภูมิการอบสูงกว่าอุณหภูมิขีดจำกัดของการละลาย (Solvus temperature) ดังนั้น เนื้อโลหะที่ได้จากการอบจะมีเฟสเดียวและเป็นเฟสสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ (Saturated solid solution) ที่อุณหภูมิดังกล่าว

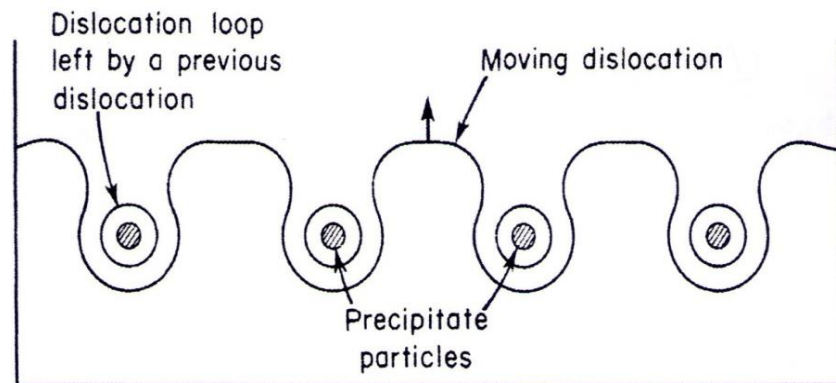
ขั้นตอนที่สอง การชุบอย่างรวดเร็ว (Quenching) ในขั้นตอนนี้เป็นการนำโลหะออกจากเตาที่อุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 แล้วรีบจุ่มในน้ำหรือน้ำเย็น เพื่อให้โลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นการยับยั้งการแพร่ของอะตอมธาตุผสม เกิดสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)

- **ขั้นตอนที่สาม** การบ่มเพิ่มความแข็งแรง (Aging) เนื่องจากโลหะในขั้นตอนที่ 2 เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดซึ่งไม่เสถียร เมื่ออบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้เฟส θ' ตกตะกอนในเฟส α ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่หากบ่มนานเกินไป (Over Aging) จะทำให้ขนาดของ เฟส θ' ใหญ่ขึ้นจนค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นเฟส θ ทำให้ความแข็งแรงและความแข็งลดลงได้

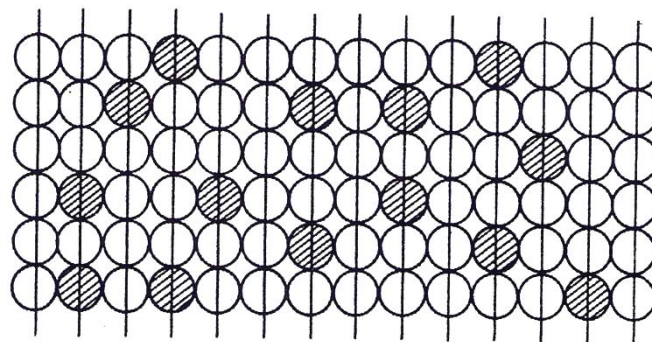


ภาพที่ 2.26 กลไกและโครงสร้างการเย็นตัวของการตกตะกอนของ อะลูมิเนียม – ทองแดง [20]

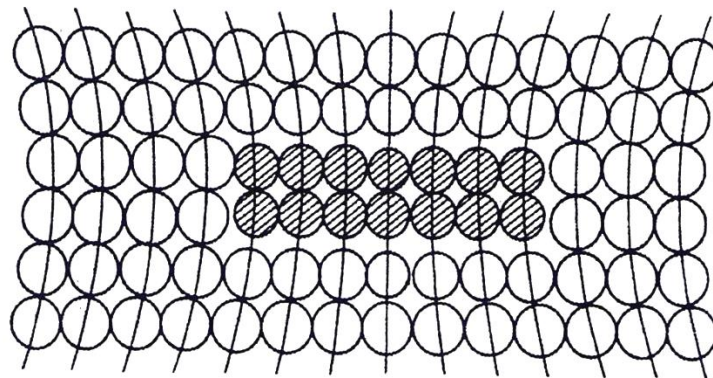
กลไกการเพิ่มความแข็งแรงเป็นผลมาจากการที่ดิสโลเคชัน เคลื่อนที่ลำบากขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของ ดิสโลเคชัน จะเคลื่อนที่ผ่านตะกอน โดยใช้ความเค้นมากกว่าธรรมดา ภาพที่ 2.27 แสดงถึงกลไก Orowan โดยอนุภาคของตะกอนทำหน้าที่คล้าย Frank-Reed source ทำให้เกิด Dislocation loop ขึ้นรอบๆ อนุภาค Dislocation loop มีสนามความเค้นทำให้เส้นดิสโลเคชันวิ่งผ่านไปได้อย่างขึ้น โดยสนามความเค้นรอบๆ ดิสโลเคชันเป็นตัวทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก โดยการเกิดอนุภาคต้องมีความสัมพันธ์กับเนื้อพื้นแบบโคฮีเรนซ์ (Coherency) [27] ภาพที่ 2.28 แสดงถึง Coherency ของอนุภาค โดยภาพ 2.28 (ก) แสดงสภาพสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) โดยอะตอมที่บจะเป็น Solute atoms ส่วนภาพ 2.28 (ข) เป็นอนุภาคที่โคฮีเรนซ์กับเนื้อพื้น จะเห็นว่ามี ความเครียดของแลตทิซเกิดขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดโตขึ้น ทั้งนี้เพราะขนาด Solute atom กับ Solvent atom ไม่เท่ากัน ความเครียดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคนี้อาจเพิ่มขึ้นจนอนุภาคแยกตัวออกมาจากเนื้อพื้น เกิดขอบเกรน ทำให้สูญเสียโคฮีเรนซ์ (Coherency) และก็มีผลทำให้ความเครียดลดลง [23]



ภาพที่ 2.27 การเคลื่อนที่ดิสโลเคชันผ่านผลึกมีอนุภาคของตะกอนโดยกลไกแบบ Orowan [27]



(ก) สภาพของสารละลายอิมิตัวยิ่งยวดในเนื้อพื้น



(ข) อนุภาคของตะกอนรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนอะตอมตัวถูกละลาย (สีดำ) ซึ่งโคฮีเรนต์กับเนื้อพื้น

ภาพที่ 2.28 Coherency ของอนุภาค [27]

2.8 สมบัติกันหมองและสีของโลหะเงินสเตอร์ลิง

ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงนั้น เกิดความหมองขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะเงินกับซัลเฟอร์ หรือสารประกอบที่มีกำมะถัน ตัวอย่างเช่น H_2S , SO_2 , SO_4 , H_2SO_3 การทำปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นจะทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงิน โดยพบว่าสารประกอบหลักจะเป็น Ag_2S นั้นเอง Raub [28] ได้ทำการศึกษา จะพบชั้นฟิล์มของ Ag_2S ที่เป็นสาเหตุของความหมองขึ้นของโลหะเงินได้ ในโลหะที่มีส่วนผสมของเนื้อเงินมากกว่า 83% เท่านั้น โดยฟิล์มของ Ag_2S จะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหมองมากขึ้นเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเขียว จนกระทั่งเป็นสีน้ำตาลดำเข้มในที่สุดขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์ม

งานวิจัยของพรหมมินทร์ เจริญยิ่ง [29] พบว่า การเปลี่ยนแปลงของสีบนผิวของโลหะขณะทำการทดสอบในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์หรือกำมะถันปริมาณความเข้มข้นสูง เมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น สีผิวของชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงต่างกันไป ดังนี้ : สีเนื้อโลหะ (สีขาวใส แฉววาว) → สีเหลืองอ่อน → สีเหลือง → สีเหลืองออกน้ำตาล → สีน้ำตาล → สีน้ำตาลแก่ → สีน้ำตาลอมม่วง → สีม่วงอ่อน → สีม่วงแก่ → สีม่วงอมน้ำเงิน → สีม่วงอมฟ้า → สีฟ้าอ่อน → สีฟ้าอ่อน (ฟ้าขาว) → สีขาวขุ่น → สีเทา → สีเทาดำ → สีดำ → สีดำเข้ม เวลาที่ใช้ในการทดสอบต่างกันจะทำให้มีความเปลี่ยนแปลงของสีแตกต่างกันไป เวลาในการทดสอบมากขึ้น แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของซัลเฟอร์ในบรรยากาศกับผิวชิ้นงานมากขึ้น ผิวชิ้นงานจะสะท้อนแสงได้น้อยลง ค่าความสว่างจะลดต่ำลงมาก เกิดความหมองบนผิวชิ้นงานได้อย่างเห็นได้ชัดเจน เงินสเตอร์ลิงจะมีความหมองได้ง่ายกว่าเงินบริสุทธิ์ภายใต้การใช้งานในสภาวะปกติ

Vinal และ Schramm [30] ศึกษาและพบว่า อัตราการหมองของเงินจะแปรผันตรงกัน ปริมาณของธาตุทองแดงที่ผสมอยู่ในเนื้อโลหะ เนื่องด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของทองแดงกับบรรยากาศที่มีออกซิเจน ทำให้ความหมองเพิ่มมากขึ้นจากออกไซด์ของทองแดง CuO (Cupric Oxide) จะเป็นออกไซด์ที่มีสีเทาดำ และ Cu_2O (Cuprous oxide) เป็นออกไซด์มีสีแดงอมชมพู จึงมีการเติมธาตุผสมเพื่อเพิ่มความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง เพื่อให้มีการสร้างฟิล์มออกไซด์ของธาตุผสมอื่นขึ้นมาทดแทน โดยกลไกการหน่วงทำปฏิกิริยาของเงินกับสารประกอบซัลเฟอร์ เช่น ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี อินเดียม พาลาเดียม และซิลิกอน เป็นต้น

สีเป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ในการอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ และอื่น ๆ

ดังนั้น การวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐาน เพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (Bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น ๆ โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท

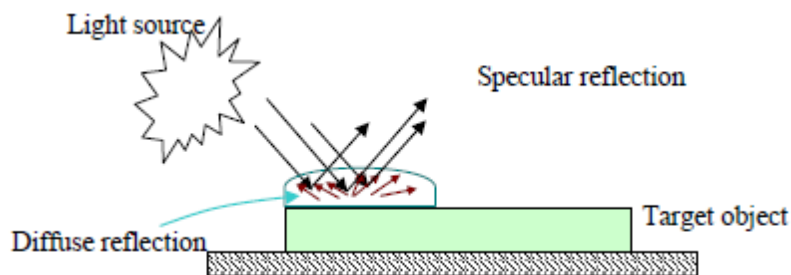
1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสงแตกต่างจากแสงขาว เมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาก่อเกิดสีที่แตกต่างไป เช่น แสงจากหลอด Incandescent จะให้แสงสีส้ม ในขณะที่ Fluorescent จะให้แสงขาวเย็น

2. วัตถุที่มอง (Specimen) วัตถุที่ทึบแสง (Opaque) จะให้การสะท้อนของแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุโปร่งแสง (Translucent) และโปร่งใส (Transparent) ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ

วัตถุทึบแสง ได้รับแสงกระทบจากภายนอก การสะท้อนแสงจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ การสะท้อนแสงเสมือนจริง (Specular reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย (Diffuse reflection) ดังภาพที่ 2.29 การสะท้อนแสงเสมือนจริง คือการสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือนและมีขนาดใกล้เคียงกับแสงตกกระทบแต่ทิศทางตรงข้าม การสะท้อนแสงเสมือนจริงจะแสดงออกมามากที่สุดเพียง 4% ของการสะท้อนแสงทั้งหมด (Total reflection) ซึ่งจะเกิดในกรณีที่วัตถุมีผิวมันเงา 100% ดังนั้น การสะท้อนแสงเสมือนจริงในวัตถุที่มีผิวมันเงาจะมากกว่าวัตถุผิวด้านและผิวขรุขระตามลำดับ ส่วนการสะท้อนแสงกระจายเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณผิวจากวัตถุไปทุกทิศทางและมีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก ซึ่งการสะท้อนแสงกระจายนี้เองเป็นส่วนของการสะท้อนที่ใช้ในการวัดเฉดสี

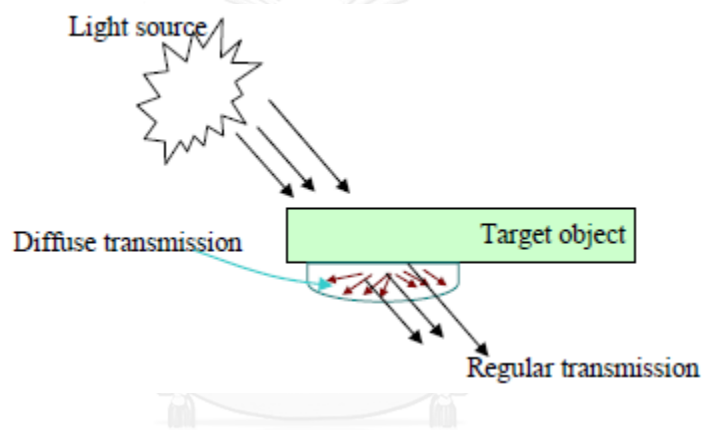
สำหรับวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส (ภาพที่ 2.30) แสงจะทะลุผ่านวัตถุได้แตกต่างกัน วัตถุโปร่งแสงจะมีความขุ่นอยู่ภายในเนื้อ และจะดูดกลืนแสงบางส่วนไว้ สำหรับวัตถุโปร่งใสเนื้อ แสงจะถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุเป็นส่วนใหญ่ การทะลุผ่านแสงมี 2 รูปแบบคือ การทะลุผ่านปกติ (Regular transmission) และ การทะลุผ่านกระจาย (Diffuse transmission) ถ้าวัตถุโปร่งแสงหรือมีความขุ่น เช่น เม็ดพลาสติกขุ่น การทะลุผ่านปกติจะน้อยกว่าวัตถุวัตถุโปร่งใส การวัดสีของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใสนี้จะวัดที่การทะลุผ่านกระจาย ในลักษณะเดียวกับการวัดสีแบบหลักการสะท้อนของแสง

การสะท้อนแสงทั้งหมด (Total reflection) = Specular reflection + Diffuse reflection



ภาพที่ 2.29 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง [31]

การทะลุผ่านแสงทั้งหมด (Total transmission) = Regular transmission + Diffuse transmission



ภาพที่ 2.30 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส [31]

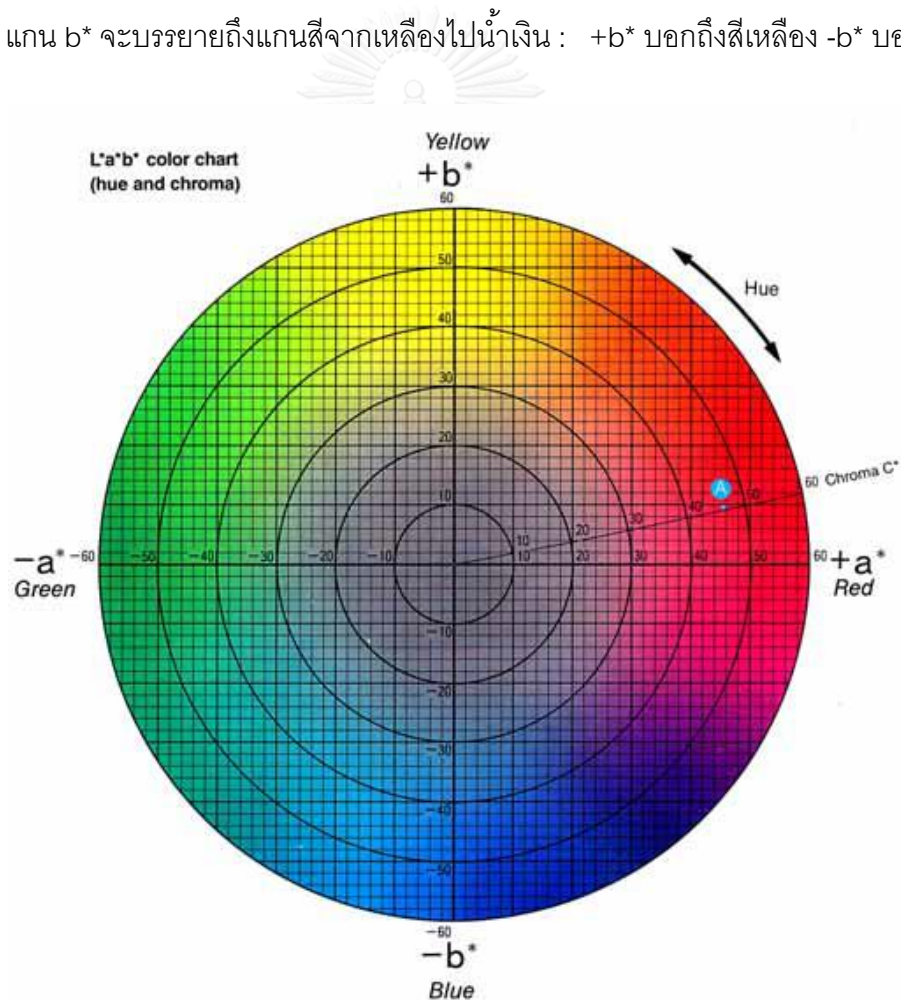
3. ผู้สังเกตการณ์ (Observer) ผู้สังเกตการณ์นั้นมีผลอย่างยิ่งต่อการบรรยายสีที่มองเห็น ผู้สังเกตการณ์ต่างคนจะบรรยายลักษณะสีต่างกัน ขึ้นอยู่กับสรีระทางกายภาพของแต่ละคน ในร่างกายคนจะมีเซลล์อยู่ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการรับสี คือ เซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปโคน เซลล์รูปแท่งจะตอบสนองได้ดีกับการมองเห็นในที่เกี่ยวข้องกับความมืดสว่าง ส่วนเซลล์รูปโคนจะตอบสนองต่อสีที่มองเห็น

จากหลักการพื้นฐานเรื่องสีข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ เพื่อใช้วัดสีที่มีมาตรฐาน และลดความไม่เป็นกลาง เนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสี คือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination มีสำนักงานใหญ่อยู่ในประเทศฝรั่งเศส องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการ

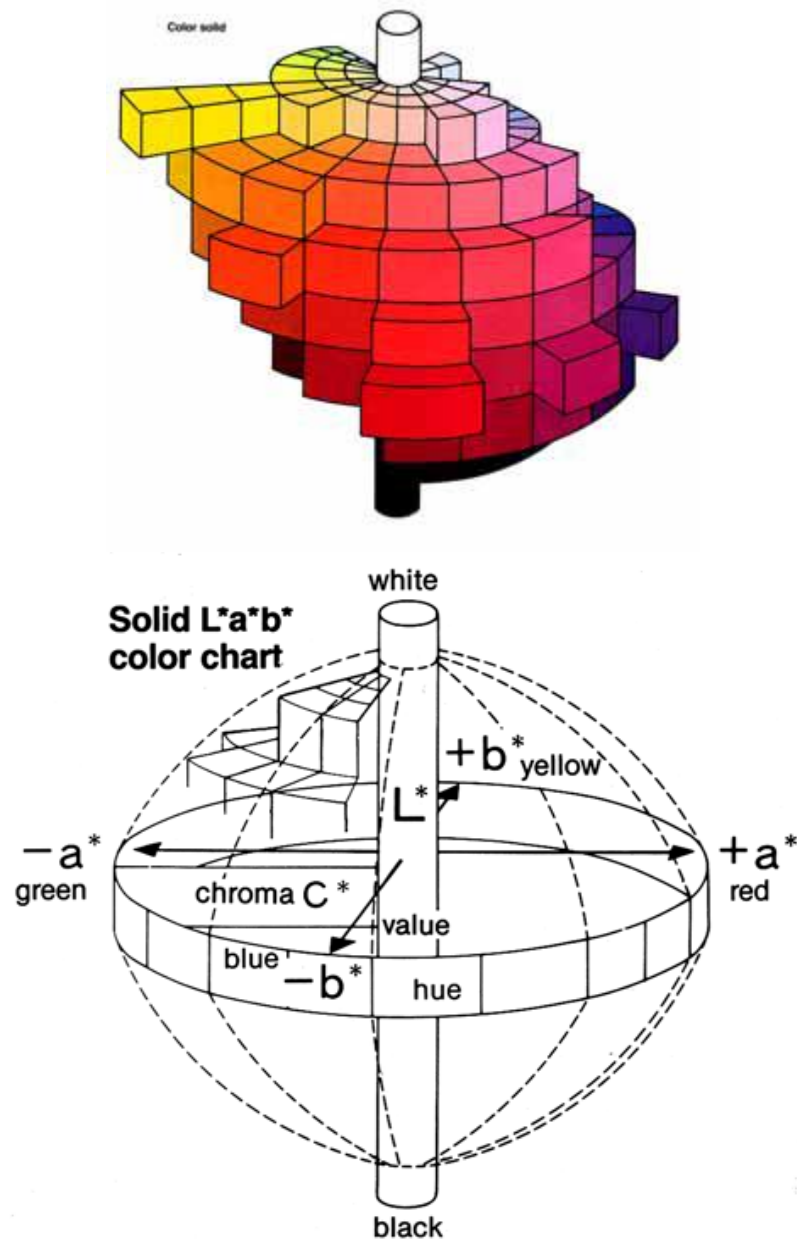
และการวิจัย คือระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (Lightness) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังมีข้อจำกัดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่

แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) : $+L^*$ แสดงถึงสีขาว $-L^*$ แสดงถึงสีดำ
 แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากแดงไปจนถึงเขียว : $+a^*$ บอกถึงสีแดง $-a^*$ บอกถึงสีเขียว
 แกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเหลืองไปน้ำเงิน : $+b^*$ บอกถึงสีเหลือง $-b^*$ บอกสีน้ำเงิน



ภาพที่ 2.31 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี [32]



ภาพที่ 2.32 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ [32]

การเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้จะเป็นดัชนีบ่งบอกถึงความหมองที่เกิดขึ้นบนผิวของวัสดุหรือโลหะผสม โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ สภาวะแวดล้อม บรรยากาศที่เป็นอยู่ ขณะนั้น อุณหภูมิ ความหยาบของผิววัสดุ ความชื้นและโครงสร้างที่เกิดขึ้นของธาตุผสม เนื่องจากความหมองที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างมีความซับซ้อนของการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังนั้น จึงมีคณิตศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องกับการคำนวณการเปลี่ยนไปของสีที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$dE^* = [(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)]^{1/2} \quad (12)$$

| | |
|----------------------|--|
| เมื่อ | $\Delta L = L_2 - L_1$, $\Delta a = a_2 - a_1$, $\Delta b = b_2 - b_1$ |
| โดยค่า L_1 , L_2 | คือ ค่าความสว่างของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการหมอง |
| a_1 , a_2 | คือ ค่าสีแดงและสีเขียวของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ |
| b_1 , b_2 | คือ ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงินของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ |

อุปกรณ์วัดเทียบสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ Spectrophotometer หรือ Spectrocolorimeter อุปกรณ์ดังกล่าว จะใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (Illuminant) คือ แสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (Intensity) หรืออุณหภูมิของสี (Color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (Noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทังสเตน C – แสงกลางวันเฉลี่ย (Average daylight) CWF – แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Cooled white fluorescent) ซึ่ง spectrophotometer บางรุ่นสามารถบอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น X-Y-Z / L-a-b / L*-a*-b* รวมไปถึง CMYK (Crayon Magenta-Yellow-Black) ซึ่งเป็นระบบสีนิยมใช้ในเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์

2.9 มาตรฐานที่มีผลต่อเงินสเตอร์ลิง

ซิลิกอน (Si) การเติมซิลิกอนในปริมาณที่เหมาะสม สามารถปรับปรุงความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านการหมองได้ มีค่าระหว่าง 0.02-0.20 เปอร์เซ็นต์ หากเติมมากเกินไปเกินกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย (Network) อย่างแน่นอนทำให้เปราะ และเกิดการฉีกขาดขณะร้อนได้ง่าย ไม่เหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ [33]

อินเดียม (In) การเติมอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงจะทำให้ความแข็งและความต้านแรงดิ่งลดลง เนื่องจากอินเดียมดึงทองแดงออกจากเนื้อพื้นออกมาเกิดเฟสที่สองขึ้น อินเดียมมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านการหมองร่วมกับธาตุอื่น [33]

ดีบุก (Sn) ธาตุดีบุกมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีความลื่นตัว ซึ่งการเติมธาตุดีบุกในปริมาณต่ำๆ ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงได้โดยการอบบ่ม แต่สภาวะของกรรมวิธีอบบ่ม ถูกรายงานไว้แตกต่างกัน [33]

อะลูมิเนียม (Al) การเติมธาตุอะลูมิเนียม ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แทนการเติมทองแดง จะช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ ที่มีสีหมองคล้ำถึงแดงที่ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้ หากเติมธาตุ

อะลูมิเนียมมากกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้มีสีส้มไม่สวยงาม และยังทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงขึ้นมาก ยากต่อการขึ้นรูปเครื่องประดับด้วยมือ [34]

สังกะสี (Zn) ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหล่อ การประสาน ลดแรงตึงผิว ทำให้งานเต็มแบบได้ดี รายละเอียดชัดและผิวเรียบหลังการหล่อ ลดการเกิดผิวเดนไดรต์ และเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดลง และเพิ่มความสว่างความขาวให้โลหะผสม เนื่องจากอะตอมสังกะสีจะเข้าไปแทนที่อะตอมทองแดงและเงิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของโลหะหลอมเหลวขณะหล่อสังกะสียังถูกนำไปใช้เป็นตัวกันหมองได้ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ธาตุสังกะสียังทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ (Flux) และตัวลดการเกิดออกซิไดซ์ (Deoxidizer) ในการหล่อหลอม ลดการกักเก็บฟองก๊าซในเนื้อเงิน อย่างไรก็ตามการใช้สังกะสีผสมในเนื้อเงินมากเกินไปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีสะท้อนของผิวเงินจากขาวสว่างในเงินผสมทองแดงเป็นเงินสีขาวประกายเหลือง และเกิดคราบเหลืองที่ผิวได้ง่ายในชิ้นงานที่ใช้งานมาระยะหนึ่ง [35]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ใน European Patent No.399,261, Oesterheld [36] ได้ศึกษาระบบของเบริลเลียม-เงิน และ เบริลเลียม-ทองแดง พบว่าในระบบเบริลเลียม-เงินที่มีปริมาณเบริลเลียมน้อยจะช่วยต้านทานการหมองและสัดส่วนของเบริลเลียม 3% จะช่วยต้านทานไอของซัลเฟอร์ นอกจากนี้ ความเหนียว (Ductility) ของโลหะผสมจะลดลงเมื่อปริมาณเบริลเลียมเพิ่มขึ้น เงินผสมเบริลเลียม 3-5% เมื่อนำไปรีดจะเปราะมากและเงินผสมเบริลเลียมที่มีส่วนผสม 90%Ag, 1.5%Be, 8.5%Cu ที่อุณหภูมิ 880°C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ส่วนผสมเบริลเลียม 1% เมื่อปริมาณเบริลเลียมมากกว่า 1.5% ความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็งเบริลเลียมในเงินจะลดลง ทำให้ปฏิกิริยายูเทคติกเกิดขึ้นที่ 0.3%Be และอุณหภูมิของปฏิกิริยายูเทคติกจะลดต่ำลง อีกทั้งสารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูงจะแยกตัว หากขนาดและปริมาณเพียงพอจะทำให้เกิดรอยต่าง (Mirror-like) ซึ่งเป็นเหตุผลในการจำกัดปริมาณเบริลเลียมในระบบสามส่วนที่มีส่วนผสมของโลหะเงินไม่น้อยกว่า 90% ความสามารถในการละลายของเบริลเลียมและการเริ่มแยกตัวของสารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูง จะไม่แตกต่างกับแบบสองส่วนผสมซึ่งเป็นความจริงเฉพาะในกรณีของโลหะผสม Ag-Cu-Be มาตรฐานการค้าของโลหะเงินที่ผสมเบริลเลียม 1.5% กำหนดว่าต้องมีโลหะเงิน 92.5% ส่วนที่เหลือคือทองแดงดังนั้นมาตรฐานของโลหะเงินผสมที่ใช้ทำเครื่องประดับควรมีเงิน 92.5% 7%Cu และ 0.5%Be สำหรับการขึ้นรูปควรเงินที่มีส่วนผสมเบริลเลียมเล็กน้อย จะทำเหมือนกับโลหะเงินปกติที่ไม่มีเบริลเลียมผสม โดยไม่ต้องอบบ่ม หรืออบอ่อนอีก ในการผลิตโลหะ

ผสมมักเติมเบริลเลียมในรูปโลหะผสม Cu-Be โลหะผสม Ag-Cu-Be มีคุณสมบัติหลอมเหลว และสมบัติการหล่อจะเหมือนกับโลหะผสมไม่มีเบริลเลียม สิ่งที่ยากในการผลิตเพื่อการค้าของโลหะผสมเบริลเลียมคือการเกิดออกซิเดชันของเบริลเลียม โดยเฉพาะการนำเศษวัสดุมาหลอมใหม่ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของออกไซด์มากับเศษวัสดุ ซึ่งจะลอยขึ้นมาด้านบนยากต่อการควบคุม ส่วนผสมให้ถูกต้องได้ สำหรับโลหะผสม 0.5%Be จะควบคุมส่วนผสมได้ง่ายที่สุด

ใน U.S. Patent No. 1,984,225, Mcfarland [37] ได้ศึกษาถึงการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะเงินสเตอร์ลิงโดยการอบบ่ม พบว่าการเติมโลหะในกลุ่มตกตะกอนได้เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ตะกั่ว พลวง และเบริลเลียม ในปริมาณ 0.1-0.5% โดยทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวที่ อุณหภูมิ 593-760°C และบ่มเพิ่มความแข็งแรง (Age Hardening) ที่อุณหภูมิ 298°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเพิ่มความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงจาก 80 HR_B เป็น 94 HR_B ในการศึกษาเรื่องนี้อาจเกิดความผิดพลาดในช่วงการอบชุบความร้อนโดยปกติความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 1-1.5 เท่าของสภาพหลังหล่อ (As-cast condition) และอาจเกิดจากการใช้ธาตุผสมหลายชนิดทำให้เกิดยับยั้งการตกตะกอน หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอื่น กั้นการตกตะกอนให้เนื้อเงินได้

เบริลเลียมนอกจากเพิ่มสมบัติทางกล เหมาะแก่การผลิตสปริงแล้ว ยังเพิ่มความต้านทานการหมอง U.S. Patent No. 2,031,113, Robert H. Leach [38] ค้นพบการเติม Be 0.5% ในเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีธาตุร่วมเช่น ทองแดง แคดเมียม ดีบุกและสังกะสี เพิ่มความต้านทานการหมอง นอกจากนี้ U.S. Patent No. 2,196,303 [39] กล่าวถึง เบริลเลียมเป็นธาตุผสมที่ใช้ผลิตเงินที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าสูง (Superior electrical characteristic) ข้อมูลสรุปสำหรับการเติมเบริลเลียมและธาตุอื่นที่ส่งเสริมสมบัติทางกลด้วยการอบชุบความร้อนเป็นดังตารางที่ 2.4 จากการศึกษาของ ผศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์ และคณะ [40] พบการเติมดีบุกในเงินกลุ่มสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม เงิน 93.7 % ทองแดง 6 % ดีบุก 0.3 % สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการอบเนื้อเดียวที่ 740 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส โดยมีความแข็งแรงหลังหล่อ 72 วิกเกอร์ และความแข็งแรงหลังการอบบ่ม 167 วิกเกอร์

ตารางที่ 2.7 แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมของธาตุผสมเพิ่มสมบัติทางกลด้วยการอบชุบความร้อน

| สิทธิบัตร | รายละเอียด |
|----------------------------|--|
| European Patent No.399,261 | เงิน 90% เติม Be 3-5 % ลดการหมอง และช่วยต้านทานไอซัลเฟออร์ |
| U.S. Patent No. 1,984,225 | เงิน 92.5% เติม Al, Mg, Pb, Sn, Be สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบชุบความร้อน |
| U.S. Patent No. 2,031,113 | เงิน 92.5% เติม Be (0.5%) Cd, Sn, Zn มีความต้านทานการหมองสูงขึ้น |
| U.S. Patent No. 2,196,303 | เงินผสม Cd, Zn, Sn, Mg, Ni, P, Si, Mn, Be และ Ca ใช้ผลิต Solder และ Electrical contact ธาตุผสมไม่ลด Electrical conductivity |
| U.S. Patent No. 4,810,308 | เงินผสม Li, Cu, Sn, Sb, In, Al, In สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบบ่มโดย Solution treatment ที่ 1250 °F และบ่มที่ 300-700 °F |
| U.S. Patent No. 1,928,429 | อธิบายการอบเงิน 50-90% ผสม Be 0.1-2.5% |
| U.S. Patent No. 4,869,757 | เงินผสม Li, Cu, Sn, Bi สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบบ่มโดย Solution treatment ที่ 1250 °F และบ่มที่ 300-700 °F |
| US Patent No. 6,139,652 | ธาตุที่นิยมเติม เช่น Al, Sb, Cd, Si, Ti, Zn ซึ่งบางตัวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงโดยการอบชุบความร้อน |

ใน US Patent No. 6,139,652 จากการศึกษาของ Carrano [41] พบว่า เงินสเตอร์ลิงจำเป็นต้องมีฟิล์มออกไซด์ของธาตุอย่างน้อย 1 ชนิดขึ้นไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมองที่มักเกิดจากออกไซด์ของทองแดงที่มักผสมเป็นธาตุหลัก โดยธาตุที่นิยมเติมได้แก่ อะลูมิเนียม พลวง แคดเมียม ซิลิคอน ไทเทเนียม สังกะสีและธาตุที่กล่าวมาบางตัวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงโดยการอบชุบความร้อน

จากงานวิจัยของ Carrano R. [35] รายงานว่าการเติมธาตุผสมในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเงินสเตอร์ลิงได้ เช่น สังกะสี (Zn) และซิลิคอน (Si) ช่วยเพิ่มความสามารถในการหล่อได้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่ไม่เหมาะสม ก็จะทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา การเติมเจอร์มาเนียม (Ge) และ Zn เข้าไปในโลหะเงินสเตอร์ลิงช่วยทำหน้าที่เป็นตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer) ที่ดี การเติม Zn ปริมาณ 1-2% ช่วยทำให้ผิวเรียบสวยงามขึ้น โดยลดข้อบกพร่องที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ผิวโลหะทำกับปูนที่ใช้เป็นแบบ และทำให้ผิวเงาขึ้น

ใน U.S. Patent 4,124,380, Youdelis [42] ได้จดสิทธิบัตรส่วนผสมของในโลหะเงินสเตอร์ลิง และรายงานธาตุ Ge และ Sn ช่วยป้องกันความหมองได้ดีในบรรยากาศธรรมดา สำหรับ Si ใช้เป็นตัวลดออกซิเจนช่วยทำให้ผิวเงาขึ้น เนื่องจากมีแรงดึงผิวเกิดขึ้น ทำให้ผิวเงา

สวยงาม การเติมธาตุ Si ปริมาณสูงจะทำให้เกิดเฟส Cu-rich จับตัวกันอยู่ตามขอบเกรนมากขึ้น ทำให้เปราะและแตกหักได้ง่ายขึ้น ธาตุผสมใด ๆ อาจส่งทั้งผลดีและผลเสียให้กับสมบัติของเงินสเตอร์ลิงขึ้น กับปริมาณที่ผสม

งานของ Croce Scott M [43] การเติมปริมาณธาตุอื่น ๆ ลงในโลหะเงินผสมสำหรับงานวิจัยนี้มีการกำหนดเพื่อการใช้งานที่ดีที่สุดสำหรับโลหะ โดยมีปริมาณเงินอย่างน้อยประมาณ 85% ถึง 95% และยังมีธาตุสังกะสี, ทองแดง, อินเดียม, ดีบุก อาจจะมีปริมาณเหล็กจำนวนเล็กน้อยผสมตามตาราง 2.8

ตารางที่ 2.8 เป็นปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ควรจะมีอยู่ในโลหะผสมเงินงานวิจัย Croce Scott M ซึ่งโลหะต่างๆ เหล่านี้เพิ่มลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของโลหะผสม [43]

| Element | Range of Weight Percent |
|----------------|-------------------------|
| Silver (Ag) | 85% to 95% |
| Zinc (Zn) | >0% to 5% |
| Copper (Cu) | >0% to 2% |
| Indium (In) | >0% to 1% |
| Tin (Sn) | >0% to 2% |
| Iron (Fe) | 0% to 1% |
| Gold (Au) | 0% to 2% |
| Silicon (Si) | 0% to 0.1% |
| Manganese (Mn) | 0% to 0.1% |
| Boron (B) | 0% to 0.1% |
| Bismuth (Bi) | 0% to 0.1% |
| Cobalt (Co) | 0% to 0.1% |
| Chromium (Cr) | 0% to 0.1% |
| Lead (Pb) | 0% to 0.1% |
| Vanadium (V) | 0% to 0.1% |
| Cerium (Ce) | 0% to 0.1% |
| Iridium (Ir) | 0% to 0.1% |
| Zirconium (Zr) | 0% to 0.1% |

ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมของธาตุแต่ละธาตุจะเพิ่มประสิทธิภาพหรือความสามารถในแต่ละด้านแตกต่างกันออกไปตามการใช้งาน โดยสังกะสีจะเพิ่มความขาวของโลหะผสมหรือป้องกันการหมองแก่ขึ้นงาน, ทองแดงทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการชุบแข็งและเพิ่มความอ่อนนุ่มให้แก่โลหะผสม, อินเดียมเพิ่มความสามารถด้านกันหมอง เพิ่มความแวววาวหรือความเป็นประกาย เพิ่มความเหนียวและทำให้การการหล่อโลหะผสมทำได้ง่าย, ดีบุกเพิ่มความสามารถในความแข็ง

ความเหนียว(ความสามารถขึ้นกับปริมาณและกรรมวิธีการให้ความร้อน) และเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานของโลหะผสม ส่วนเหล็กจะเพิ่มความแข็งของโลหะผสม พบว่าโลหะผสมที่ได้จากการทดลองนี้ยังคงมีสีที่สวยงามและสามารถต้านทานความหมองได้ดีจากช่วงปริมาณส่วนผสมของธาตุตามตาราง ซึ่งพบว่าทองแดงเป็นธาตุที่สำคัญในการส่งผลต่อความแข็งจึงมีการควบคุมและเปลี่ยนปริมาณทองแดงเพื่อดูความแตกต่างของชิ้นงาน การลดปริมาณทองแดงลงส่งผลต่อการป้องกันความหมองของโลหะเงินน้อยมาก และความแข็งก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้จึงสรุปว่าปริมาณทองแดงใช้ที่ปริมาณต่ำกว่า 1.5% โดยน้ำหนัก

ส่วนธาตุผสมอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการป้องกันการหมองของโลหะเงินที่จะนำไปทำเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิงโดยการอัดขึ้นรูป (Extruded metal) ควรจะใช้ปริมาณของเงิน 92-95%, สังกะสี 2-5%, ทองแดง 1-1.5% และอินเดียม 0.05-0.2% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณธาตุผสมที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความสามารถในด้านกันหมองของโลหะผสมเงินสำหรับโลหะอัดขึ้นรูปที่ใช้ในเครื่องประดับ [43]

| Element | Preferred Weight % |
|----------------|--------------------|
| Silver (Ag) | 94.848 |
| Zinc (Zn) | 0.5 |
| Copper (Cu) | 1.25 |
| Indium (In) | 0.10 |
| Tin (Sn) | 0.5 |
| Iron (Fe) | 0.005 |
| Gold (Au) | 0.2500 |
| Silicon (Si) | 0.035 |
| Manganese (Mn) | 0.001 |
| Boron (B) | 0.001 |
| Bismuth (Bi) | 0.002 |
| Cobalt (Co) | 0.0015 |
| Chromium (Cr) | 0.0005 |
| Lead (Pb) | 0.002 |
| Vanadium (V) | 0.001 |
| Cerium (Ce) | 0.001 |
| Iridium (Ir) | 0.001 |
| Zirconium (Zr) | 0.001 |

Peter Gamon John [44] โลหะผสมได้ทำการทดลองเป็นโลหะเงินผสมโดยมีเงินอย่างน้อย 77% โดยน้ำหนัก มีทองแดงและปริมาณของเจอร์เมเนียมที่มีประสิทธิภาพในการลดฝ้า (Fire stain) และป้องกันการหมอง ปริมาณของเจอร์เมเนียมต่ำสุดจะใช้ที่ปริมาณ 0.5% โดย

น้ำหนักร ในทางปฏิบัติจะใช้น้อยกว่า 1% โดยน้ำหนักร แต่ผู้วิจัยพิจารณาว่าเป็นปริมาณไม่เหมาะสม ควรจะใช้ปริมาณ 1-1.5% จะดีกว่า ซึ่งอาจจะมีการเติมสังกะสีเพื่อไปใช้ทำหน้าที่แทนทองแดงก็ได้ หรือส่วนผสมสำคัญที่สามารถนำมาใช้แทนทองแดงได้นอกจากสังกะสี (เช่นเพิ่มปริมาณได้ถึง 1% โดยน้ำหนักร หรือ 0.5% โดยน้ำหนักร) อาจจะเป็น ทอง, แพลเลเดียม และแพลทตินัม หรือผสมส่วนผสมอื่น ๆ เช่น อะลูมิเนียม, แบเรียม, เบริลเลียม, แคดเมียม, โคบอลต์, โครเมียม, เฮอร์เบียม, แกลเลียม, อินเดียม, แมกนีเซียม, แมงกานีส, นิกเกิล, ตะกั่ว, ซีลีคอน, ดีบุก, ไทเทเนียม, วานาเดียม, อิตเทรียม, อิตเทอร์เบียม และเซอร์โคเนียม เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีลีคอนสามารถเติมลงในโลหะเงินผสมได้ถึง 0.5% โดยน้ำหนักร แต่ทั่วไปจะใช้ 0.05-0.3% แต่ที่นิยมใช้กันจะมีปริมาณ 0.1-0.2% โดยน้ำหนักร และเพื่อความสะดวกมีการผลิตออกมาในรูปแบบของมาสเตอร์อัลลอยทองแดง-ซีลีคอน เช่นมีปริมาณ 10% ซีลีคอน หรืออาจจะมีการหล่อแล้วหดยืดเป็นลักษณะของโลหะเงินผสม-ทองแดง-เจอร์เมเนียม และนอกจากเงิน, ทองแดง, เฮอร์เมเนียมและสังกะสีแล้ว โลหะผสมอื่น ๆ สามารถทำให้เกรนเล็กลงได้โดยไม่ให้เกิดอาการเกรนโตได้ในขณะกระบวนการผลิตโลหะผสม ธาตุที่ส่งผลโดยตรงกับการปรับปรุงลักษณะของเกรนประกอบไปด้วยโบรอน, อิริเดียม, เหล็ก และนิกเกิล ซึ่งโบรอนจะเป็นธาตุที่ส่งผลดีที่สุดต่อการปรับปรุงลักษณะของเกรนให้มีขนาดเล็ก

Bernhard และ Sivertsen [45] ศึกษาโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุสำคัญอื่น ๆ ประกอบด้วย : เงินประมาณ 92.5% ทองแดง 2.625% สังกะสี 4.25% อินเดียม 0.02% ดีบุก 0.48% โบรอน 0.025% และซีลีคอน 0.1% ซึ่งเงินสเตอร์ลิงที่ส่วนผสมนี้แสดงคุณสมบัติที่ดีเนื่องจากลดฝ้าที่เกิดขึ้นลง (Fire scale) อีกทั้งเมื่อนำโลหะผสมมาหล่อใหม่ (Recast) ยังสามารถลดความพรุนและขนาดของเกรนลงได้ และเมื่อทำการปรับปรุงส่วนผสมของโลหะเงินอีกซึ่งปริมาณธาตุประกอบด้วยโลหะเงินบริสุทธิ์ประมาณ 89-93.5% ซีลีคอน 0.1-2% โบรอน 0.001-2% สังกะสี 0.5-5% ทองแดง 0.5-6% ดีบุก 0.25-2% และอินเดียมประมาณ 0.01-1.25% ปริมาณทั้งหมดเป็นปริมาณโดยน้ำหนักร ในส่วนผสมดังกล่าวซีลีคอนทำหน้าที่เป็นตัวดีออกซิแดนซ์ (Deoxidant) ทำให้ลดปริมาณรูพรุนของโลหะผสมที่ทำการหล่อซ้ำ และมีผลต่อการชุบแข็งเล็กน้อย โบรอนที่เพิ่มเข้าไปเพื่อลดแรงตึงผิวของโลหะผสมขณะหลอมเหลวทำให้น้ำโลหะกลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน สังกะสีเพิ่มเพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสม, เพิ่มความขาว, ทำหน้าที่ทดแทนทองแดง, ยังเป็นตัวดีออกซิแดนซ์ (Deoxidant) และเติมเพื่อปรับปรุงการไหลของโลหะผสม โดยทั่วไปการเติมทองแดงนั้นเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่เงินเหมือนกับการเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุอื่น ๆ ดีบุกเติมลงไปเพื่อต้านทานการหมองและส่งผลต่อการชุบแข็ง อินเดียมเป็นตัวทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียด

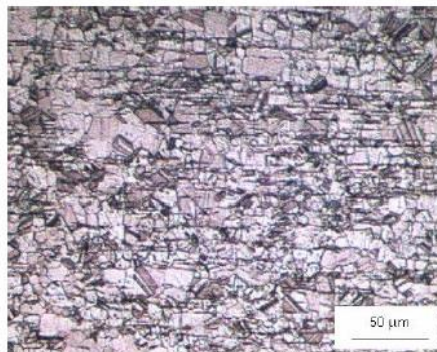
และปรับปรุงความสามารถในการเปียก (Wettability) ของโลหะผสม ซึ่งปริมาณของธาตุขึ้นอยู่กับการต้องการผลิตเป็นเงินเหรียญหรือเงินสเตอร์ลิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม ซึ่งธาตุผสมที่อยู่ในช่วงดังกล่าวมานั้นเมื่อถูกนำไปหล่อเพื่อที่จะผลิตชิ้นงานสามารถพบผ้าได้ แต่ข้อดีคือสามารถลดอัตราของปริมาณรูพรุน และขนาดเกรนของชิ้นงานได้

Hensel, Emmert และ Wiggs [46] ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การนำไฟฟ้า ของโลหะผสม และเพื่อให้โลหะหลอมเหลวมีสมบัติการไหลในที่ดีในสภาพหลอมเหลวสามารถหล่อรูปร่างต่าง ๆ ที่ซับซ้อนมาก ๆ ได้ และเพื่อปรับปรุงสมบัติเปียกบนวัสดุ (Wetting characteristics) เมื่อใช้เป็นเงินประสาน (Silver solder) และยังมีการศึกษาธาตุผสมอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากเงิน คือ เบริลเลียมและลิเทียม โดยศึกษาธาตุผสมในการผลิตชิ้นงานในปริมาณช่วงลิเทียม ประมาณ 0.002-1% , เบริลเลียม 0.1-5% และเงินคือส่วนที่เหลือ ซึ่งผลที่ได้จากการเติมลิเทียม คือ ไม่เกิดการออกซิไดซ์ (Deoxidize) กับโลหะเงินหลอมเหลวและไม่เกิดสิ่งสกปรกอื่น ๆ ที่เป็นอันตราย ส่วนหนึ่งของลิเทียมจะถูกกำจัดพร้อมกับสิ่งสกปรกอื่น ๆ และลิเทียมส่วนที่เหลือจะหลอมละลายพร้อมกับเงินซึ่งไม่เกิดการรวมเป็นออกไซด์ การเติมลิเทียมลงไปเป็นการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของโลหะขณะหลอมเหลวโลหะเงินผสมที่อุณหภูมิสูง หรือช่วงที่มีไอน้ำโลหะ(อากาศจะเข้าทำปฏิกิริยา) ซึ่งถือว่าการหล่อในการทดลองนี้เป็นที่หล่อที่สะอาดมาก (ลิเทียมส่งผลป้องกันการปฏิกิริยาออกซิเดชัน)

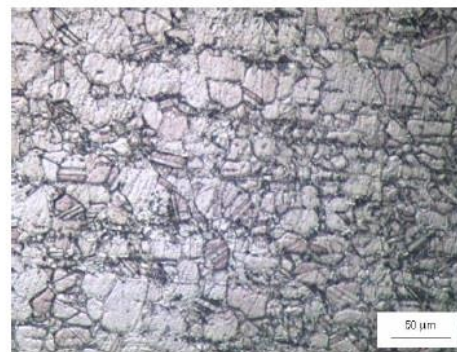
Leach [47] โลหะผสมใหม่ที่ถูกทดลองโดยมีปริมาณโลหะเงินเป็นส่วนใหญ่ตั้งแต่ประมาณ 90-99.5% โดยน้ำหนัก มีการเพิ่มปริมาณของเบริลเลียมน้อย ๆ ตั้งแต่ประมาณ 0.10%-1.75% และปริมาณของโลหะผสมอื่น ๆ เช่น ทองแดง ดีบุก สังกะสี และแคดเมียม อาจจะใช้เพียงอย่างเดียวหรือผสมรวมกัน พบว่าเบริลเลียมในช่วงของปริมาณที่ที่ระบุนี้ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงินผสมดีขึ้น ทั่วไปปริมาณของเบริลเลียมที่ใช้จะไม่เกิน 1.75% ไม่ควรจะมีมากกว่านี้ ซึ่งการเติมปริมาณเบริลเลียม 0.5% จะมีผลดีต่อการป้องกันการหมอง โดยการเพิ่มปริมาณเบริลเลียมมากขึ้นส่งผลให้โลหะผสมที่ได้จะมีแนวโน้มเปราะขึ้น ยังทำให้พื้นผิวของโลหะแผ่นที่ผ่านการรีดนั้นหยาบขึ้นและขัดยากขึ้นอีกด้วย ส่วนใหญ่จะใช้เบริลเลียมในการผสมประมาณ 0.5% หรือน้อยกว่านั้นจะเหมาะสมที่สุด

สิริพร โรจนนันต์ และคณะ [40] ได้ศึกษาอิทธิพลของการอบบ่มที่มีผลต่อโครงสร้างและความแข็งของเงินสเตอร์ลิง ซึ่งทำโดยหลอมธาตุบริสุทธิ์ แล้วหล่อชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn นำชิ้นงานไปรีดขึ้นรูปเย็น จากนั้นทำการอบผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยการผ่าน

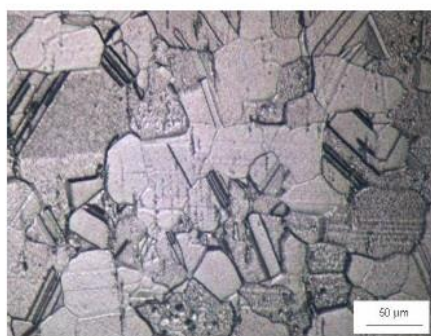
การอบเนื้อเดียว (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 720-760°C แล้วทำการอบบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 260-320°C เพราะถ้าหากใช้อุณหภูมิอบเนื้อเดียวต่ำกว่า 730°C จะทำให้ไม่สามารถละลายเฟส Cu-rich ได้หมด ส่งผลให้หลังการอบบ่มแล้วจะไม่ได้ความแข็งสูงสุด ส่วนการอบเนื้อเดียวด้วยอุณหภูมิ 800°C พบว่าเกรนโตเกินไป ทำให้ได้สมบัติไม่ดีนัก จากโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อพบว่า มีลักษณะเป็นเดนไดรต์เฟสอัลฟาของเงิน (α -Ag phase) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic) อยู่ในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic dendrite) ความแข็งเฉลี่ยมีค่า 72 วิกเกอร์ โครงสร้างและความแข็งของชิ้นงานหลังการอบบ่มขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการอบเนื้อเดียวและอบบ่ม โดยสามารถสรุปได้ว่า สภาวะการอบบ่มที่ทำให้ได้ความแข็งสูงสุด ควรใช้ อุณหภูมิการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 740°C เวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการอบบ่มแข็งที่ 300°C เวลา 1 ชั่วโมง ได้ความแข็งสูงสุดมีค่า 167 วิกเกอร์



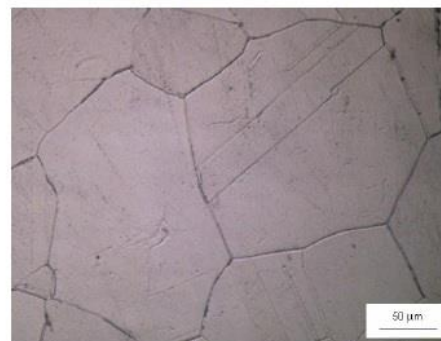
ก) อบละลายเฟสที่ 720 องศาเซลเซียส



ข) อบละลายที่ 730 องศาเซลเซียส

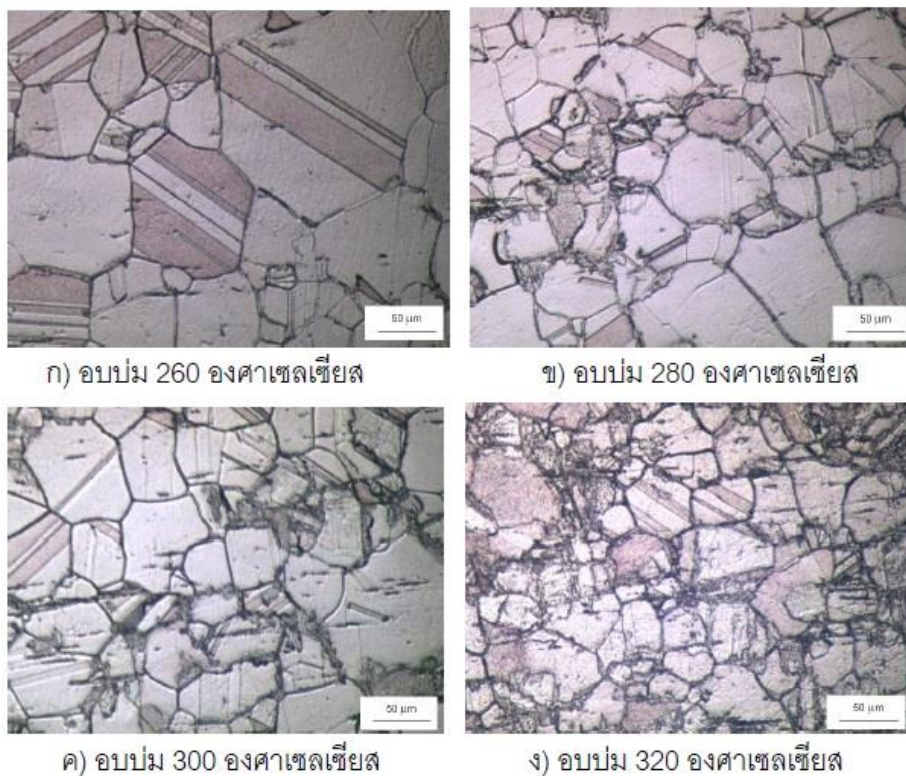


ค) อบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส



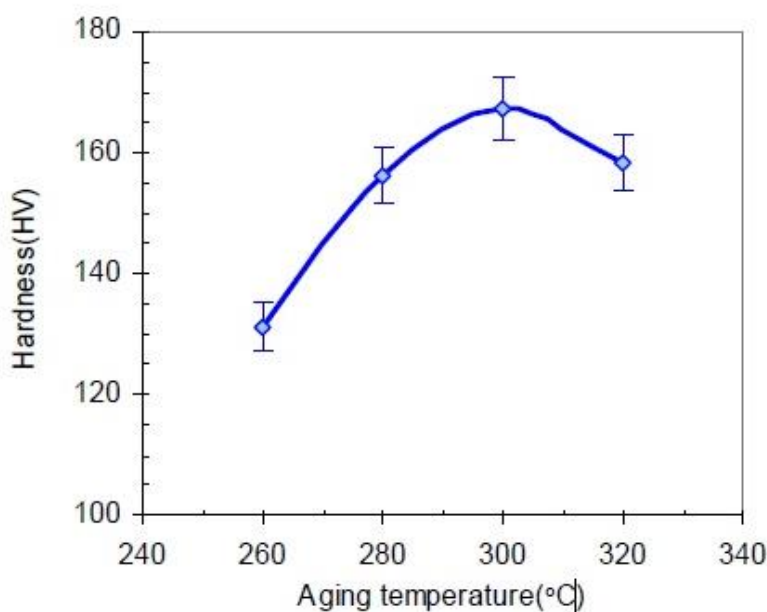
ง) อบละลายที่ 760 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 2.33 (ก)-(ง) โครงสร้างเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกหลังอบเนื้อเดียว (หรืออบละลายเฟส) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [40]



ภาพที่ 2.34 (ก)-(ง) โครงสร้างจุลภาคหลังอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 740°C และอบบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ [40]

โดยผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบเนื้อเดียวของเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ คือ 740°C ดังนั้น การอบเนื้อเดียวส่วนที่เหลือจึงเลือกใช้ที่อุณหภูมิที่ 740°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจุ่มน้ำเย็น ตามด้วยการบ่มแข็งขึ้นงานอุณหภูมิ 260 280 300 และ 320°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับพบว่าโครงสร้างเป็นเกรนกลมมีทวินอยู่ภายในเกรน บริเวณขอบเกรนมีเฟสเกิดขึ้น ส่วนความแข็งของโลหะเงินนั้น พบว่าการอบบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ให้ความแข็งสูงสุดมีค่า 167 วิกเกอร์ ซึ่งเป็นไปตามหลักการโดยทั่วไปของการเพิ่มความแข็งโดยการอบบ่มเนื่องจากเกิดอนุภาคนาขนาดเล็ก (Precipitate) กระจายทั่วในโครงสร้างทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation)

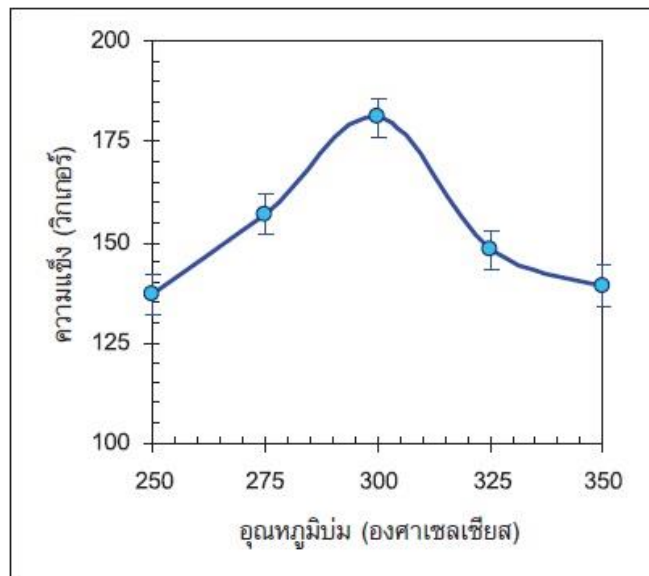


ภาพที่ 2.35 ความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกหลังผ่านการอบเนื้อเดียวที่ 740°C และตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260-320°C [40]

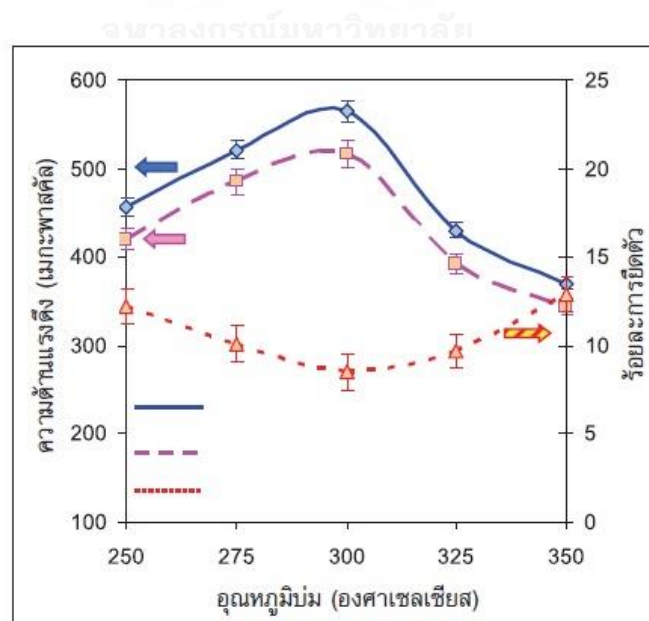
McFarland [48] โลหะเงินสเตอร์ลิงตามมาตรฐานจะประกอบไปด้วยโลหะเงินบริสุทธิ์ 92.5% โดยน้ำหนัก และอีก 7.5% จะเป็นทองแดงซึ่งเมื่อผ่านการอบให้ความร้อนทองแดงกระจายไปทั่วสารละลายของแข็งในเมทริกซ์ของเงินในรูปแบบของอนุภาคขนาดเล็กที่ และสามารถนำไปเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยวิธีการอบบ่มแข็งให้ตกตะกอนจะทำให้ชิ้นงานเงินมีความแข็งเพิ่มขึ้น และจากการทดลองยังพบว่า อลูมิเนียม (Al), แมกนีเซียม (Mg), ตะกั่ว (Pb), พลวง (Sb), เบริลเลียม (Be) หรือการรวมกันของธาตุเหล่านี้อาจใช้แทนเป็นส่วนหนึ่งของทองแดงที่มีผลเพิ่มความแข็งในเครื่องประดับเงินต่าง ๆ เช่น กรณีน้าพิกา ตะขอและเครื่องประดับอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก หรือต้องการความยืดหยุ่น

ปวริศร์ และคณะ [49] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมโลหะผสมอลูมิเนียม-สแกนเดียม และกระบวนการบ่มแข็ง เริ่มจากการเตรียมอินกอตส่วนผสมทางเคมีของ 93Ag-6Cu-1(AI-2Sc) จากโลหะเงินบริสุทธิ์ โลหะทองแดงบริสุทธิ์ และโลหะผสมของอะลูมิเนียม-สแกนเดียมในรูปของมาสเตอร์อัลลอย ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็งของอินกอตนั้น แล้วนำอินกอตไปรีดขึ้นรูปเป็นร้อยละ 80 หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 760°C ตามด้วยการบ่มแข็งในช่วงอุณหภูมิ 250-350°C แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาค วัดความแข็งจุลภาค ซ้ำอีกครั้งและทดสอบแรงดึง จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างงาน

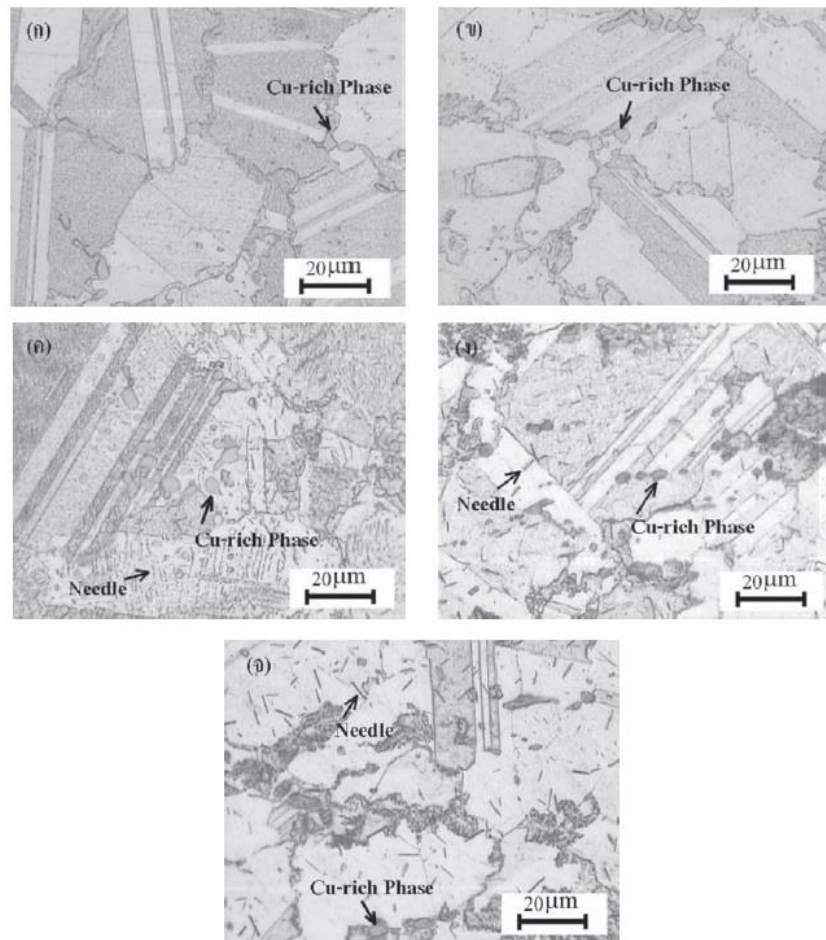
หล่อเป็นเดนไดรต์ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และบริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เป็นเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าความแข็งเฉลี่ย 80 ± 5 วิกเกอร์ สมบัติทางกลขึ้นกับอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการบ่มแข็ง สรุปว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความสูงที่สุดเฉลี่ย 180 ± 5 วิกเกอร์ ให้ค่าความต้านทานแรงดึงจุดสูงสุดเฉลี่ย และค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากเฉลี่ย มีค่า 565 ± 5 และ 517 ± 5 MPa ตามลำดับ



ภาพที่ 2.36 ความแข็งจุดภาคของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มในช่วงอุณหภูมิ $250\text{-}350^{\circ}\text{C}$ [49]



ภาพที่ 2.37 สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งในช่วงอุณหภูมิ $250\text{-}350^{\circ}\text{C}$ [49]



ภาพที่ 2.38 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ [49] :
 (ก) 250°C (ข) 275°C (ค) 300°C (ง) 325°C และ (จ) 350°C

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1) อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ยาง

1. กรอบอะลูมิเนียมขนาดแม่พิมพ์ (Aluminum mold frame)
2. ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ (Mold rubber)
3. มีดผ่าแม่พิมพ์ (Mold knife)
4. หัวจุกทางน้ำโลหะเข้า (Sprue former)
5. ต้นแบบตัวเรือน (Jewelry model)
6. เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง (Vulcanizer machine)

3.1.2) อุปกรณ์ในการหล่อเทียนและติดต้น

1. เครื่องฉีดเทียน (Wax injector)
2. เทียน (Wax)
3. สเปร์ย์ แป้ง และแปรงสำหรับทำความสะอาดแม่พิมพ์ยาง
4. ฐานยาง (Sprue base)
5. หัวแรงไฟฟ้า

3.1.3) อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อและอบเผา

1. กระบอกล่อ
2. ปูนพลาสติกหล่อแบบต้นเทียน
3. ชามผสมปูนหล่อ
4. เครื่องผสมปูนหล่อ
5. เครื่องสุญญากาศ (Vacuum machine)
6. กระบอกล้างน้ำและตาชั่ง
7. เตาอบแม่พิมพ์

3.1.4) อุปกรณ์ในการหลอมและหล่อโลหะ

1. เตาลหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ (Vacuum pressure casting machine) พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมโลหะ OLDMOON รุ่น OMC1
2. เตาลหลอมและเครื่องเทเม็ตขนาด 20 kW ความจุถึง 8 กิโลกรัม และหลอมได้ถึง 1650°C
3. กระจกหล่อที่ได้จากการอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ
4. อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการหลอมและหล่อโลหะ
5. เครื่องทำความสะอาดชิ้นงานความดันสูง

3.1.5) อุปกรณ์ในการทดสอบกันมองของวัสดุ

1. ไฟร์ดอมมีอ สำหรับเจาะรู
2. เครื่องตัดเงาหยาบ / ละเอียด
3. ลวดใช้ในการจับ / แขนงชิ้นงานทดสอบ
4. ภาชนะสำหรับทดสอบชิ้นงานกันมอง
5. เครื่องอัลตราโซนิก
6. คีมตัดลวดและชิ้นงาน
7. เครื่องขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาด

3.1.6) เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400LV และ JSM-5410F
2. Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ยี่ห้อ INCA
3. เครื่องมือทดสอบแรงดึง (Universal tensile testing machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR10K, LLOYD Instruments, England
4. เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยวิธี Inductively Couple Plasma Spectroscopy (ICP-OES) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น ICP-Plasma-1000
5. เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ X-ray diffraction (XRD)
6. เครื่องวัดและเทียบสี (Spectrocolorimeter) รุ่น UltraScan XE
7. เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell ยี่ห้อ GALILEO durometria (Scale A)

3.2 วัสดุดิบ

1. เม็ดโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.99 %
2. เม็ดโลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 %
3. ดิบุกบริสุทธิ์ 99 %
4. อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99 %
5. มาสเตอร์อัลลอยทองแดง 10% เบริลเลียม

3.3 สารเคมี

1. แอลกอฮอล์ (C_2H_6O) Absolute (AR)
2. น้ำกลั่น (H_2O)
3. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) หรือน้ำดีไอ (DI)
4. กรดโครมิก (Chromic acid, H_2CrO_4)
5. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) ยี่ห้อ Maersk
6. กรดกำมะถัน (H_2SO_4) 70%
7. โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S)
8. ผงเพชร (Diamond paste) ขนาด 6, 3, 1 และ 1/4 ไมครอน ยี่ห้อ Struers

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1) สืบค้นข้อมูลจากเอกสารต่าง ๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งจะศึกษาข้อมูลของธาตุผสมเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงิน และศึกษาวิธีการอบทางความร้อนด้วยวิธีอบบ่มให้ตกตะกอน

3.4.2) ศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินผสมทองแดง เบริลเลียม ดิบุก และอะลูมิเนียมที่นำมาใช้เป็นวัสดุดิบ

3.4.3) ทดลองหล่อชิ้นงานและศึกษาโครงสร้างจุลภาครวมไปถึงสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ

3.4.3.1) ทำต้นแบบตัวเรือนต้นแบบที่ใช้ทดสอบแรงดึง โดยใช้ชิ้นงานขนาดตามมาตรฐาน ASTM E 8M-96 ในการทำแม่พิมพ์ยางเพื่อใช้ในการฉีดเทียนและทำการหล่อต่อไป

3.4.3.2) ฉีดเทียนที่ทำการหลอมละลายแล้ว เข้าสู่แม่พิมพ์ยางด้วยเครื่องฉีดเทียนได้ลักษณะตามต้นแบบมาตรฐาน ASTM E8 M-96 และแบบชิ้นงานทดสอบกันหมอง

3.4.3.3) นำแบบเทียน (Wax pattern) ที่ได้มาทำการติดต้นเทียนและจัดให้เป็นกลุ่มอย่างมีระเบียบ เพื่อสามารถหล่อขึ้นงานได้ครั้งละจำนวนมาก

3.4.3.4) ชั่งน้ำหนักต้นเทียน เพื่อนำไปคำนวณหาส่วนผสมโลหะที่ต้องการหล่อ

3.4.3.5) นำต้นเทียนใส่ในกระบอกล้อ แล้วตวงอัตราส่วนระหว่างปูนหล่อและน้ำให้เหมาะสม โดยให้น้ำหนัก 37 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนหล่อ

3.4.3.6) ผสมปูนหลอกับน้ำด้วยเครื่องผสมปูนหล่อ แล้วดูดอากาศออกจากเนื้อปูนหล่อด้วยเครื่องสูญญากาศ (Vacuum machine) นานประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นเทปูนลงในกระบอกล้อและดูดอากาศออกอีกครั้งใช้เวลาประมาณ 3 นาทีเช่นเดียวกัน

3.4.3.7) รอให้กระบอกล้อแห้ง โดยทิ้งไว้ในสภาวะอากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) ใช้เวลาประมาณ $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมงแล้วนำกระบอกล้อเข้าเตาอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อเพื่อขจัดเทียนออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อและเพิ่มความแข็งแรงของปูน โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาขึ้นช้า ๆ แล้วปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ 580°C ใช้เวลาในการอบเผาทั้งสิ้นประมาณ 12-16 ชั่วโมง

3.4.3.8) เตรียมส่วนผสมและอุปกรณ์ในการหล่อและหลอมโลหะเงินผสม 935 ทั้งหมด 7 ชุด โดยชั่งน้ำหนักเม็ดเงินบริสุทธิ์ 99.99% เม็ดทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ดีบุกบริสุทธิ์ 99% อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99% และโลหะผสมทองแดง-เบริลเลียมโดยมีอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเงินผสม 935 ที่ทำการทดลองทั้ง 7 ชุดโลหะผสม

| ชุดที่ | ปริมาณของธาตุผสม(%โดยน้ำหนัก) | | | | |
|------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|---------------|---------------------|
| | เงิน (Ag) | ทองแดง (Cu) | เบริลเลียม (Be) | ดีบุก (Sn) | อะลูมิเนียม (Al) |
| 1) AgCu | Balance | 6.5 | - | - | - |
| 2) AgCu0.3Al | Balance | 6.2 | - | - | 0.3 |
| 3) AgCu0.3Sn | Balance | 6.2 | - | 0.3 | - |
| 4) AgCu0.3Be0.2Sn | Balance | 6.0 | 0.3 | 0.2 | - |
| 5) AgCu0.3Be0.3Sn | Balance | 5.9 | 0.3 | 0.3 | - |
| 6) AgCu0.3Be0.5Sn | Balance | 5.7 | 0.3 | 0.5 | - |
| 7) AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al | Balance | 5.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 |

3.4.3.9) หลอมและหล่อโลหะผสมด้วยเครื่องหลอมและหล่อแบบสูญญากาศ แล้วทำการหล่อโลหะเงินผสม 935 และโลหะเงิน 935 ผสมทองแดง-เบริลเลียม-ดีบุก-อะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 1000°C อุณหภูมิเข้า 550°C

3.4.3.10) นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องหล่อโลหะ แล้วแช่ลงในน้ำเย็นทันที แล้วนำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาดชิ้นงานหล่อด้วยเครื่องฉีดน้ำความดันสูง เพื่อทำลายปูนหล่อออกจากกระบอกหล่อ

3.4.3.11) นำต้นชิ้นงานโลหะที่ได้ทำความสะอาดด้วยการจุ่มกรดกำมะถัน H_2SO_4 (ความเข้มข้น 20-25% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส) เพื่อกัดผิวชิ้นงานให้สะอาด ตัดแต่งและขัดชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบต่อไป

3.4.4) ศึกษากระบวนการการบ่มเพิ่มความแข็ง

3.4.4.1) นำชิ้นงานที่ได้จากแบบหล่อต้นเทียนทั้ง 7 ชุด มาทำการอบบ่มแข็ง (Aging) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลที่อุณหภูมิ 350°C, 400°C โดยใช้ระยะเวลาในการบ่มแข็ง 0, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที

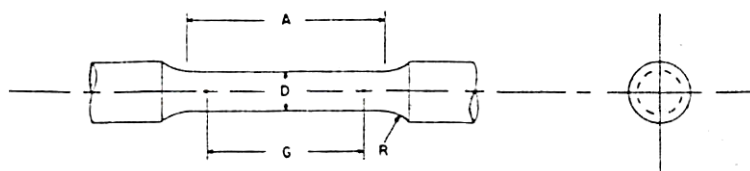
3.4.4.2) จุ่มลงในน้ำเย็นอย่างรวดเร็ว เพื่อลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิต่ำ

3.4.4.3) นำชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อต้นเทียน และผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแล้วไปทดสอบแรงดึง สมบัติความเป็นสปริง ทดสอบความแข็ง วิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องมือ ICP-OES (Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, (SEM)) วิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ X-ray diffraction (XRD) และทดสอบสมบัติความต้านทานกันหมองของวัสดุ วัดและเทียบค่าสีด้วยเครื่อง Spectrocolorimeter

3.4.4.5) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

3.5.1) การทดสอบแรงดึง (Tensile test) หล่อขึ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และขนาด Gage length 20 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E 8M-96 ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ภาพขึ้นทดสอบแรงดึง [50]

$G = \text{Gage length} = 20.0 \pm 0.1 \text{ mm.}$

$D = \text{Diameter} = 4.0 \pm 0.1 \text{ mm.}$

$R = \text{Radius of fillet, min} = 4 \text{ mm.}$

$A = \text{Length of reduced section, min} = 24 \text{ mm.}$

3.5.1.1) นำขึ้นทดสอบทั้งสภาพหล่อ (As-cast) และขึ้นงานหลังจากการอบชุบทางความร้อน (Heat treatment) ไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal tensile test ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR10K, LLOYD Instruments กำหนดความเร็วในการดึง (Tension speed) 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความเค้นจุดคราก (Yield strength) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation)

3.5.1.2) วิเคราะห์ผลที่ได้และสรุปผล

3.5.2) การวิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer) เพื่อตรวจสอบปริมาณธาตุผสมต่าง ๆ ในโลหะผสมและขึ้นงานเงินทดสอบหลังการหล่อ โดยส่งชิ้นตัวอย่างทดสอบไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง ดีบุก และ เบริลเลียม ที่ศูนย์วิจัยชีววิทยาในช่องปาก คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิธีเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณธาตุด้วย ICP-OES ทำได้โดย

3.5.2.1) ชั่งตัวอย่างเงิน ทดสอบปริมาณ 0.5 กรัม ละลายในกรดไนตริกเข้มข้น 50% โดยปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร

3.5.2.2) ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จนละลายหมด แล้วไล่ออกไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ออกให้หมด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) ให้ได้ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร

3.5.2.3) วิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยเครื่อง ICP-OES โดย วัดค่าพลังงานที่คายออกมาเทียบกับตอนเริ่มต้น จะทำให้ทราบค่าพลังงานส่วนที่ ถูกดูดกลืนไป แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานของเครื่องมือจะทำให้ทราบว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบมีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการทราบเป็นปริมาณเท่าใด

3.5.3) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีการเตรียมชิ้นงานโลหะสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (XRD) มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานดังนี้

3.5.3.1) เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม โดยตัดชิ้นงานหล่อแล้วเตรียมผิวโดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียด (Polishing) ด้วยผงเพชรชนิดน้ำมัน ขนาด 6, 3, 1 และ 1/4 ไมครอน ตามลำดับ จากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.5.3.2) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในโครงสร้างที่พบด้วย Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

3.5.3.3) ในส่วนของกรวิเคราะห์สารประกอบและธาตุ X-ray diffraction (XRD) นั้น ก็ทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนข้างต้น แล้วทำการส่งทาง ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทำการตรวจสอบตัวอย่างให้

3.5.3.4) วิเคราะห์และสรุปผล

3.5.4) การทดสอบความแข็งแบบรีคเวลด

3.5.4.1) เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม โดยตัดชิ้นงานหล่อแล้วเตรียมผิวโดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียด (Polishing) ด้วยผงเพชรชนิดน้ำมัน

ขนาด 6, 3, 1 และ 1/4 ไมครอน ตามลำดับ จากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.5.4.2) นำชิ้นงานที่ได้ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกล A (Rockwell Scale A) โดยใช้หัวกดเพชร น้ำหนักโหลด 60 kgf

3.5.4.3) บันทึกค่าที่ได้ นำข้อมูลไปวิเคราะห์และสรุปผล

3.5.5) การทดสอบสมบัติด้านทานการหมองและวัดเทียบสี

3.5.5.1) หล่อชิ้นงานลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับทดสอบการกันหมอง ขนาด 15x22 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร (โดยวิธีการหล่อได้อธิบายไปข้างต้นแล้ว) ซึ่งการเตรียมชิ้นงานหลังหล่อทำได้โดย

3.5.5.2) นำชิ้นงานเจาะรูเล็ก ๆ ด้วยไฟร์ดอมมือ ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร บริเวณด้านบนของชิ้นงานสำหรับการแขวนขณะทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง

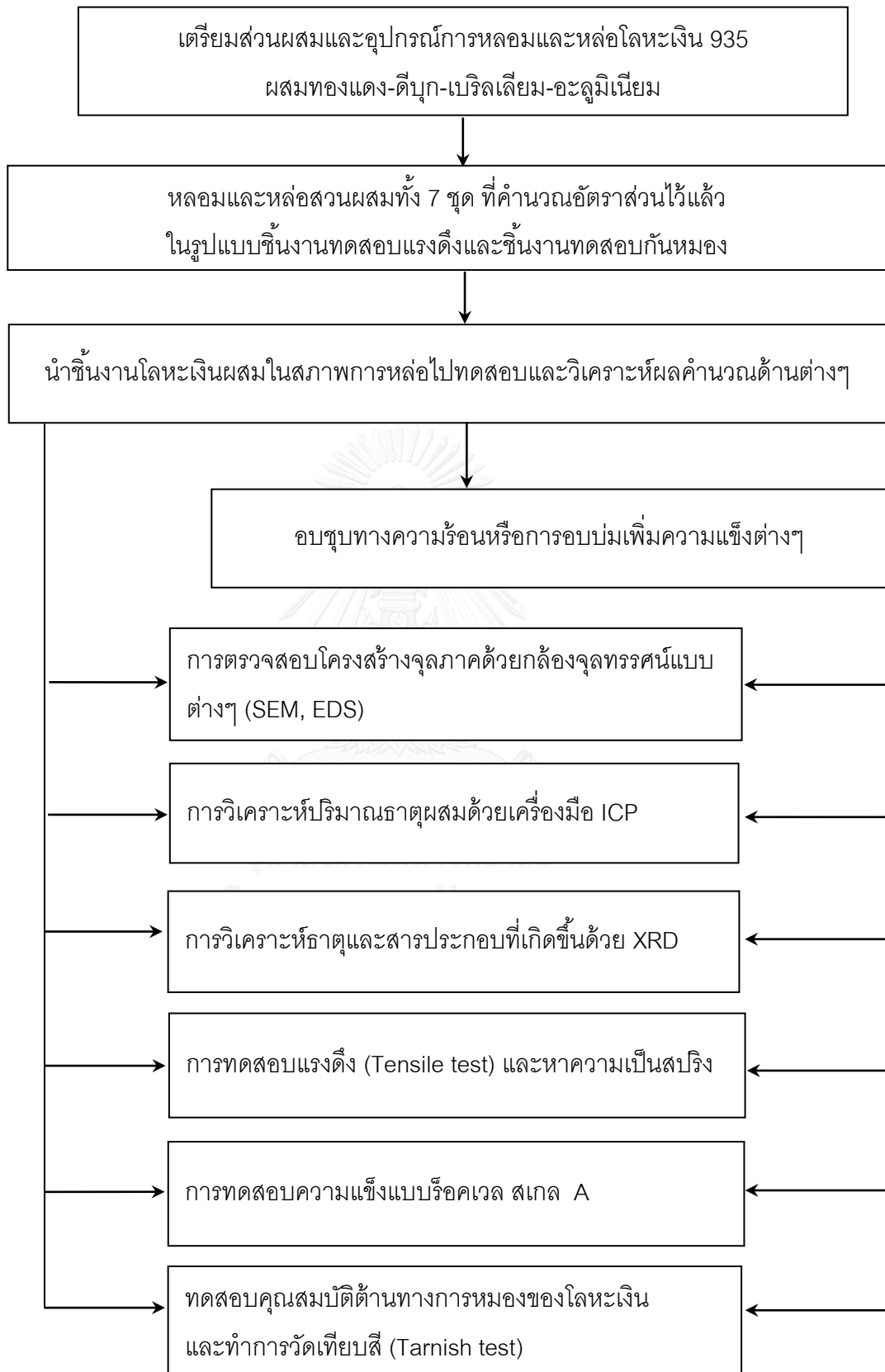
3.5.5.3) นำชิ้นงานที่ผ่านการเจาะรูแล้วไปขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 100, 250, 350, 400, 600, 800 ตามลำดับ แล้วไปผ่านการขัดเงาด้วยเครื่องขัดหยาบและละเอียดให้ชิ้นงานมีความเรียบเงา สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

3.5.5.4) ล้างทำความสะอาดชิ้นงาน และทำความสะอาดอีกครั้งด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ล้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วใช้ไดร์เป่าให้แห้ง เพื่อไม่ให้มีคราบไขมันหรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ เกาะอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน

3.5.5.5) นำชิ้นงานไปทดสอบความต้านทานการหมอง โดยใช้ลวดแขวนชิ้นงานไว้ในเนื้อสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ที่ทำละลายกับกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ความเข้มข้น 40% แล้วในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด โดยเวลาการทดสอบใช้ 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ทดสอบชิ้นงานทั้ง 7 ชุด ซึ่งจะเลือกใช้ทั้งชิ้นงานหลังหล่อ (As-cast) และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่ม (Aging) ด้วย คือ ชิ้นงานหลังหล่อ (As-cast), ชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่ม (Aging) 350°C เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่ม (Aging) 400°C เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง

3.5.5.6) หลังจากครบเวลาทดสอบ ก็นำชิ้นงานที่ได้ถ่ายภาพ และนำไปทำการวัดเทียบสีด้วยเครื่องวัดเทียบสี (Spectrocolorimeter)

3.5.5.7) เก็บข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดเทียบสี มาวิเคราะห์และสรุปผล



ภาพที่ 3.2 แผนผังสรุปกระบวนการทดลอง

บทที่ 4

รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ลักษณะและชิ้นงานตัวอย่างหลังการหล่อเงินสเตอร์ลิง

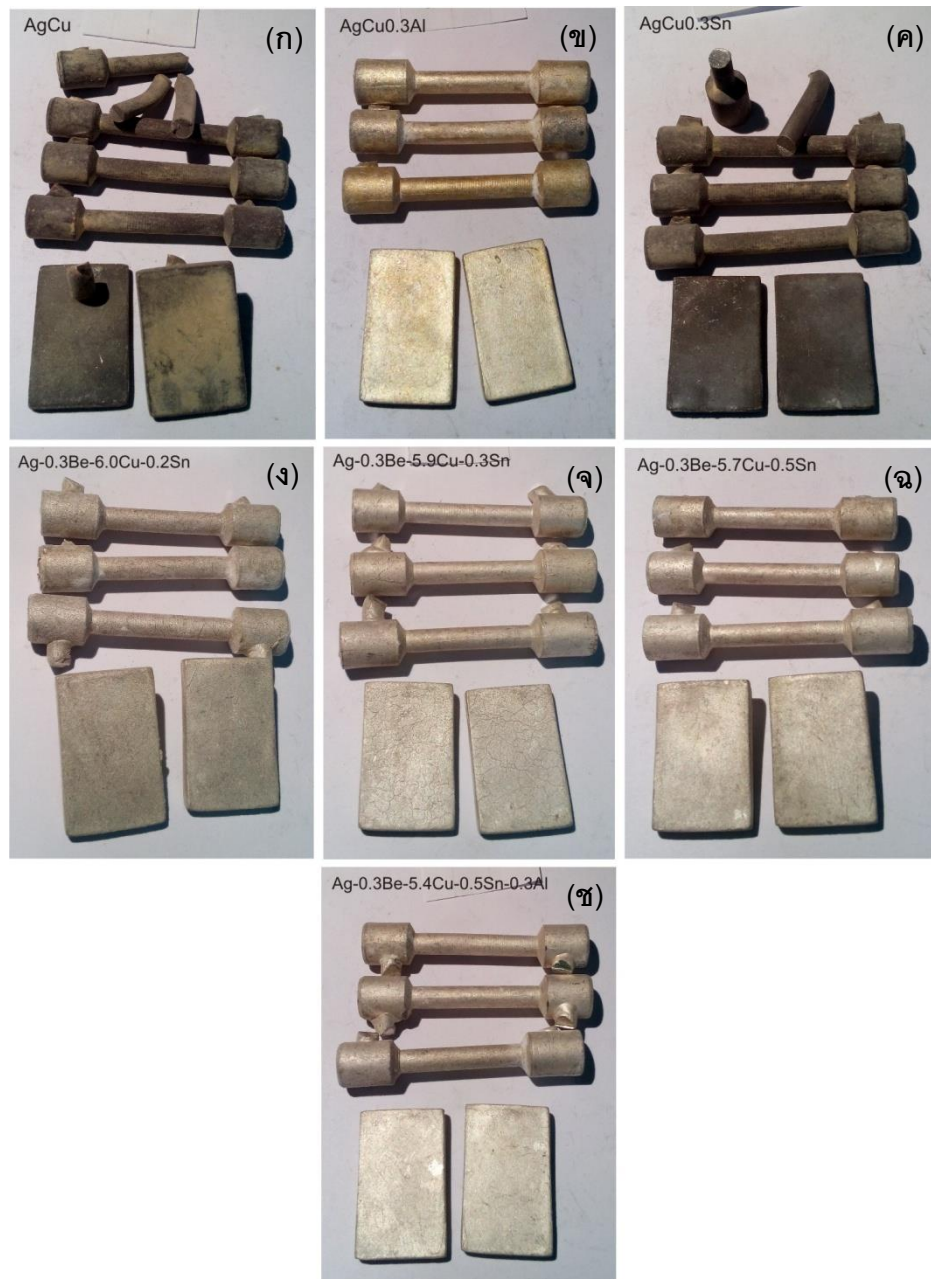
ภาพที่ 4.1 แสดงชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อต้นโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยใช้เครื่องหลอมและหล่อแบบสูญญากาศ ใช้อุณหภูมิในการหล่อ 1000°C และอุณหภูมิเข้าหล่อ 550°C ทำการทดสอบการดึงและทดสอบกันหมอง การหล่อชิ้นงานใช้วิธีหล่อแบบหล่อซีพิ้ง (Investment casting or Lost wax casting) โดยใช้เทียนเป็นต้นแบบ แล้วติดชิ้นงานเป็นต้นเทียน มีกึ่งก้านลักษณะคล้ายต้นไม้ แล้วเมื่อหลังเทน้ำโลหะ หล่อออกมาจะได้เป็นต้นโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งทำการหล่อชุดของโลหะผสมทั้งหมดเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด โดยปรับเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีด้วยการเติมธาตุอะลูมิเนียม ดีบุกและเบริลเลียม ดังตารางที่ 3.1

ผลการหล่อพบว่า ชิ้นงานโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงชุด AgCu และ AgCu0.3Sn ในสภาพหลังหล่อเกิดการแตกเป็นจำนวนหลายชิ้น ซึ่งพบการแตกของชิ้นงานทั้งในลักษณะแตกหักคาอยู่บนต้นโลหะ หรือมีการแตกขณะใช้คีมตัดแยกชิ้นงานเพื่อไปทำการทดสอบ ลักษณะเป็นการแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) สาเหตุจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะชุดทั้ง 2 ชุดดังกล่าว ทำให้เนื้อโลหะมีการหดตัวแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ซึ่งชิ้นงานสภาพหลังหล่อใช้คีมตัดแล้วแสดงในภาพที่ 4.1

ชิ้นงานในสภาพหลังหล่อยังแสดงถึงสีผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน ซึ่งเห็นได้ว่า ชิ้นงานชุดโลหะผสม AgCu และชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn นอกจากเกิดการแตกเปราะหลังหล่อแล้ว ชิ้นงานหลังหล่อยังมีสีดำลึกลงกว่าชุดโลหะผสมอื่น ๆ อันเนื่องมาจากทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (Oxidation) เกิดเป็นออกไซด์ของทองแดงเกาะบนผิวของโลหะ ออกไซด์ของทองแดงที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบ Cu_2O (Copper I oxide) ที่รู้จักกันในชื่อ คิวปริสออกไซด์ (Cuprous Oxide) เป็นออกไซด์ที่มีสีแดง/แดงอมชมพู หรือเรียกว่า ฝ้าแดง และสารประกอบทองแดงออกไซด์ CuO รู้จักกันในชื่อ คิวปริคออกไซด์ (Cupric Oxide) เป็นออกไซด์ที่มีสีออกไปทางดำ/เทาดำ (ฝ้าดำ) คราบออกไซด์ที่เกิดขึ้นรวม ๆ เรียกว่า สเกลที่เกิดจากความร้อน (Fire Scale)

แม้การศึกษาของสงวนรักษ์ [1] มีศึกษาผลของปริมาณดีบุกในช่วง 0 – 0.63% พบว่าปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นจะช่วยในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของทองแดงที่ผิวโลหะ สังเกตได้จากความดำคล้ำสีผิวของชิ้นงานที่ลดลง แต่ในกรณีของงานวิจัยนี้ปริมาณดีบุกที่ใช้้น้อยกว่า (AgCu0.3Sn) เติมดีบุกเพียง 0.3% จึงน่าจะส่งผลทำให้การช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศและช่วยในการป้องกันการหมองได้น้อยกว่าในกรณีดังกล่าว

ในชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงอื่น ๆ ดังภาพที่ 4.1(ก) – 4.1(ข) ที่เพิ่มปริมาณธาตุผสมปริมาณมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นเติมธาตุอะลูมิเนียม เบริลเลียม หรือดีบุกมากขึ้นเพื่อศึกษาจากธาตุผสมที่เติมพบว่า ธาตุเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองและสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานทั้ง 7 ชุด พบว่า ธาตุที่มีอิทธิพลช่วยลดการเกิดออกซิเดชันได้ดีที่สุดของทุกชุดโลหะผสมคือ ธาตุอะลูมิเนียม ดังภาพที่ 4.1 (ข) สังเกตเห็นว่า สีผิวของชิ้นงานที่เติมธาตุอะลูมิเนียม 0.3% โดยน้ำหนัก (โลหะผสม AgCu0.3Al) ผิวชิ้นงานหลังหล่อเกิดคราบออกไซด์น้อยที่สุด (ขาวที่สุด) ผิวของชิ้นงานจะเป็นสีของโลหะเงินและค่อนข้างเงาเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสีผิวของโลหะผสมชุดอื่น ๆ ที่เหลือ สามารถเรียงลำดับสีผิวที่หมองคล้ำ(ความเข้ม) จากชุดที่ความหมองน้อยไปหามากได้ดังนี้ $\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$, AgCu0.3Be0.5Sn , AgCu0.3Be0.3Sn , AgCu0.3Be0.2Sn อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะพบความหมองคล้ำที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน แต่เมื่อเทียบกับโลหะผสม AgCu โลหะผสมทั้ง 6 ชุดที่กล่าวมานั้น ยังมีความหมองน้อยกว่าโลหะผสม AgCu แสดงให้เห็นว่าธาตุทองแดง มีผลต่อสีผิวที่ได้หลังหล่อ อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างชัดเจน และยังเห็นได้ชัดว่า ธาตุดีบุกสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงได้ เมื่อเติมดีบุกในปริมาณที่มากขึ้น โดยภาพของลักษณะต้นเงินสเตอร์ลิงสภาพหลังหล่อของทุกชุดโลหะผสม สามารถดูได้ในภาคผนวก ก.



ภาพที่ 4.1 ชิ้นงานหลังหล่อของโลหะผสมทั้ง 7 ชุด

ประกอบด้วย

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| (ก) ชิ้นงานชุด AgCu | (ข) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Al |
| (ค) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Sn | (ง) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Be0.2Sn |
| (จ) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Be0.3Sn | (ฉ) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Be0.5Sn |
| (ช) ชิ้นงานชุด AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al | |

4.2 ส่วนผสมทางเคมี

ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุและส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยวิธี Inductively Couple Plasma Spectroscopy (ICP-OES) ของชิ้นงานตัวอย่างก่อนหล่อและหลังหล่อชิ้นงาน แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุและส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES

| ชุดโลหะผสม | Cu (%wt) | | Be (%wt) | | Sn (%wt) | | Al (%wt) | |
|---------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| | หล่อ | หล่อ | หล่อ | หล่อ | หล่อ | หล่อ | หล่อ | หล่อ |
| AgCu | 6.5 | 5.586 | - | - | - | - | - | - |
| AgCu0.3Al | 6.2 | 5.353 | - | - | - | - | 0.3 | 0.317 |
| AgCu0.3Sn | 6.2 | 5.252 | - | - | 0.3 | 0.246 | - | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn | 6.0 | 5.115 | 0.3 | 0.279 | 0.2 | 0.183 | - | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn | 5.9 | 5.096 | 0.3 | 0.283 | 0.3 | 0.278 | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn | 5.7 | 4.945 | 0.3 | 0.288 | 0.5 | 0.454 | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al | 5.4 | 4.596 | 0.3 | 0.283 | 0.5 | 0.439 | 0.3 | 0.323 |

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุและส่วนผสมทางเคมี พบว่า ปริมาณธาตุที่ตรวจพบหลังหล่อก็มีการสูญหายหรือลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเตรียมตัวอย่างและเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การทำละลายเพิ่มเติม (Dilution) เพื่อปรับสารละลายตัวอย่าง และทองแดงอาจสูญหายเนื่องจากการหลอมและหล่อเป็นต้นโลหะเงินสเตอร์ลิง อย่างไรก็ตามส่วนผสมดังกล่าวก็อยู่ในช่วงที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP – OES ยังต้องควรระวัง เพราะธาตุบางธาตุ เช่น ดีบุก ซึ่งอาจจะเกิดการตกตะกอนในช่วงที่ทำเป็นสารละลายตัวอย่าง โดยเฉพาะระยะเวลาหลังที่ทำเป็นสารละลายแล้ว ถ้ามีการทิ้งไว้นานเกินไป (ตรวจสอบด้วยเครื่องซ้ำเกินไป) จะส่งผลให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

4.3 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคในผลการวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ในส่วนของการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุผสมด้วยเทคนิคที่เรียกว่า X-ray Mapping นอกจากนี้ยังตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่าง ๆ แต่ละบริเวณด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ในการอภิปรายผลได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

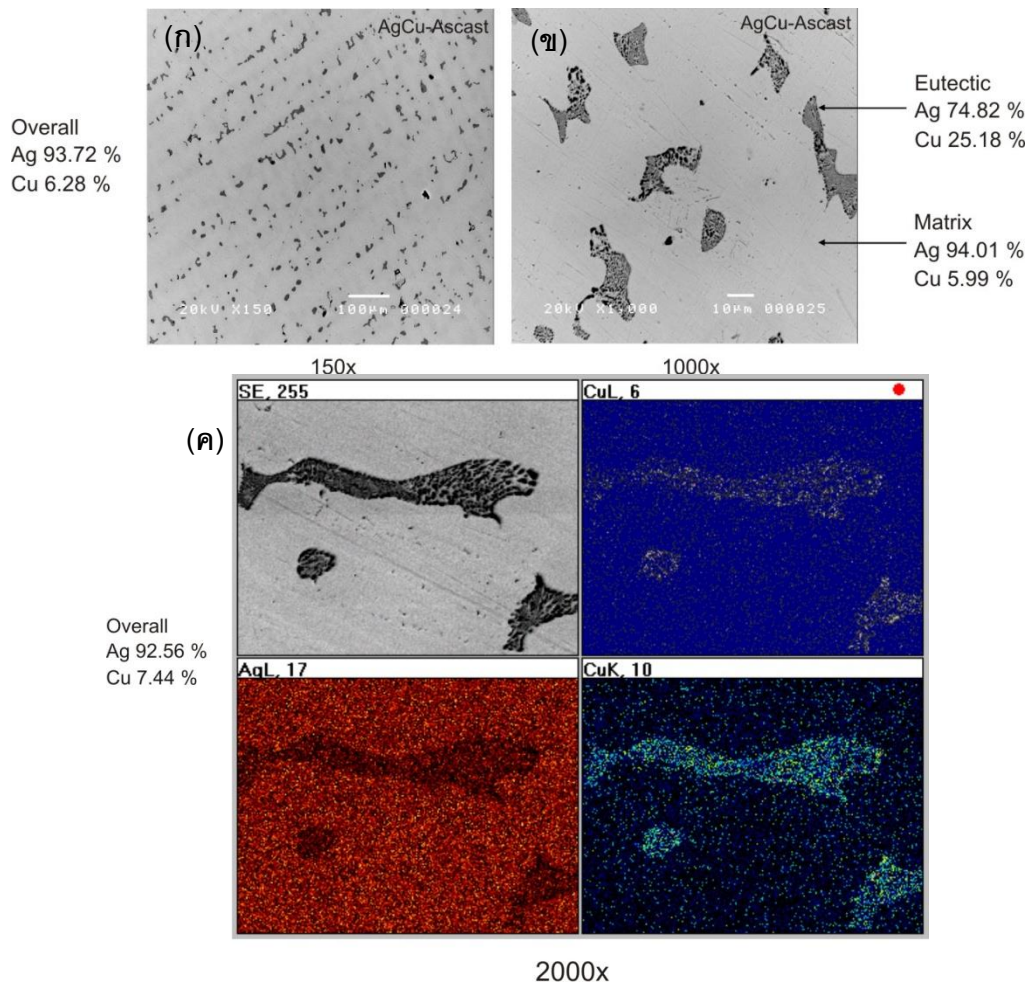
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคสภาพหลังหล่อ

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหลังหล่อ

ภาพที่ 4.2 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะผสมเงินทองแดงสภาพหลังหล่อ (AgCu-ascast) ที่กำลังขยายต่ำ (150X) โครงสร้างที่พบมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดรนไดรท์ (Dendrite) ของเฟสอัลฟาเนื้อพื้น (α -phase) ส่วนในบริเวณพื้นที่ระหว่างแกนของเดรนไดรท์ประกอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายอยู่อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.2 (ข) แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงมากขึ้น จะปรากฏโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งมีธาตุเงินในปริมาณสูง เรียกว่า สารละลายของแข็งเนื้อเงินสูง (Ag-rich solid solution) หรือเฟสอัลฟา (α -phase) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) มีลักษณะเป็นแถบสีดำกับแถบสีขาว สลับกันไปเป็นริ้ว ๆ กระจัดกระจายอยู่ ซึ่งประกอบด้วยแถบสีขาว คือ เฟสอัลฟา (α -phase) และในส่วนของแถบสีดำจะมีสารละลายของแข็งทองแดงสูง (Cu-rich solid solution) เรียก เฟสเบตา (β -phase) จากการตรวจสอบด้วย EDX พบว่าในโครงสร้างเนื้อพื้นพบปริมาณเงิน 94.01% และทองแดง 5.99% ส่วนโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณเงิน 74.82% ทองแดง 25.18%

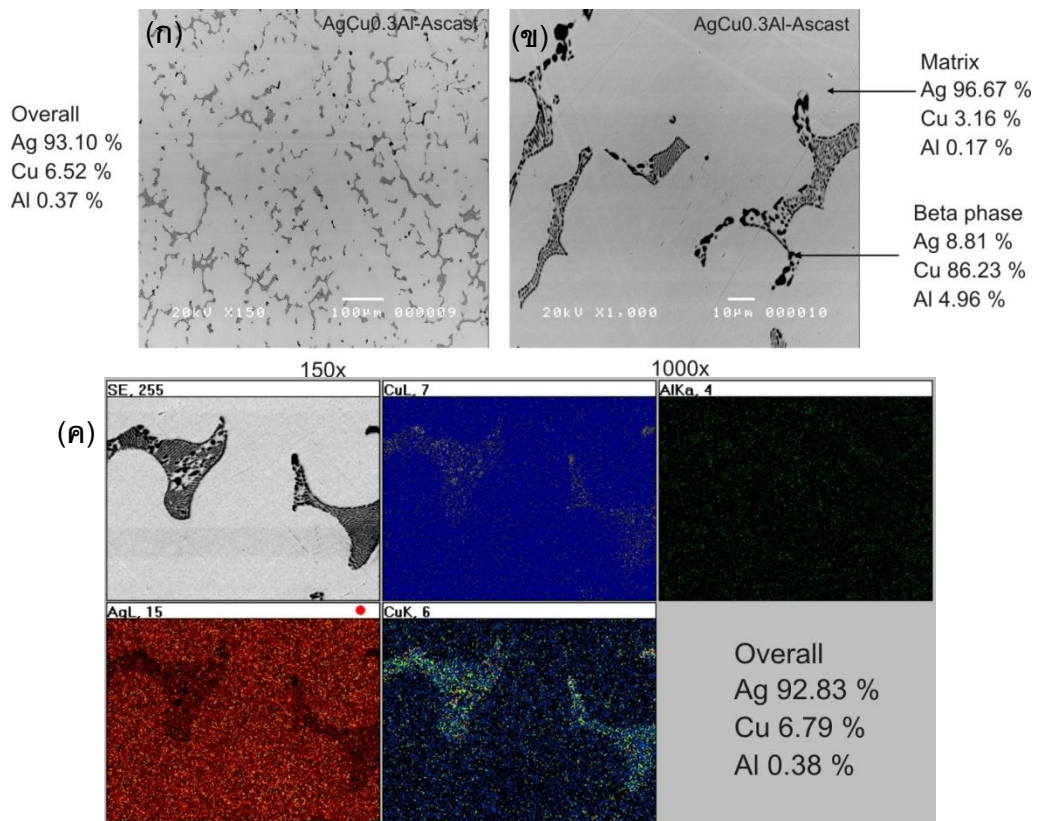
การพิจารณาผลของการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping ดังภาพที่ 4.2 (ค) เป็นการชี้ชัดว่าโครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix) ประกอบด้วยเนื้อเงินปริมาณสูง (4.2 (ค) – ล่างซ้าย) ส่วนโครงสร้างยูเทคติกจะประกอบด้วยทองแดงเป็นหลัก (4.2 (ค) – ล่างขวา)



ภาพที่ 4.2 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping ใช้กำลังขยาย 2000 เท่า

ภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะผสมชุดเงิน ทองแดง อะลูมิเนียมสภาพหลังหล่อ (AgCu0.3Al-ascast) โครงสร้างจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 150 เท่า มีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) และมีโครงสร้างยูเทคติกอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ เช่นเดียวกับโลหะผสมเงิน ทองแดง (AgCu) แต่เนื่องจากโลหะผสมชุดนี้มีการเติมอะลูมิเนียม เป็นธาตุผสมเพิ่มเข้าไปอีก 0.3% โดยน้ำหนัก จึงสังเกตพบว่า รูปร่างโครงสร้างยูเทคติกมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยจะเห็นว่า มีเฟสเบตา (β -phase) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ กับโครงสร้างยูเทคติก รูปร่างเชื่อมต่อกัน มีขนาดใหญ่และยาวขึ้นกว่าชุดโลหะผสม AgCu การกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกดูไม่สม่ำเสมอมากนัก เมื่อสังเกตภาพ 4.3 (ค) X-ray Mapping ธาตุอะลูมิเนียมจะกระจายตัวอยู่ทั้งโครงสร้างพื้นและโครงสร้างยูเทคติก ขณะที่ธาตุทองแดงและเงินมีการกระจายตัวคล้ายกับชิ้นงานโลหะผสมทองแดง (AgCu) จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณเฟสต่าง ๆ

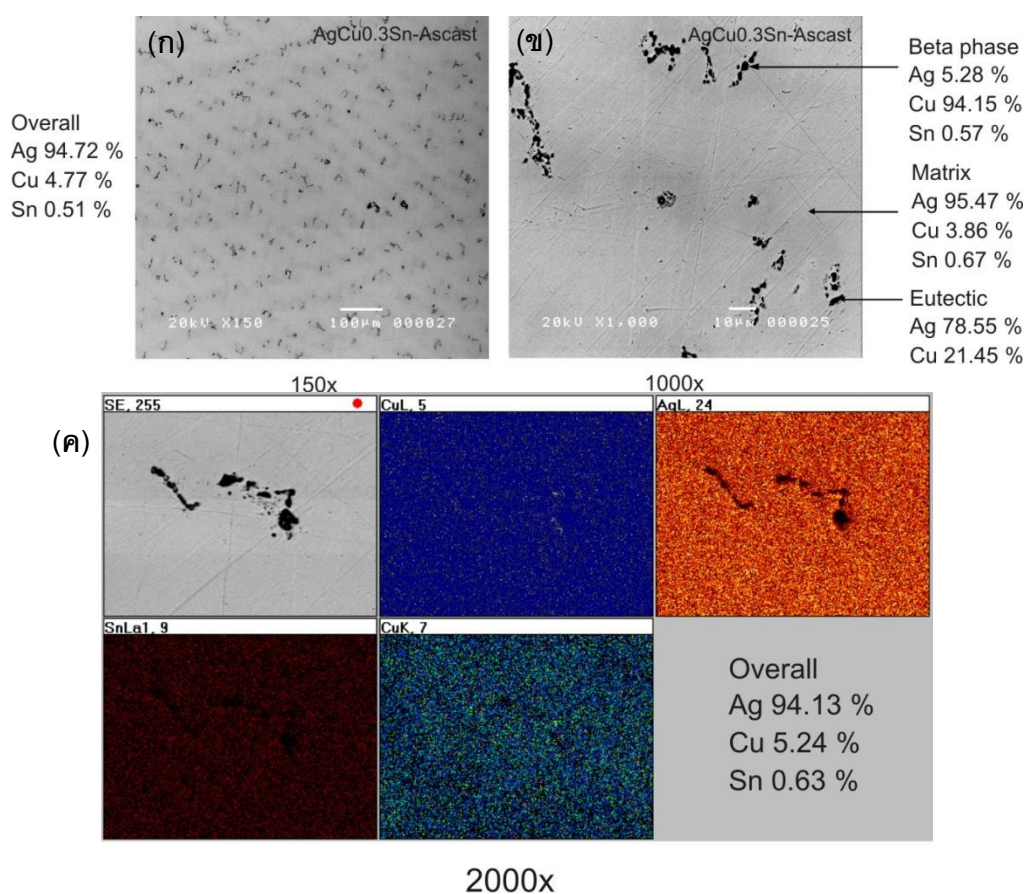
ด้วย EDX พบว่า โครงสร้างพื้นประกอบด้วยเงิน 96.67% ทองแดง 3.16% และอะลูมิเนียม 0.17% ส่วนบริเวณเฟสเบตา (β -phase) มีเงิน 8.81% ทองแดง 86.23% และอะลูมิเนียม 4.96% ดังแสดงในภาพ 4.3 (ก) และ 4.3 (ข)



ภาพที่ 4.3 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Al}$ ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping ใช้กำลังขยาย 2000 เท่า

ภาพที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะผสมชุดเงิน ทองแดง ดีบุกสภาพหลังหล่อ ($\text{AgCu}_{0.3}\text{Sn}$ -ascast) ขนาดเกรนและเดรนไดรต์ (Dendrite) ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงชุดอื่น ๆ ประมาณ 3 – 6 เท่า ดังภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเกรนของ $\text{AgCu}_{0.3}\text{Sn}$ ภาพที่ 4.9 (ก) และ $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ ภาพที่ 4.9 (ข) สภาพหลังหล่อ ผลของดีบุกทำให้โครงสร้างยูเทคติกเปลี่ยนแปลงไป ขนาดของโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าและขนาดเล็กกว่ามาก โครงสร้างยูเทคติกที่มีปริมาณลดน้อยลงนั้น มีขนาดประมาณ 10 – 40 μm และเห็นได้ชัดเจนว่า มีการเกิดเฟสที่สองขึ้น (Secondary phase) อีกทั้งเป็นเฟสมีขนาดใหญ่ ประกอบด้วยธาตุทองแดงที่มีปริมาณสูง 94.15% เงิน 5.28% และดีบุก 0.57% โดย

จากการวิเคราะห์ X-ray Mapping ภาพที่ 4.4 (ค) สามารถยืนยันได้ว่า ติบุกกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งในโครงสร้างพื้นและในเฟสเบตา ส่วนทองแดงจะพบในเบตาเฟสขนาดใหญ่ และในโครงสร้างยูเทคติกที่เหลืออยู่ในปริมาณน้อย ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณธาตุด้วย EDX พบว่าในเนื้อพื้น (Matrix) จะมีเงิน 95.47% ทองแดง 3.86% และดีบุก 0.67% ส่วนโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) มีเงิน 78.55% ทองแดง 21.45%

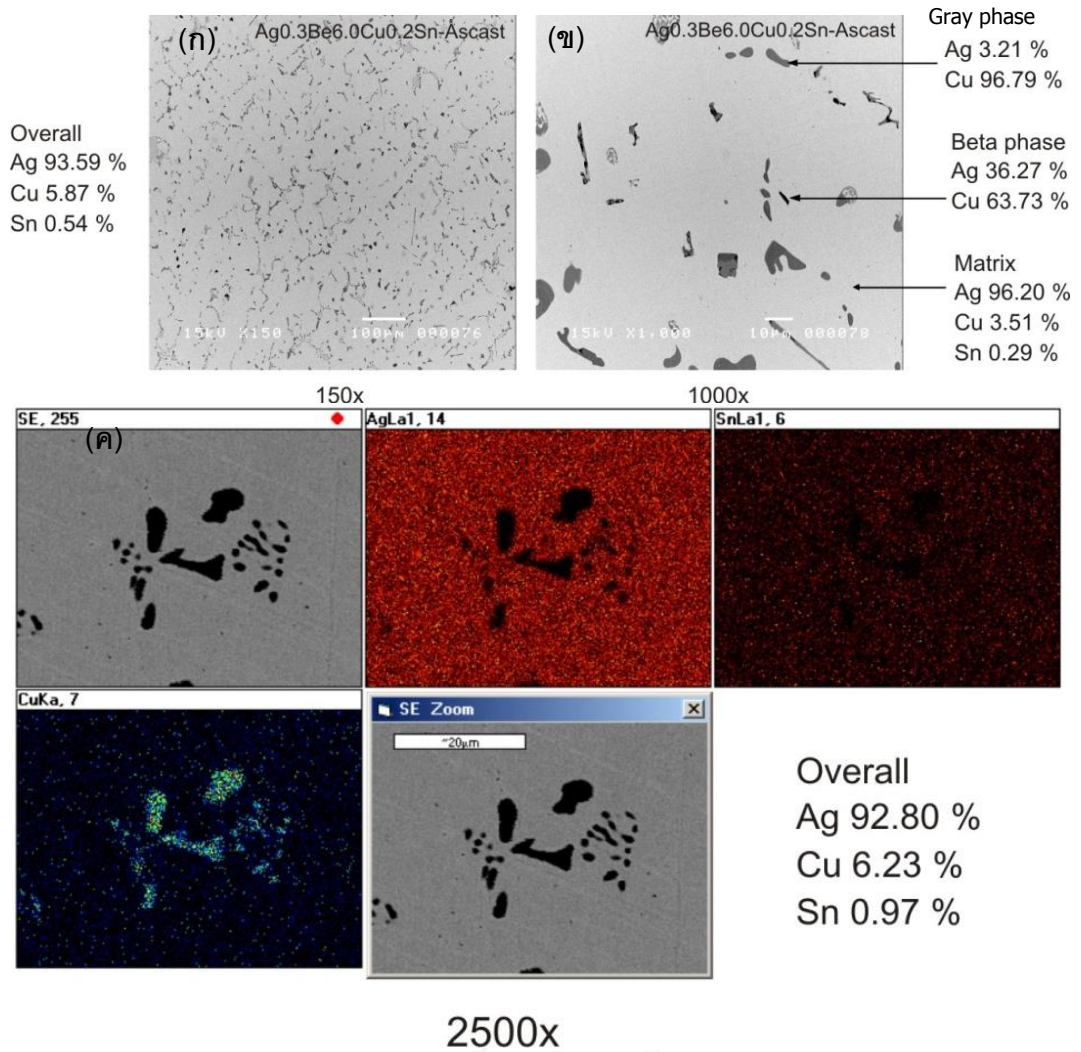


ภาพที่ 4.4 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu0.3Sn ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2000 เท่า

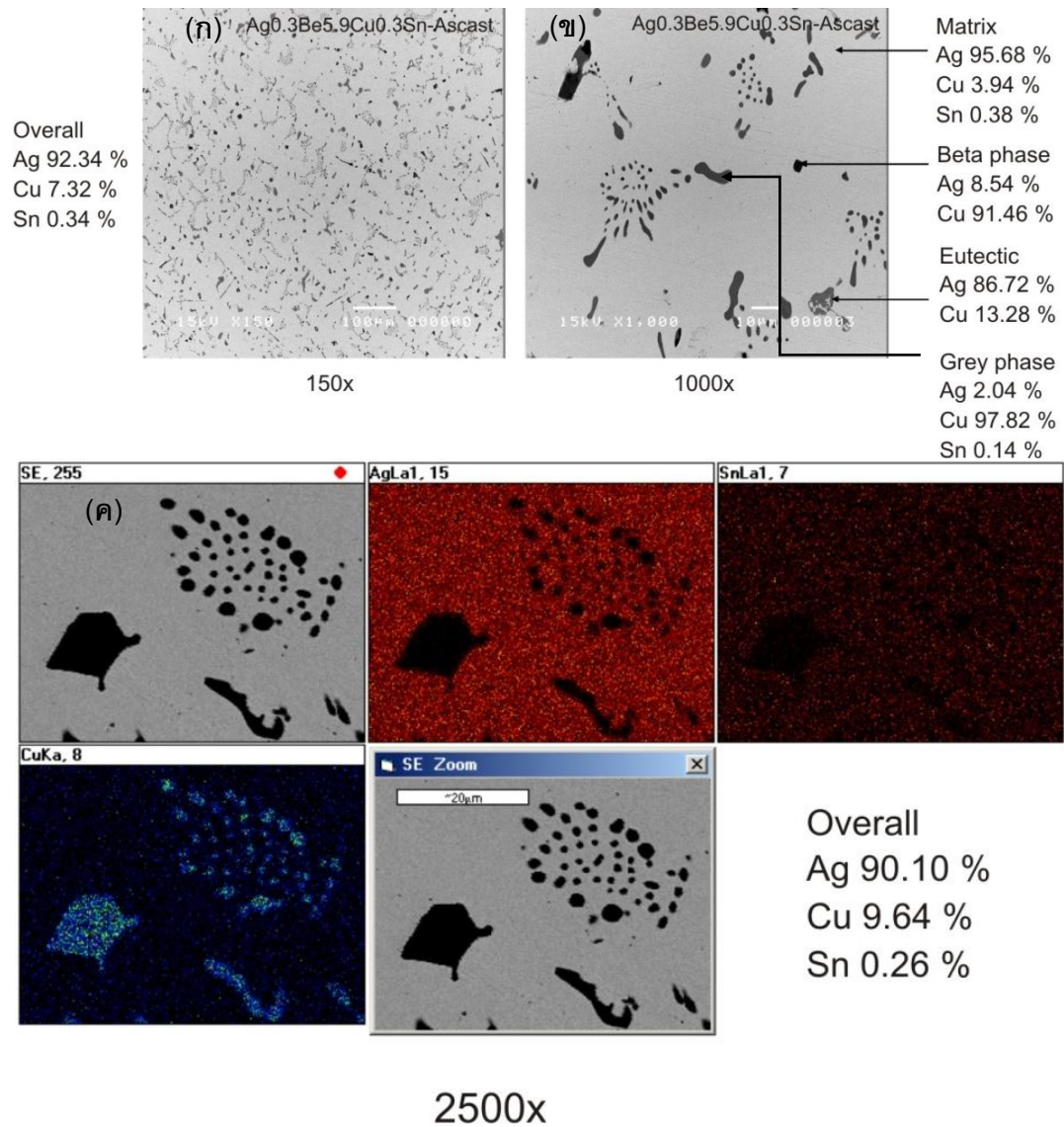
ผลจากการเติมธาตุเบริลเลียม (Be) 0.3% โดยน้ำหนัก และการปรับเติมธาตุดีบุกในช่วง 0.2%, 0.3% และ 0.5% โดยน้ำหนัก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล พบว่า การเติมธาตุเบริลเลียมลงไปเพียง 0.3% นั้นทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นั่นคือ ลักษณะของแขนเดรนไดรท์ และระยะห่างระหว่างแขนของแดนไดรท์ลดลง ทองแดงเกิดการแยกตัวจากโครงสร้างยูเทคติก และเนื้อพื้นเงินออกมาเป็นเฟสที่สอง (Secondary phase) มากขึ้น ซึ่งพบว่ามี 2 เฟสที่เกิดขึ้น คือ เฟสสีดำ (β -phase) มีลักษณะคล้ายกับโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) และอีกเฟสเป็นสีเทา (Grey phase) ซึ่งมีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก

เช่นเดียวกัน โดยยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบธาตุเบริลเลียมได้ แต่เมื่อดูจากแผนภูมิเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม (ภาพที่ 2.15) แล้วสามารถสันนิษฐานว่าเฟสสีเทาที่เกิดขึ้นนั้น อาจจะเป็นเฟสของ β - CuBe หรือ β' - CuBe ก็ได้ โดยเฟสสีเทานี้ไม่พบในโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) โลหะเงินผสมทองแดงดีบุก (AgCu0.3Sn) และโลหะเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) สามารถสังเกตได้จากสีที่ปรากฏในภาพโครงสร้างจุลภาค ภาพที่ 4.5 - ภาพที่ 4.7 โดยเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่พบจะมีสีเทาหรือสีเทาจาง ๆ ซึ่งมีรูปร่าง และขนาดไม่แน่นอน (Irregular shape) จากการตรวจสอบด้วย EDX แล้วเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่เกิดขึ้นใหม่มีทองแดงเป็นธาตุประกอบหลักเช่นเดียวกันเฟสเบตา (β -phase) โดยจาก EDX พบว่าเฟสสีเทามีปริมาณของทองแดง 93 - 98% เงิน 1 - 5% และดีบุก 0 - 0.3% ยังสังเกตพบอีกว่าเมื่อมีการเติมธาตุเบริลเลียมร่วมกับดีบุกนั้น เฟสเบตา (β -phase) มีลักษณะกลมมนขึ้น ซึ่งทำให้โครงสร้างยูเทคติกเหมือนจะมีขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกันออกไปแต่ละบริเวณ แต่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาค การปรับเปลี่ยนธาตุดีบุกในช่วง 0.2 - 0.5% โดยน้ำหนักนั้น ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค แต่จะไปส่งผลกับความต้านทานการหมอง ปริมาณดีบุกที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการป้องกันการหมองเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในส่วนของการทดสอบสมบัติความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

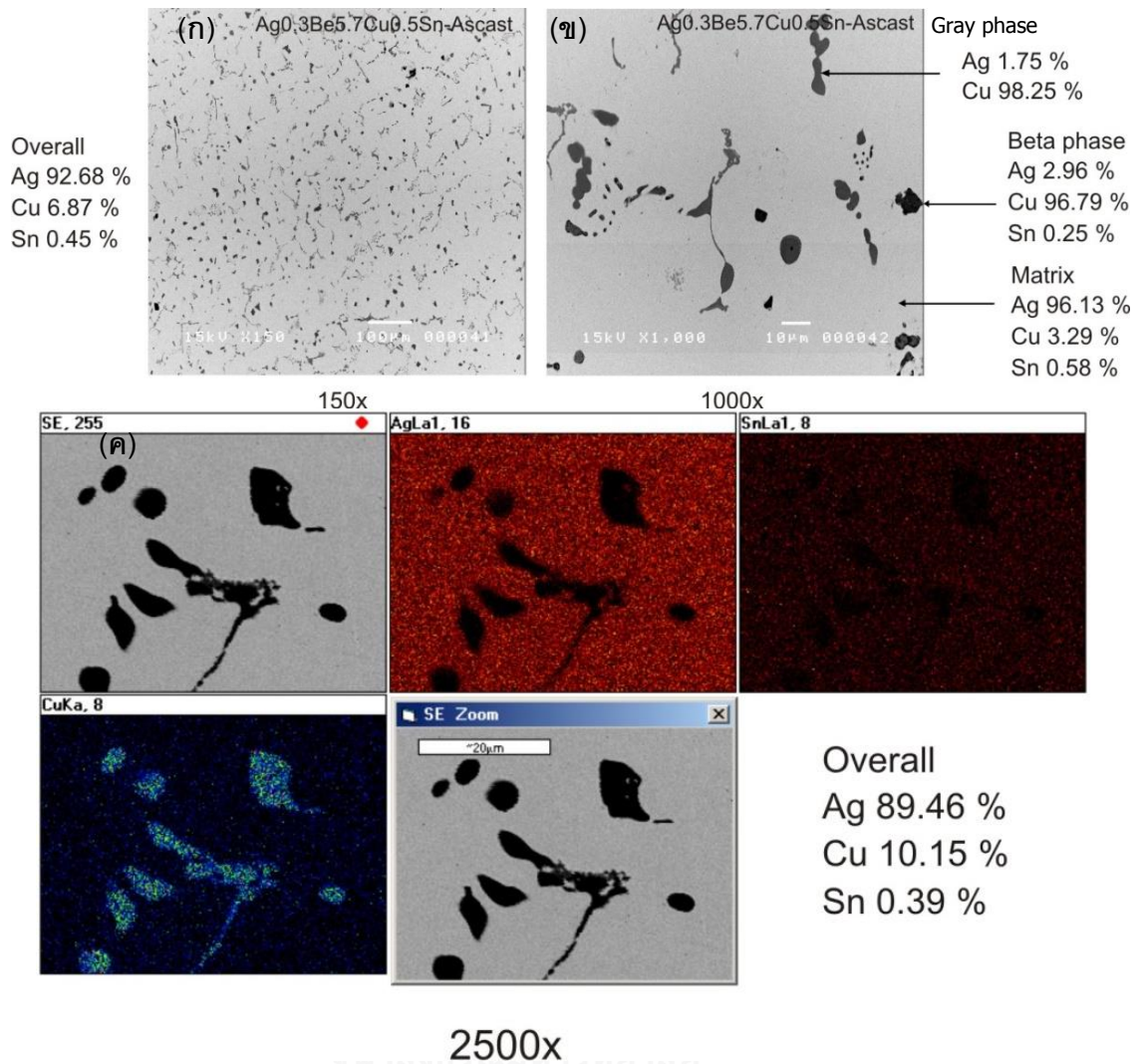
การเติมเบริลเลียมลงไปนั้น ผู้เขียนเชื่อว่าจะสามารถละลายได้ทั้งเนื้อพื้นโลหะที่เป็นเงินและโครงสร้างยูเทคติก โดยได้มีผลงานวิจัยจากโครงการ การปรับปรุงโลหะเงินสปริง เกรด 935 ด้วยเบริลเลียม [51] พบว่าการตรวจสอบด้วยเทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) เบริลเลียมสามารถกระจายตัวและอาจเกิดตะกอนขึ้นในเนื้อเงิน (Matrix) และยังมีเบริลเลียมบางส่วนที่รวมตัวอยู่กับทองแดง แต่ในงานวิจัยนี้เนื่องจากธาตุเบริลเลียม เป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบา และปริมาณที่เติมลงไปน้อยมาก อีกทั้งข้อจำกัดทางเทคนิคของเครื่องมือ จึงไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิควัดการกระจายตัวของธาตุ X-ray Mapping หรือแม้แต่การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX



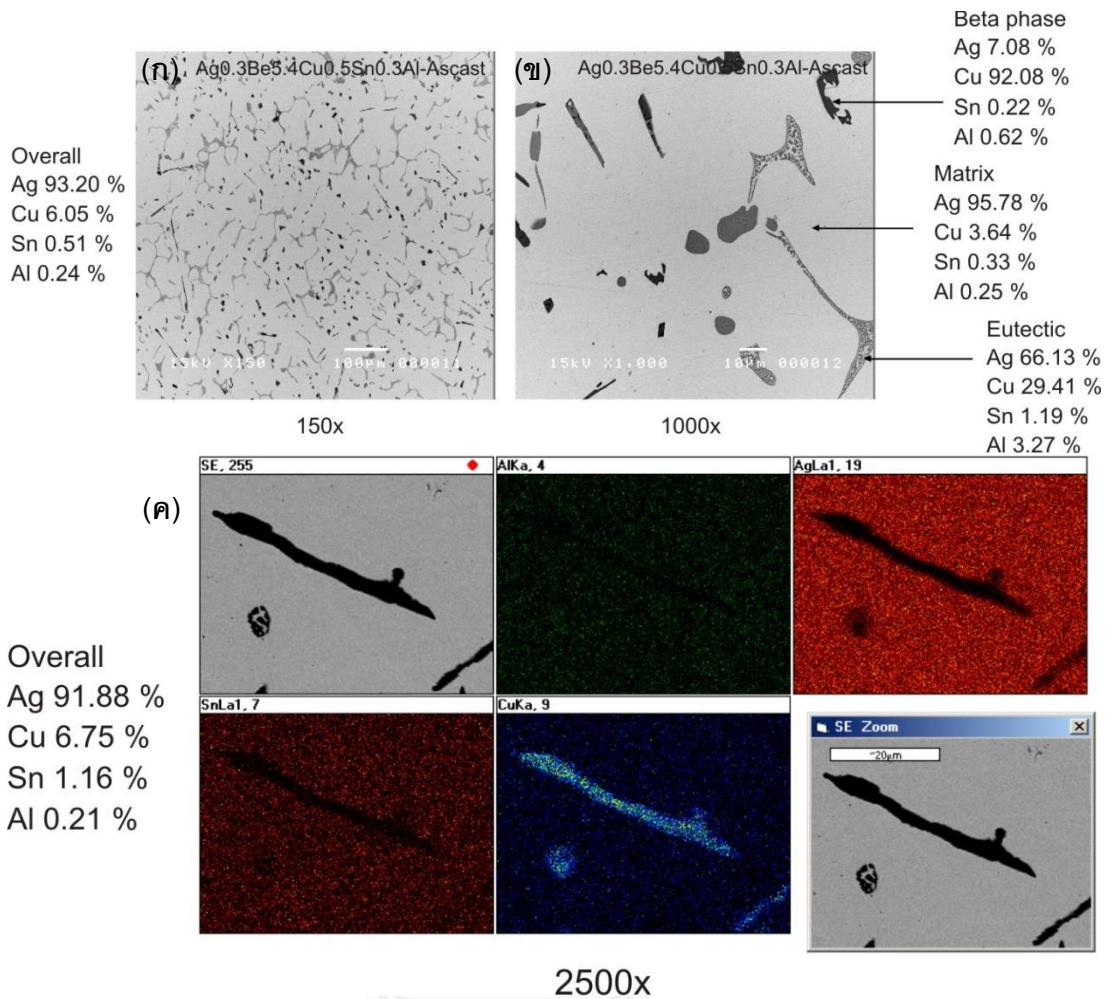
ภาพที่ 4.5 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ 4.6 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500 เท่า



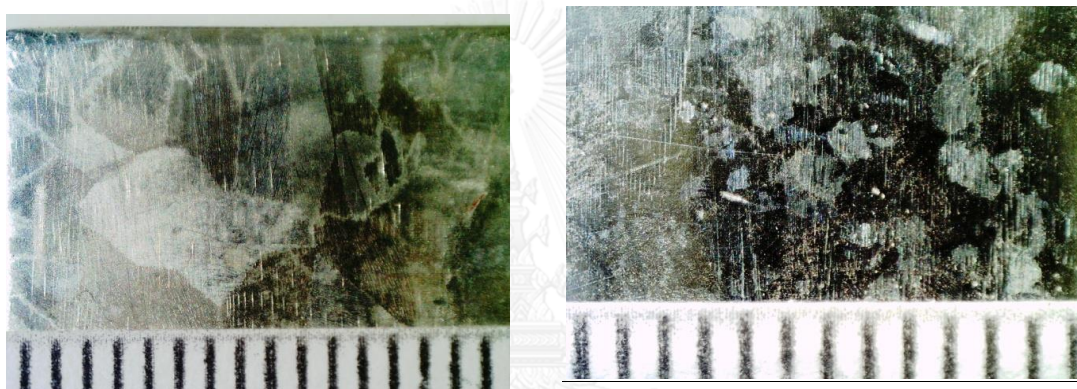
ภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$ ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ 4.8 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al ที่ได้จากกล้อง SEM, (ค) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วย X-ray Mapping กำลังขยาย 2500 เท่า

ภาพที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงชุด AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al มีการเติมธาตุผสมมากขึ้น โดยปริมาณธาตุผสมที่เติม มีดังนี้ เงิน ทองแดง 5.4%เบริลเลียม 0.3% ดีบุก 0.5% และอะลูมิเนียม 0.3% โดยน้ำหนัก คือมีการเติมธาตุ ดีบุก เบริลเลียมร่วมกับอะลูมิเนียมอีกด้วย จากการตรวจสอบพบว่า โครงสร้างจุลภาคเป็นแบบผสมคล้ายกับโครงสร้างจุลภาคทั้งหมดที่กล่าวมา คือ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ โดยเกรนมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานชุดอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเงินสูง 95.78% ทองแดง 3.64% ดีบุก 0.33% และอะลูมิเนียม 0.62% กับโครงสร้างยูเทคติกเป็นหลัก เช่นเดิมโดยประกอบด้วย 2 เฟส เฟสเบตา (β -phase) ซึ่งมีสีดำ และเฟสสีเทา (Grey phase) ลักษณะที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ โครงสร้างยูเทคติกมีเงินเป็นส่วนประกอบ 66.13% ทองแดง

29.41% ดีบุก 1.19% และอะลูมิเนียม 3.27% เฟสเบตา (β -phase) พบทั้งที่มีลักษณะเป็นกลมมน ลักษณะเป็นเส้นริ้ว ๆ และลักษณะรูปร่างอื่น ๆ อีกหลายแบบ ประกอบด้วยเงิน 7.08% ทองแดง 92.08% ดีบุก 0.22% และอะลูมิเนียม 0.62% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบเฟสสีเทา (Grey phase) ซึ่งมาจากการที่ทองแดงแยกตัวออกมารวมตัวกันด้วยเช่นกัน โดยกระจายอยู่เต็มโครงสร้างเช่นเดียวกับเฟสเบตา ธาตุอะลูมิเนียมที่พบจะกระจายตัวอยู่ทั้งโครงสร้างพื้นและโครงสร้างยูเทคติก แต่เมื่อสังเกตจากผลของ X-ray Mapping พบปริมาณอะลูมิเนียมในโครงสร้างพื้น (Matrix) มากกว่าในโครงสร้างอื่น ๆ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถตรวจพบธาตุเบริลเลียมได้ด้วยเทคนิค EDX และ X-ray Mapping



(ก) AgCu0.3Sn – As cast

(ข) AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – As cast

ภาพที่ 4.9 ขนาดเกรนชิ้นงานสภาพหลังหล่อของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

(ก) AgCu0.3Sn และ (ข) AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al

ภาพที่ 4.9 แสดงขนาดเกรนที่ได้หลังทำการทดสอบหาขนาดเกรนโดยการกัดกรดชิ้นงานสภาพหลังหล่อด้วยกรดโครมซิก (กรดโครมิก 5 กรัมต่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร ผสมด้วยกรดซัลฟิวริก 20% โดยปริมาตร) และวิเคราะห์ขนาดเกรนพบว่า การเติมอะลูมิเนียม ร่วมกับเบริลเลียมและดีบุกนั้น มีผลทำให้เกรนที่ได้เล็กลงเยียดขึ้น วัดขนาดเกรนได้ประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนที่ได้จากชิ้นงาน เบริลเลียมและอะลูมิเนียม (AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al, ภาพ 4.9 (ข)) กับโลหะผสมทองแดง ดีบุก (AgCu0.3Sn, ภาพ 4.9 (ก)) ซึ่งวัดขนาดเกรนได้ 3.0-7.0 มิลลิเมตร ขนาดเกรนที่ได้เล็กลงเยียดกว่าประมาณ 3 – 6 เท่า ซึ่งขนาดเกรนที่ได้จะส่งผลต่อสมบัติทางกลต่อไป

จากผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทั้ง 7 ชุดโลหะเงินผสม สามารถสรุปได้ว่า การเติมทองแดงจะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติกขึ้น ซึ่งส่วนผสมในแต่ละเฟสสามารถดูได้จากตารางที่ 4.2 นอกจากนี้การเติมอะลูมิเนียม จะพบว่า โครงสร้างยูเทคติกยังคงมีลักษณะคล้ายกับโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) อย่างไรก็ตาม ผลของธาตุตีบุกส่งผลให้เห็นชัดเจนว่า เมื่อปริมาณตีบุกเพิ่มมากขึ้น จะทำให้โครงสร้างยูเทคติก มีลักษณะที่เปลี่ยนไป จากแถบสลับไปมา เริ่มมีการเกิดการจับรวมตัวกันเป็นก้อนมากขึ้นของเฟสที่สอง และมีผลทำให้โครงสร้างยูเทคติกลดน้อยลง

การเติมอะลูมิเนียม ตีบุก พบว่า ทำให้ทองแดงในเนื้อพื้น (Matrix) ลดน้อยลง ซึ่งน่าจะมาจากธาตุผสมเหล่านี้เข้าไปละลายในเนื้อพื้นมากขึ้น แล้วปริมาณทองแดงจะลดลง จะเห็นได้ชัดว่าชุดโลหะผสมเกือบทุกชุดจะมีปริมาณทองแดงในโครงสร้างพื้นอยู่ในระดับ 3 – 4% ในขณะที่โลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) มีปริมาณทองแดงในเนื้อพื้นสูงถึง 5.99% และทองแดงที่ลดลงดังกล่าว นั้น แยกตัวออกมาเป็นเฟสที่สอง (ก้อนทองแดง) ซึ่งไม่ใช่ลักษณะของโครงสร้างยูเทคติก และเฟสที่สองที่เกิด ซึ่งมีปริมาณทองแดงสูงมากถึงระดับ 80 – 90% อันจะส่งผลต่อสมบัติทางกล โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.5 สมบัติทางกล

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคแต่ละบริเวณด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ชิ้นงานสภาพหลังหล่อ (As-cast)

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------|----|------|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu | Balance | 6.5 | - | - | - |
| Overall | 93.72 | 6.28 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.01 | 5.99 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.82 | 25.18 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu0.3Al | Balance | 6.2 | - | - | 0.3 |
| Overall | 93.10 | 6.52 | - | - | 0.37 |
| Matrix (White) | 96.67 | 3.16 | - | - | 0.17 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 8.81 | 86.23 | - | - | 4.96 |
| AgCu0.3Sn | Balance | 6.2 | - | 0.3 | - |
| Overall | 94.72 | 4.77 | - | 0.51 | - |
| Matrix (White) | 95.47 | 3.86 | - | 0.67 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 78.55 | 21.45 | - | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 5.28 | 94.15 | - | 0.57 | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------|-----|------|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.2Sn | Balance | 6.0 | 0.3 | 0.2 | - |
| Overall | 93.59 | 5.87 | ND | 0.54 | - |
| Matrix (White) | 96.20 | 3.51 | ND | 0.29 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 36.27 | 63.73 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 3.07 | 96.93 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn | Balance | 5.9 | 0.3 | 0.3 | - |
| Overall | 92.34 | 7.32 | ND | 0.34 | - |
| Matrix (White) | 95.68 | 3.94 | ND | 0.38 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 86.72 | 13.28 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 8.54 | 91.46 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 2.04 | 97.82 | ND | 0.14 | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn | Balance | 5.7 | 0.3 | 0.5 | - |
| Overall | 92.68 | 6.87 | ND | 0.45 | - |
| Matrix (White) | 96.13 | 3.29 | ND | 0.58 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 2.96 | 96.79 | ND | 0.25 | - |
| Grey phase | 1.79 | 98.21 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al | Balance | 5.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 |
| Overall | 93.20 | 6.05 | ND | 0.51 | 0.24 |
| Matrix (White) | 95.78 | 3.64 | ND | 0.33 | 0.25 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.13 | 29.41 | ND | 1.19 | 3.27 |
| Beta phase (Black) | 7.08 | 92.08 | ND | 0.22 | 0.62 |
| Grey phase | N/A | N/A | ND | N/A | N/A |

หมายเหตุ

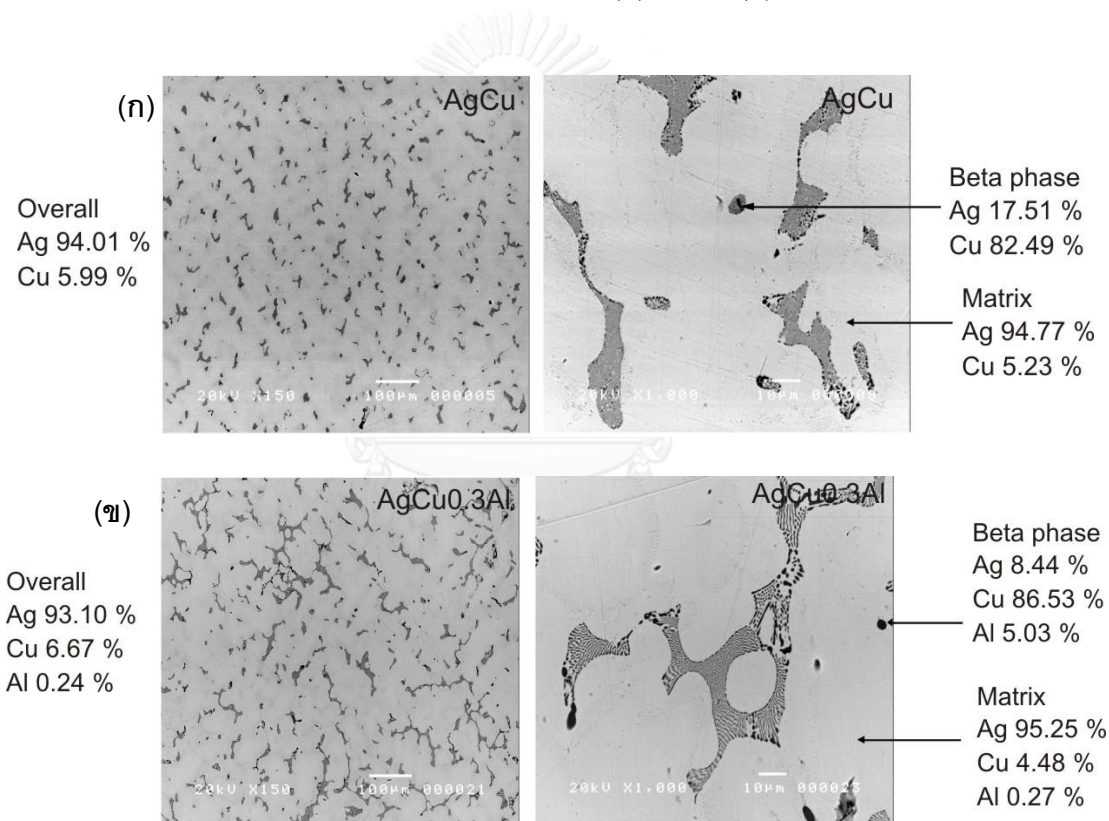
*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

***ส่วนผสมทางเคมีโครงสร้างจุลภาคแต่ละบริเวณด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ของโลหะผสมชุดอื่น ๆ ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ณ เวลา และ อุณหภูมิต่าง ๆ ทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ค.

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน คือ การอบบ่ม (Aging) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานด้วยการตกตะกอน (Precipitation hardening) โดยใช้ อุณหภูมิในการอบ ที่ 350°C และ 400°C เป็นระยะเวลา 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ พบว่าหลังผ่านการอบบ่ม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนด้วยภาพถ่าย SEM ที่ กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคที่สังเกตเห็น ก็ยังคง ประกอบด้วย ลักษณะของโครงสร้างเดนไดรต์ โครงสร้างยูเทคติก และเฟสที่สองที่ยังสามารถพบได้ แต่โดยรวมจากภาพถ่ายแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างโดยทั่วไปเหมือนเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานสภาพหลังหล่อ ดังภาพที่ 4.10 (ก) – 4.10 (ข) และภาคผนวก ค.



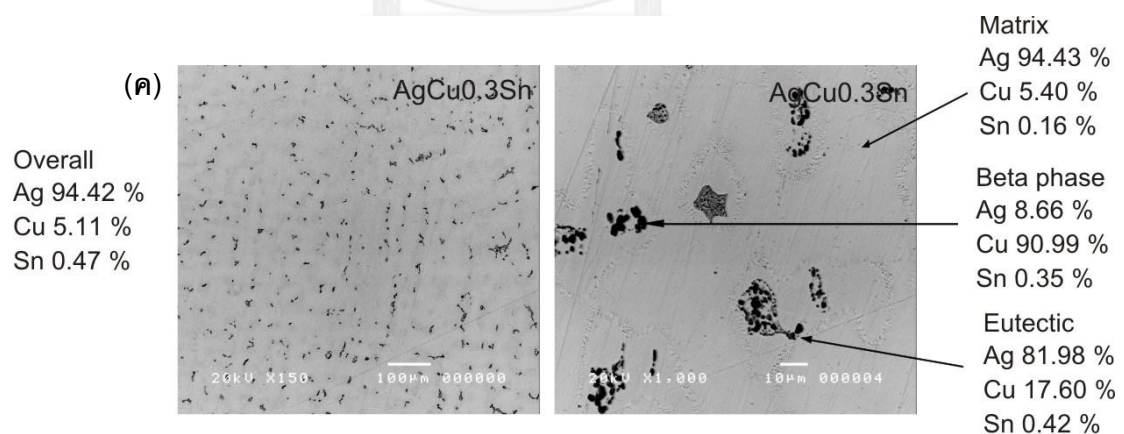
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม
หลังผ่านกระบวนการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที

(ก) โลหะเงินผสม AgCu

(ข) โลหะเงินผสม AgCu0.3Al

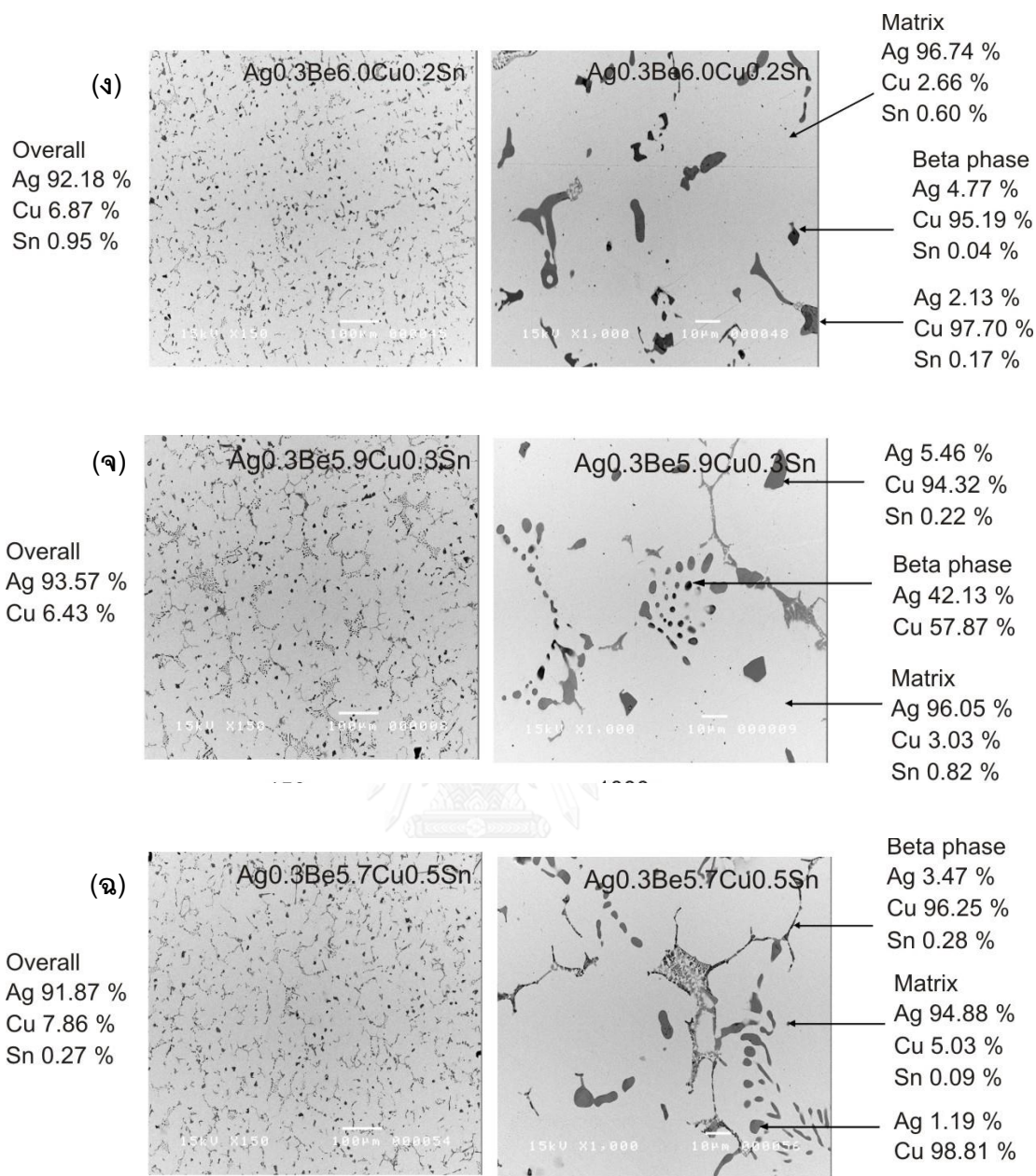
จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS โลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) ภาพที่ 4.10 (ก) ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นมีเงิน 94.77 % ทองแดง 5.23% มีโครงสร้างยูเทคติก และเฟสเบตา (สีดำ) เกิดขึ้นโดยเฟสเบตา ประกอบด้วย เงิน 17.51 % ทองแดง 82.49% ในการเติมอะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) ดังภาพที่ 4.10 (ข) อะลูมิเนียมทำให้โครงสร้างยูเทคติกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปรวมตัวกันมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับชิ้นงานสภาพหลังหล่อดั่งที่กล่าวมาแล้ว โดยโครงสร้างพื้น มีเนื้อเงินเป็นองค์ประกอบ 95.25% ทองแดง 4.48% และอะลูมิเนียม 0.27% ในเฟสของเบตามีเงิน 8.44% ทองแดง 86.53% อะลูมิเนียม 5.03% โลหะเงินผสมทองแดงและดีบุก (AgCu0.3Sn) ภาพที่ 4.10 (ค) ก็พบลักษณะเดียวกัน ซึ่งเนื้อพื้นประกอบด้วย เงิน 94.43% ทองแดง 5.40% ดีบุก 0.16, โครงสร้างยูเทคติก พบมีธาตุเงิน 81.98% ทองแดง 17.60% ดีบุก 0.42% ในส่วนของเฟสเบตามีทองแดงสูง 90.99% เงิน 8.66% และดีบุก 0.35%

ชุดโลหะเงินที่มีการเติมทั้งทองแดง เบริลเลียม และดีบุกโดยการควบคุมธาตุดีบุกให้อยู่ในช่วงของ 0.2 – 0.5% นั้น ภาพที่ 4.10 (ง) – ภาพที่ 4.10 (จ) นอกจากจะพบโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟสอัลฟา โครงสร้างยูเทคติก แล้วยังพบเฟสที่สองขึ้น 2 ลักษณะเห็นได้อย่างชัดเจนจากสีที่ปรากฏในภาพ คือ เฟสเบตาที่เป็นสีดำ และเฟสสีเทา โดยทั้งสองเฟสนี้ มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปริมาณธาตุที่พบในเฟสต่าง ๆ หลังทำการอบบ่มใกล้เคียงกับปริมาณที่ได้จากชิ้นงานทดสอบสภาพหลังหล่อ



ภาพที่ 4.10 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม
หลังผ่านกระบวนการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที

(ค) โลหะเงินผสม AgCu0.3Sn



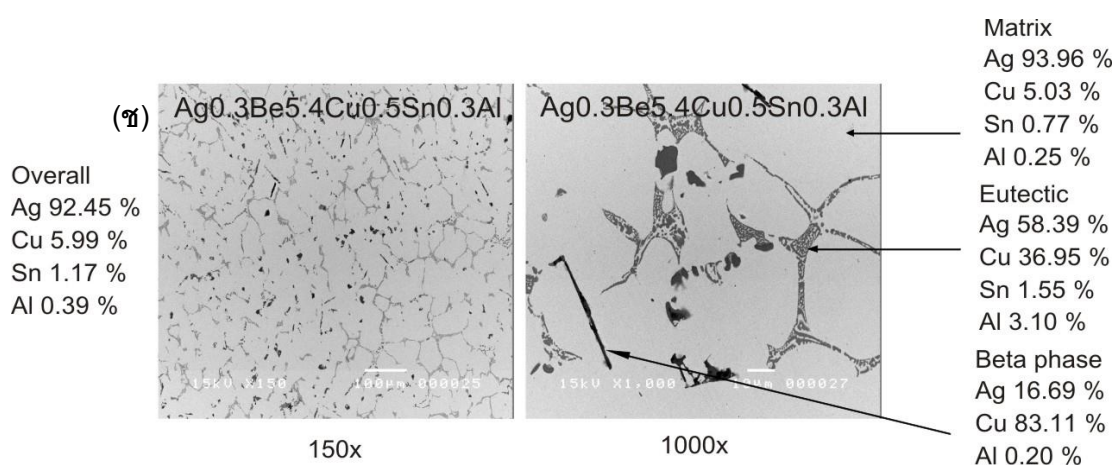
ภาพที่ 4.10 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม
หลังผ่านกระบวนการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 120 นาที

(ง) โลหะเงินผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.2}\text{Sn}$

(จ) โลหะเงินผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.3}\text{Sn}$

(ฉ) โลหะเงินผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$

โครงสร้างจุลภาคหลังการอบบ่มของโลหะเงินผสมทองแดง ดีบุก เบริลเลียม และ อะลูมิเนียม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$ ดังภาพที่ 4.10 (ข) นั้นพบเฟสต่างๆ มากมายรวมอยู่ใน ชิ้นงานทดสอบนี้ โดยมีรูปร่างลักษณะต่างๆ เหมือนกับโครงสร้างที่ได้หลังหล่อ พบทั้งโครงสร้าง พื้นทีประกอบไปด้วย เงิน 93.96% ทองแดง 5.03% ดีบุก 0.77% อะลูมิเนียม 0.25% และ โครงสร้างยูเทคติกที่มีเงิน 58.39% ทองแดง 36.95% ดีบุก 1.55% อะลูมิเนียม 3.10% รวมถึงพบ เฟสเบตาและเฟสซีเทาอยู่ด้วย ซึ่งทั้งสองเฟสนี้มีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูงถึง 83% โดยรวมนั้น โครงสร้างที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพหลังหล่อ



ภาพที่ 4.10 (ต่อ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม หลังผ่านกระบวนการอบบ่มที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$ เวลา 120 นาที

(ข) โลหะเงินผสม $AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al$

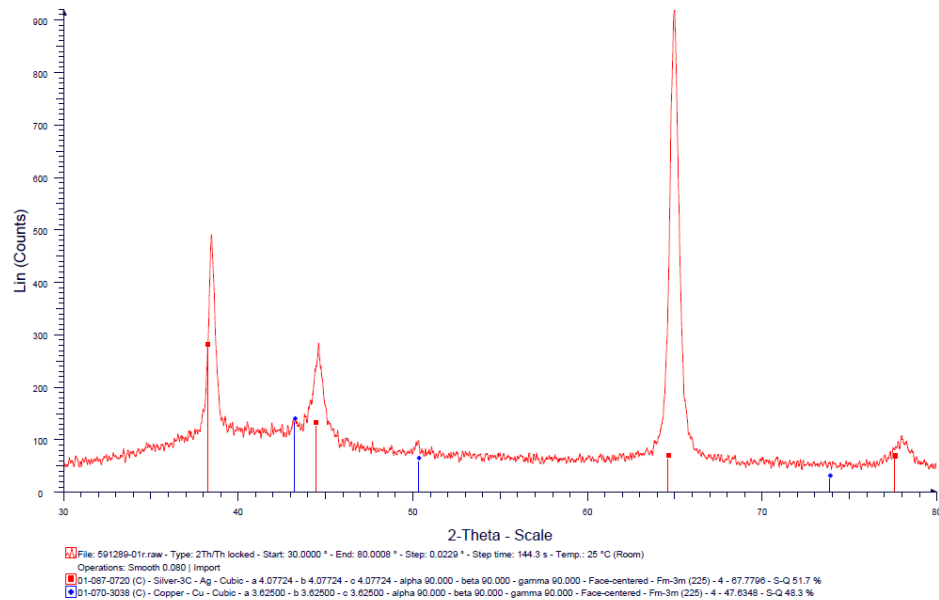
4.4 การหาธาตุและสารประกอบต่างๆ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการตรวจสอบชิ้นงานโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงเพื่อหาธาตุและสารประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ของโลหะผสมทั้ง 10 ชุด ประกอบด้วย

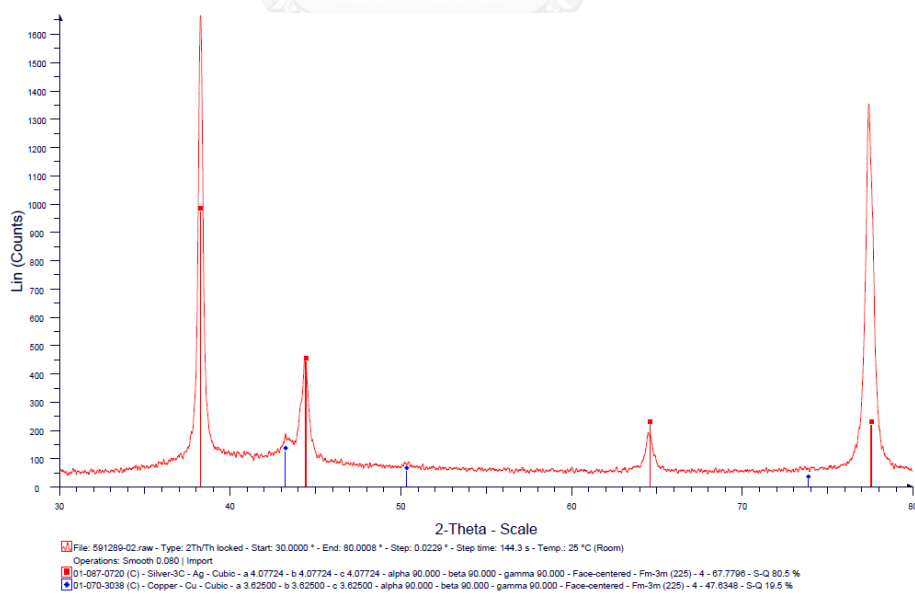
1. โลหะเงินผสม AgCu สภาพหลังหล่อ
2. โลหะเงินผสม AgCu หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง
3. โลหะเงินผสม AgCu0.3Al สภาพหลังหล่อ
4. โลหะเงินผสม AgCu0.3Al หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง
5. โลหะเงินผสม AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ
6. โลหะเงินผสม AgCu0.3Sn หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง
7. โลหะเงินผสม AgCu0.3Be0.5Sn สภาพหลังหล่อ
8. โลหะเงินผสม AgCu0.3Be0.5Sn หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง
9. โลหะเงินผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาพหลังหล่อ
10. โลหะเงินผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C

พบว่าค่าความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์หรือสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้ ดังปรากฏขึ้นกราฟ XRD จะเป็นค่าโครงสร้างผลึกของธาตุเงินและทองแดง เนื่องจากปริมาณเงินและทองแดงมีปริมาณสูง และผลจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3 ดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่ได้ประกอบด้วยเนื้อพื้น (Matrix) ที่มีเงินสูง และทองแดงที่อยู่ในโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างของเฟสอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารละลายของแข็ง และเป็นสารประกอบหลังการอบบ่มที่น่าจะมีปริมาณน้อย จึงไม่สามารถตรวจสอบพบได้ด้วยเทคนิคนี้ จึงพบความเข้มของสัญญาณเฉพาะของเงินและทองแดง ผลของการเติมอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวในปริมาณ 0.3% (โลหะผสมชุดที่ 3 ในภาพที่ 4.13 และชิ้นงานที่ 4 ในภาพที่ 4.14) พบความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งมุม 42.736° (scale 2 theta) จึงอาจจะเป็นไปได้ว่าเป็นสัญญาณ (Peak) ของสารประกอบ AlCu₃ โดยพบทั้งในชิ้นงานสภาพหลังหล่อและชิ้นงานหลังผ่านการอบบ่ม ส่วนผลของการเติมเบริลเลียม ดีบุก และอะลูมิเนียมร่วมกันในชิ้นงานอื่น ๆ นั้น (โลหะผสมชุดที่ 5 – 10 ในภาพที่ 4.15 – 4.20) พบเฉพาะสัญญาณของธาตุเงินและทองแดง โดยไม่พบสารประกอบอื่นใด ๆ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะ การละลายตัวของธาตุที่เติมลงไป และปริมาณที่ใส่อยู่ในระดับต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจสอบพบด้วยเทคนิค XRD ได้ เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ อย่างไรก็ตาม สามารถยืนยันปริมาณธาตุผสมที่เติมลงไปในแต่ละชุดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลองได้

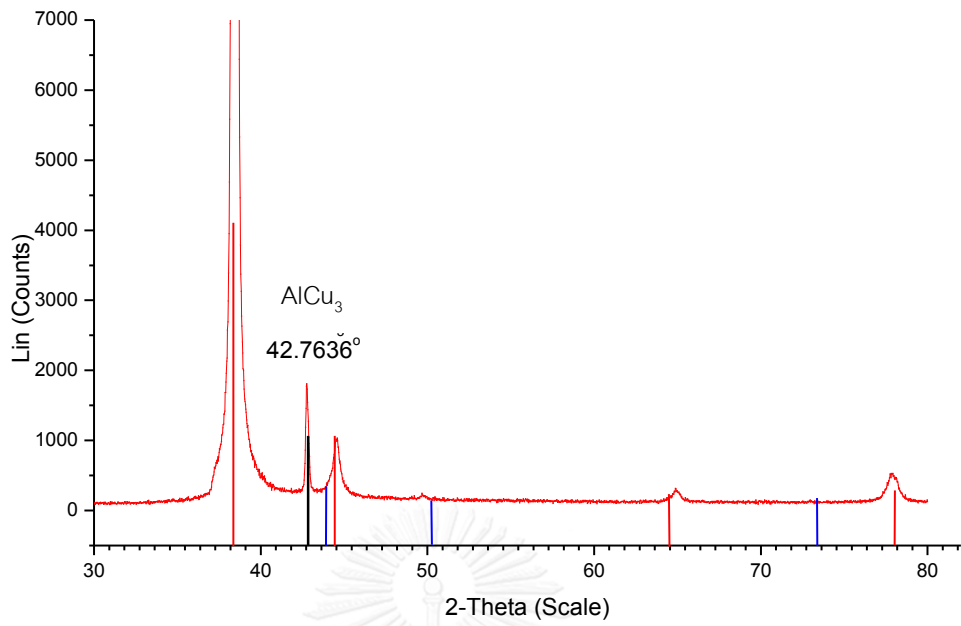
ด้วยวิธี Inductively Couple Plasma Spectroscopy (ICP-OES) ผลของการตรวจสอบ XRD เป็นไปดังภาพที่ 4.11 – 4.20



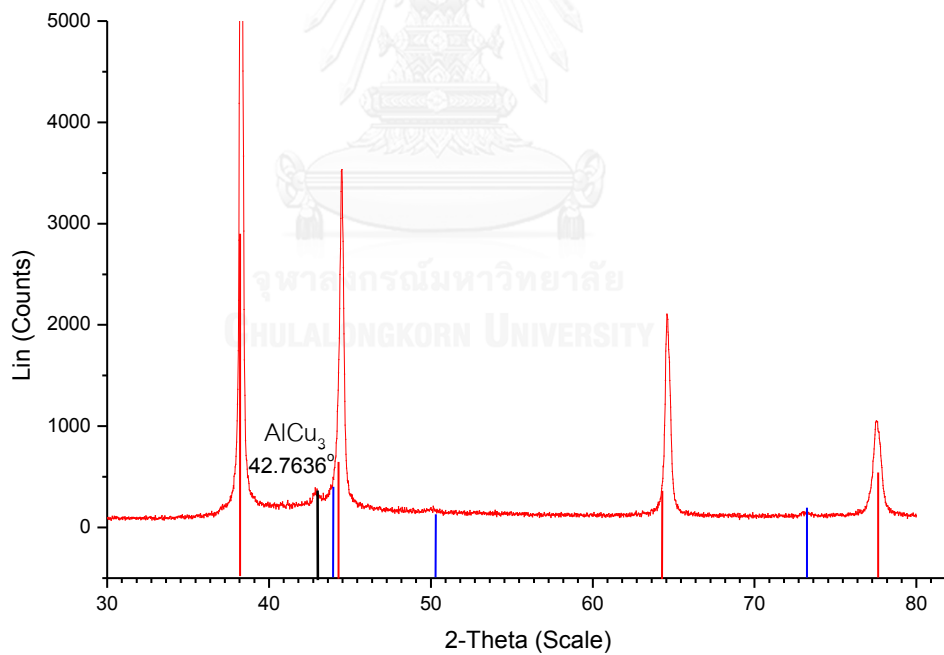
ภาพที่ 4.11 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu สภาวะหลังหล่อ



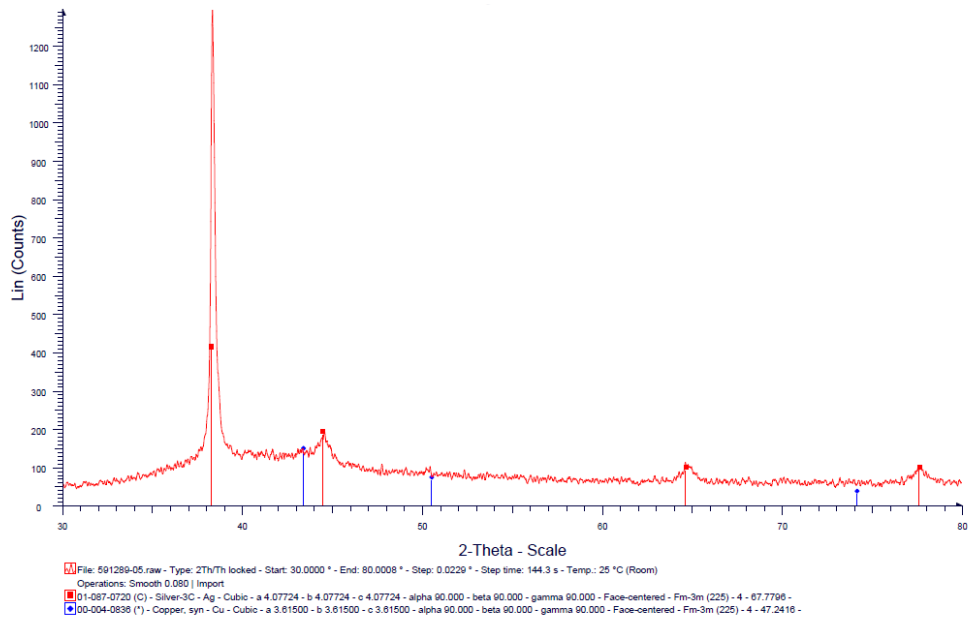
ภาพที่ 4.12 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง



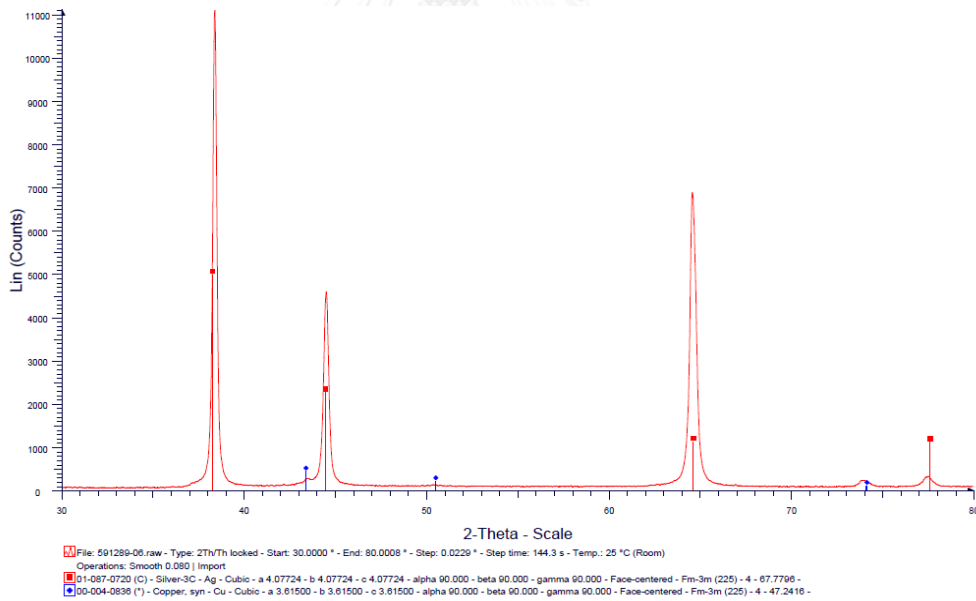
ภาพที่ 4.13 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu_{0.3}Al สภาพหลังหล่อ



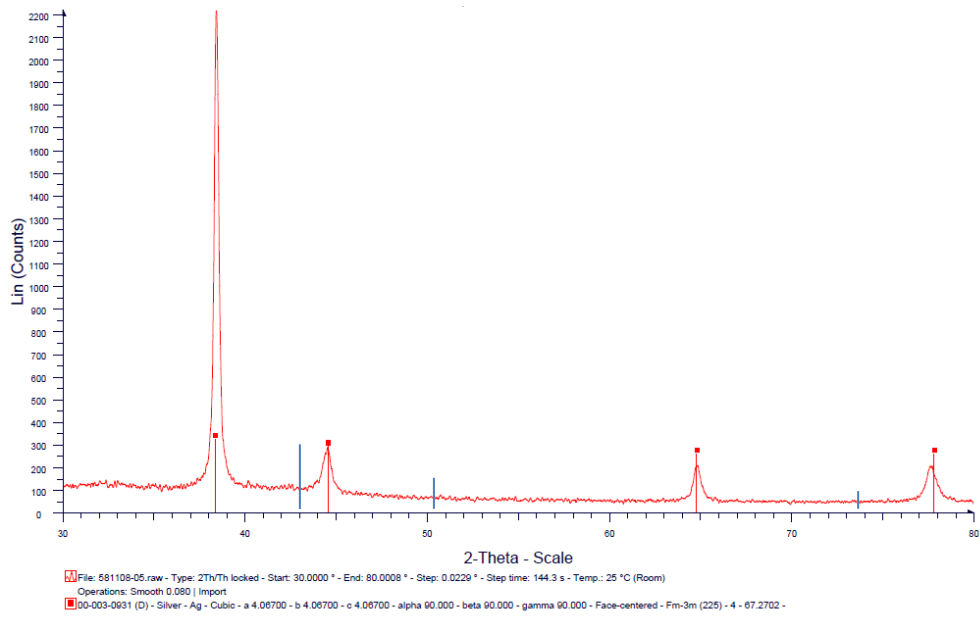
ภาพที่ 4.14 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu_{0.3}Al
หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง



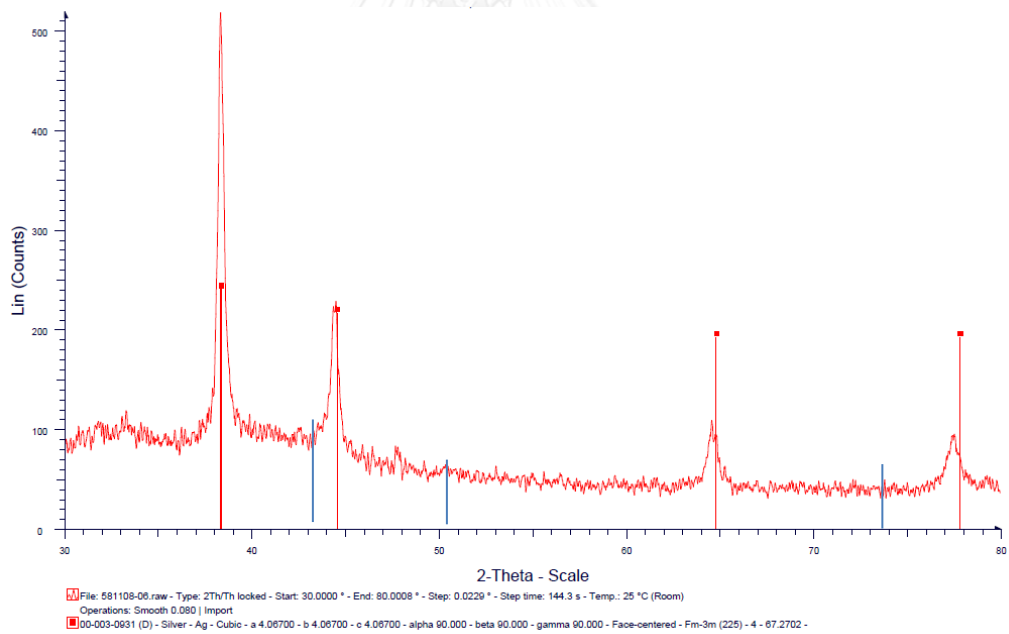
ภาพที่ 4.15 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu_{0.3}Sn สภาพหลังหล่อ



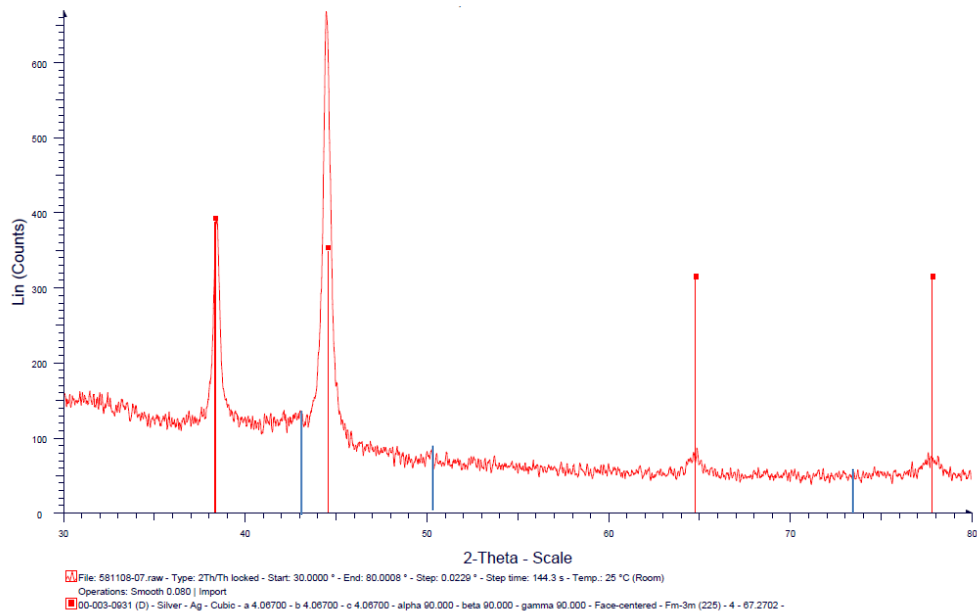
ภาพที่ 4.16 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม AgCu_{0.3}Sn
 หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง



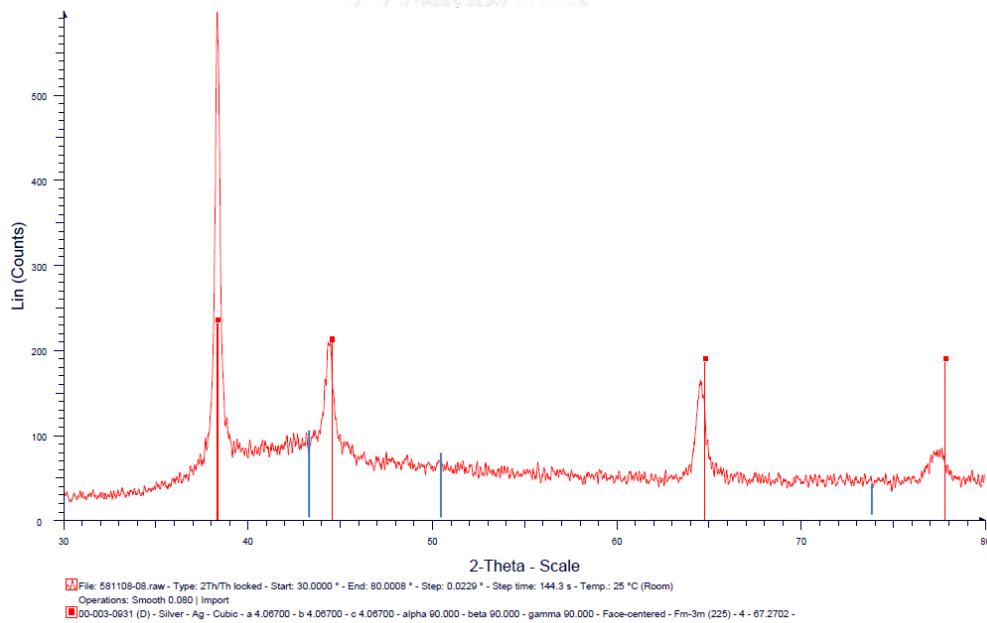
ภาพที่ 4.17 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$ สภาพหลังหล่อ



ภาพที่ 4.18 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$
หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.19 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ สภาพหลังหล่อ



ภาพที่ 4.20 กราฟ XRD ของชิ้นงานโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$
 หลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 2 ชั่วโมง

4.5 ผลของสมบัติด้านทานการหมองและการเปลี่ยนสีหลังการทดสอบ

วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติการหมอง ดำเนินการโดยการหล่อต้นโลหะเงินสเตอร์ลิงและล้างทำความสะอาดเอาปูนออกหมดแล้ว ตัดชิ้นงานทดสอบการหมองจากต้นโลหะเงินเจาะรูบริเวณด้านบนของชิ้นงานทดสอบ เพื่อไว้สำหรับแขวนขณะทดสอบการหมอง ซึ่งการทดสอบสมบัติการต้านทานการหมองนั้น จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของชิ้นงานสภาพหล่อ (As-cast) และชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยการอบบ่ม ที่อุณหภูมิและเวลาการอบบ่มต่าง ๆ โดยนำมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีเฉพาะอุณหภูมิ 350°C และ 400°C ส่วนเวลาในการอบบ่มให้ 30 และ 60 นาที

หลังจากการอบบ่มตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดแล้วชิ้นงานที่ได้จะนำไปเตรียมผิวเพื่อทดสอบ โดยการขัดเปิดผิวชิ้นงานให้เรียบด้วยกระดาษทราย หลังจากนั้นก็ทำการปิดเงาหยาบ ปิดเงาละเอียด ตามลำดับเพื่อให้ผิวชิ้นงานเรียบ ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ แล้วใช้เครื่องอัลตราโซนิกกำจัดคราบสกปรกหรือคราบน้ำมันต่าง ๆ บนผิวหน้าอีกครั้ง ล้างด้วยแอลกอฮอล์และเป่าชิ้นงานทดสอบให้แห้ง พร้อมสำหรับการทดสอบสมบัติด้านทานการหมอง

การทดสอบการหมองของชิ้นงานต้องระวัง และควรเตรียมอุปกรณ์การป้องกัน เช่น ผ้าปิดจมูก หน้ากากครอบจมูกและปาก เพื่อไม่ให้ร่างกายสูดดมก๊าซก๊าซไข่เน่า หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S : Hydrogen Sulfide Gas) เข้าไป เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ว่าเป็นก๊าซที่ค่อนข้างอันตราย ไม่มีสี แต่จะมีกลิ่นที่รุนแรง คล้ายไข่เน่า เป็นก๊าซที่มีพิษร้ายแรง ลูกติดไฟได้ง่าย ขณะที่ทำการทดสอบควรจะทำในตู้ดูดควัน หรือเลือกบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก (แต่ภาชนะที่ใช้ในวางชิ้นงานทดสอบต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีฝาปิดมิดชิด) และหลังจากการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองและนำชิ้นงานทดสอบออกจากภาชนะที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วนั้น ควรจะรีบเก็บภาพถ่ายจากชิ้นงานที่ได้แล้ววัดค่าเทียบสีทันที เพราะถ้าปล่อยชิ้นงานหลังทดสอบสัมผัสอากาศนานๆ จะทำให้สีและความหมองของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนไป ความหมองของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น ค่าที่วัดได้ก็จะผิดพลาดไปด้วย และเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการหมองแล้วจะได้สีของแต่ละบริเวณบนชิ้นงานแตกต่างกันไป เหตุจากการเข้าทำปฏิกิริยาของแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ดังนั้น ค่าสีและการหมองต่างๆ ที่ได้ในขั้นตอนการวัดเทียบสีด้วยเครื่องสเปคโตรคัลเลอร์มิเตอร์ (Spectrocolorimeter) จะมีค่าคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องระวังในขั้นตอนนี้ เลือกวัดจุดหรือบริเวณสีบนชิ้นงานไม่แตกต่างกันเกินไป คูภาพรวมสีที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

ในการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองนั้น ได้ดำเนินการโดยนำชิ้นงานทดสอบมาใส่ในภาชนะปิดและใช้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการทดสอบ โดยใช้เวลาการทดสอบ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการอภิปรายผลการทดลองการต้านทานการหมอง จะอภิปรายโดยแยกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มของชิ้นงานทดสอบสภาพหลังหล่อ และกลุ่มของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม ดังนี้

4.5.1 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองและสีของชิ้นงานสภาพหลังหล่อ โดยผลการทดสอบผู้วิจัยจะทำการแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ 3 กลุ่มย่อย เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบและได้เห็นภาพอย่างชัดเจน

1) กลุ่ม AgCu / AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn : กลุ่มแรก ใช้เป็นชิ้นงานอ้างอิง (Reference) จะเป็นผลของการเปรียบเทียบให้เห็นถึงกลุ่มโลหะเงินทองแดงที่นิยมหล่อเป็นเงินสเตอร์ลิงทั่วไปโดยยังไม่เติมธาตุใด ๆ กับผลของการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม และดีบุกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี (dE^*) และความหมองที่เกิดกับชิ้นงานทดสอบ

2) กลุ่ม AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn : กลุ่มที่สองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบชุดโลหะผสมที่มีการเติมธาตุผสมเบริลเลียม และดีบุกเพิ่ม ซึ่งจะมีการดูผลการเปลี่ยนแปลง เมื่อปรับค่าดีบุกระหว่าง 0.2 – 0.5%

3) กลุ่ม AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al : กลุ่มที่สาม นำชุดโลหะผสมอ้างอิงที่เติมอะลูมิเนียม ดีบุก มาเปรียบเทียบกับ ชุดธาตุผสมที่มีการเติมทั้งอะลูมิเนียม ดีบุก และเบริลเลียม เพื่อดูผลของสีและการหมองที่เกิดขึ้น

4.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ ($350^{\circ}C$, $400^{\circ}C$) และเวลาการอบบ่ม (30, 60 นาที) ที่มีต่อการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองและสีของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดสอบจะเรียงลำดับเป็นชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

- 1) ชุดโลหะผสม AgCu
- 2) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Al
- 3) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn
- 4) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn
- 5) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn
- 6) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn
- 7) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al

4.5.1 อิทธิพลของธาตุผสมต่อการทดสอบสมบัติด้านทานการหมองของชิ้นงานสภาพหลังหล่อ

1) กลุ่ม AgCu / AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn : ความหมองเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะเงินกับซัลเฟอร์ หรือสารประกอบที่มีกำมะถัน โดยการทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงิน (Ag_2S) ซึ่งมีสีดำ จึงส่งผลให้ผิวโลหะเงินดำคล้ำขึ้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงสี จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงตามลำดับ [29] ดังนี้ สีเหลืองอ่อน สีเหลือง สีเหลืองออกน้ำตาล สีน้ำตาล สีน้ำตาลแก่ สีน้ำตาลอมม่วง สีม่วงอ่อน สีม่วงแก่ สีม่วงอมน้ำเงิน สีม่วงอมฟ้า สีฟ้าอ่อน สีฟ้าอ่อน (ฟ้าขาว) สีขาวขุ่น สีเทา สีเทาดำ สีดำ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทดสอบ ในตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของโลหะเงินผสมทองแดง (ชุด AgCu) ที่นิยมผลิตเป็นเงินสเตอร์ลิงทั่วไป กับชุดโลหะผสมที่เติมเฉพาะธาตุอะลูมิเนียม (ชุด AgCu0.3Al) และดีบุก (ชุด AgCu0.3Sn) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสีผิวของชิ้นงานหลังการทดสอบค่อย ๆ หมองคล้ำขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จาก 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ในกรณีของกลุ่มที่ไม่ได้เติมธาตุผสมเลย (ชุด AgCu) นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปฏิกิริยาที่กล่าวไว้ข้างต้น และกลุ่มเงินผสมทองแดง (AgCu) นี้มีการเปลี่ยนแปลงของสีผิวและการหมองอย่างรุนแรง โดยจะเห็นว่าชิ้นงานมีความหมองคล้ำในระยะเวลาการทดสอบที่สั้นตัวอย่างเช่น ทำการทดสอบเพียงแค่ 0.5 ชั่วโมงสีผิวของชิ้นงานทดสอบก็เริ่มเปลี่ยนเป็นสีฟ้าแล้ว และเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมงสีผิวเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มค่อนข้างดำในที่สุด

ในขณะที่กลุ่มของชุดโลหะผสมที่เติมธาตุอะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) การเติมอะลูมิเนียมไปเพียง 0.3% นั้นช่วยทำให้การหมองเกิดยากขึ้น โดยสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ สีโลหะเงินค่อย ๆ เปลี่ยนมาเป็นสีเหลืองอ่อนและเข้มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อทดสอบการหมองครบ 24 ชั่วโมง สีของชิ้นงานในกลุ่มนี้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน

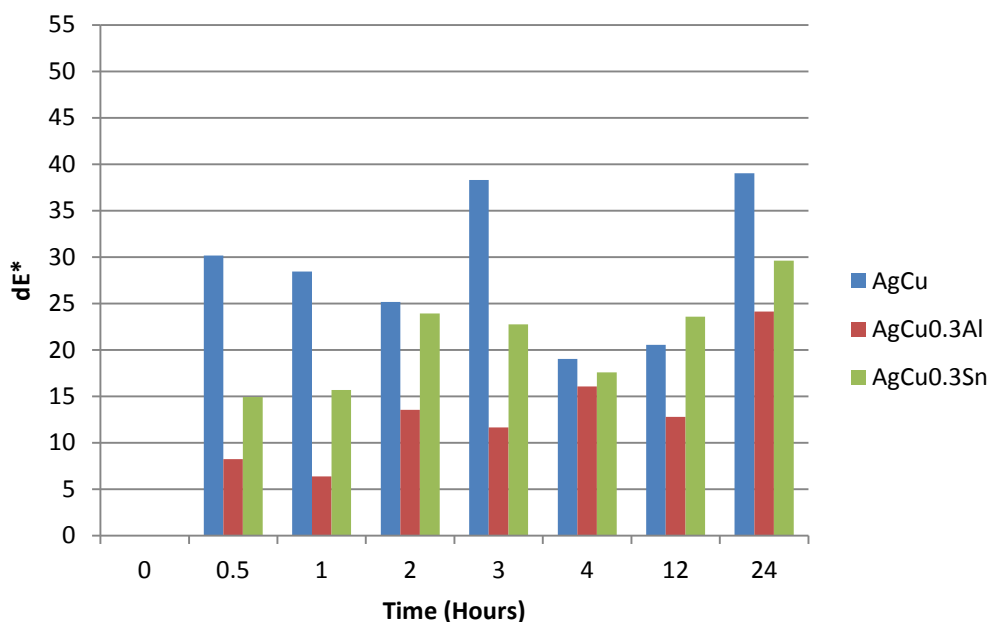
ส่วนชิ้นงานทดสอบในกลุ่มที่เติมดีบุก (AgCu0.3Sn) ก็มีการเปลี่ยนแปลงสีเช่นเดียวกันคล้ายกับกรณีของชุดโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) เมื่อทำการสังเกตเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า กลุ่มโลหะผสมที่เติมอะลูมิเนียมนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด (AgCu0.3Al) อย่างไรก็ตามได้มีการวัดค่าและเทียบสี จากเครื่องวัดเทียบสีสเปคโตรคัลเลอริมิเตอร์ ดังภาพที่ 4.21 ค่า dE^* ที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบข้างต้น ส่วนค่า dE^* ของ โลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) มีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรง โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE^* อยู่ในช่วง 19.04 – 39.01 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด สีและขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงดำเนินไปไกลที่สุด (ดูจากสีผิวของชิ้นงานเป็นสีฟ้าอย่างรวดเร็ว) รองลงมาเป็นชุดโลหะเงินผสมทองแดง ดีบุก (AgCu0.3Sn) ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* ของชุดโลหะนี้ มีค่า 14.93 – 29.6 (หลังผ่าน

การทดสอบ 24 ชั่วโมง) โดยโลหะชุดนี้นั้นมีการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยกว่าชุดเงินผสมทองแดง (AgCu) ส่วนโลหะเงินผสมทองแดงอะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) วัดค่า dE^* ได้ต่ำสุดในกลุ่มนี้ เพราะหลังผ่านการทดสอบการหมอง 24 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงสีที่วัดได้ dE^* มีค่าแค่ 24.13 เท่านั้น ธาตุอะลูมิเนียมจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสี ทำให้การหมองเกิดยากขึ้น โดยการเพิ่มเวลาในการปฏิบัติกรามีผลต่อการหมอง จะทำให้ค่า dE^* เพิ่มมากขึ้น ยกเว้นในกรณีของชุดโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) และโลหะเงินผสมทองแดงดีบุก (AgCu0.3Sn) ได้ค่า dE^* ที่ค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผลเนื่องจากในกรณีของโลหะ 2 ชุดนี้ มีการเปลี่ยนสีของผิวชิ้นงานอย่างรุนแรง โดยจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงิน ทำให้เกิดบริเวณค่าที่ได้ ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE^* จึงลดลง (ได้ค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น) แต่อย่างไรก็ตาม หลังช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสีฟ้าไปเป็นสีดำ เมื่อผ่านการทดสอบ 24 ชั่วโมงแล้วนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่า dE^* จะเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับค่าที่สูง

แม้ว่าโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) และโลหะเงินผสมทองแดงดีบุก (AgCu0.3Sn) ทั้ง 2 ชุดโลหะผสมนี้จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE^* สูงกว่าชุดโลหะเงินผสมทองแดงอะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) ก็ตาม ผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่า ชิ้นงานสภาพหลังหล่อที่นำมาตรวจสอบนั้น (ยังไม่ได้ทดสอบการหมอง ในตารางที่ 4.3 คือ 0 ชั่วโมง) มีฝ้าเกิดขึ้นหลังหล่อ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการหล่อ จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงสีที่วัดได้หลังการทดสอบน่าจะมีค่าต่ำกว่าค่าจริงที่ควรจะเป็น (ในกรณีชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีฝ้า) ฝ้าที่พบบนผิวชิ้นงาน มีลักษณะเป็นฝ้าสีแดง ซึ่งก็คือออกไซด์ของทองแดงที่เรียกกันว่า Cuprous (Cu_2O) และมีลักษณะเป็นฝ้าที่ฝังลึก แม้จะทำการขัดออกแล้วก็กำจัดไม่ได้ ยังพบฝ้าอยู่ (ยิ่งเปิดผิว ยิ่งเจอมากขึ้น) แต่ในขณะที่ชุดโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นไม่พบฝ้าที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานสภาพหลังหล่อ

ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบสมบัติต้านทานการหมองชุดอ้างอิง AgCu - AgCu0.3Al - AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast)

| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | Condition Tarnish |
|---|---|--|----------------------|
|  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  | 24 Hours |

































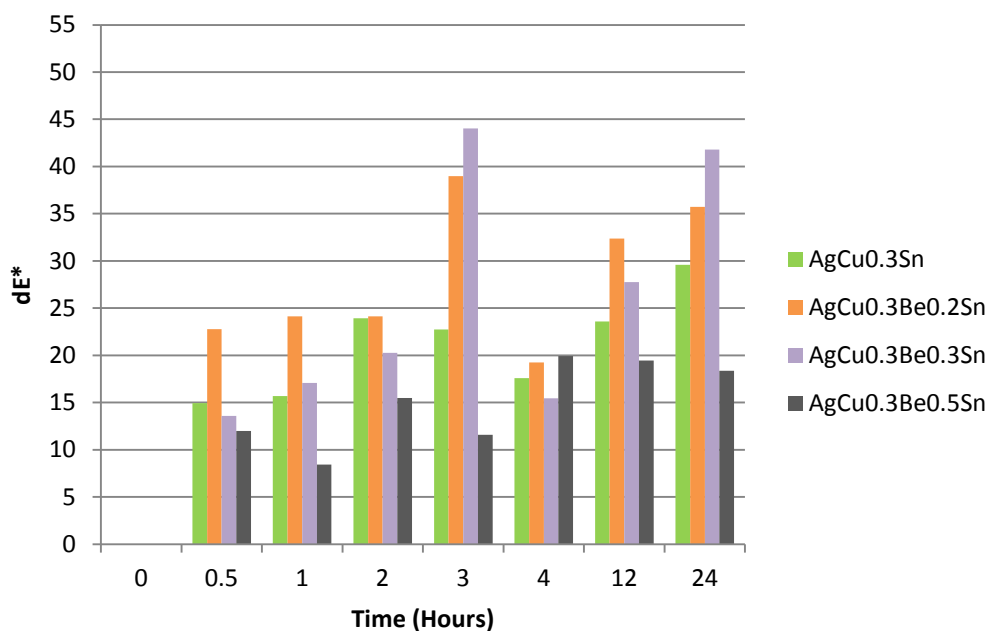
ภาพที่ 4.21 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม
AgCu - AgCu0.3Al - AgCu0.3Sn

2) กลุ่ม AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn : ในตารางที่ 4.4 กลุ่มนี้จะทำการเปรียบเทียบชุดโลหะผสมที่มีการเติมเบริลเลียม (Be) เป็นธาตุผสมเพิ่มลงไป และทำการปรับเปลี่ยนธาตุดีบุก (Sn) ในช่วง 0.2 – 0.5% โดยน้ำหนัก โดยจากตารางที่ 4.4 พบว่าสำหรับโลหะผสมชุด AgCu0.3Sn นั้นเมื่อมีการเติมธาตุเบริลเลียมลงไปเพียง 0.3% (AgCu0.3Be0.3Sn) ความต้านทานการหมองก็เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสังเกตง่าย ๆ จากสีผิวของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบสีผิวชิ้นงานเปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง สีผิวชิ้นงานสุดท้ายเปลี่ยนเป็นแค่น้ำตาลอ่อนเท่านั้น อีกทั้งยังไม่พบฝ้าแดงบนผิวสภาพหลังหล่อ ในขณะที่ชุดโลหะผสมเงินทองแดงดีบุก ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมนั้น (AgCu0.3Sn) มีความเปลี่ยนแปลงของสีค่อนข้างรุนแรง และพบฝ้าแดงฝังลึกในชิ้นงานสภาพหลังหล่อ และยังสังเกตได้ว่า สีผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีฟ้าเข้มซึ่งส่งผลต่อค่า ค่า dE^* จากการวัดเทียบสี ทำให้มีค่าลดลง แต่ความหมองที่เห็นจากในภาพก็พบว่า มีความหมองมากกว่าอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 4.22 ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมธาตุเบริลเลียม ช่วยส่งผลให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น

ในกรณีศึกษาอิทธิพลของธาตุดีบุก ที่มีปริมาณเบริลเลียมเท่ากับ 0.3% และปรับเปลี่ยนดีบุก ในช่วง 0.2 – 0.5% นั่นคือ ชุดโลหะเงินผสม AgCu0.3Be0.2Sn , AgCu0.3Be0.3Sn และ AgCu0.3Be0.5Sn เพื่อดูอิทธิพลของธาตุดีบุกที่เพิ่มขึ้นนั้นพบว่า ชิ้นงานทั้ง 3 ชุด ไม่พบการเกิด ฝ้าบนผิวชิ้นงานสภาพหล่อ และยังชี้ให้เห็นว่าการเติมปริมาณดีบุกที่เพิ่มมากขึ้นนั้น เพิ่มความสามารถต้านทานการหมองให้แก่โลหะเงินสเตอร์ลิงได้ดี ชิ้นงานทั้งหมดค่อย ๆ เปลี่ยนสี ซ้ำลง ๆ เมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นจาก 0.2, 0.3 ถึง 0.5% สีค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงจากสีโลหะเงินเป็น สีเหลืองอ่อน สีเหลือง สีน้ำตาลอ่อน และสีน้ำตาล แสดงถึงความสามารถในการป้องกันการหมอง ของโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งค่าเปลี่ยนแปลงสีที่วัดได้ ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทดสอบมากขึ้น อย่างสอดคล้องกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าเปลี่ยนแปลงสี (ค่า dE^*) กับปริมาณธาตุดีบุกที่เติมลงไป 0.2 – 0.5% พบว่า เมื่อผ่านเวลาทดสอบการหมองไป 0.5 ชั่วโมง ค่า dE^* ที่วัดได้จากเครื่องมือ วัดสเปกโตรคัลเลอร์มิเตอร์เท่ากับ 22.78, 13.57 และ 11.99 ตามลำดับปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้น (จากดีบุก 0.2%, 0.3% และ 0.5%) แล้วหลังจากผ่านเวลาการทดสอบการหมองไป 12 ชั่วโมง ค่า การเปลี่ยนแปลงสี dE^* ที่ได้มีค่า 32.37, 27.76 และ 19.44 ตามปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึง สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่า ปริมาณดีบุกที่เติมมากขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีและช่วยลด การหมองที่เกิดบนผิวชิ้นงาน โดยการเติมดีบุก 0.5% ให้ค่า dE^* ที่ต่ำสุด สำหรับชุดโลหะผสมเงิน สเตอร์ลิงกลุ่มนี้

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบสมบัติต้านทานการหมองชดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn สภาพหลังหล่อ

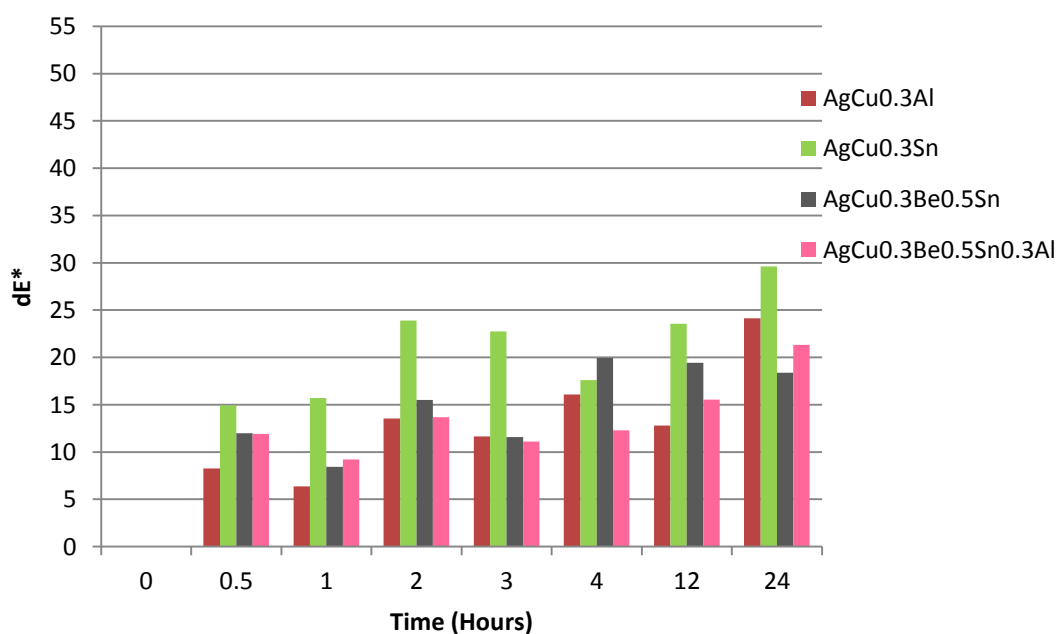
| AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be0.2Sn | AgCu0.3Be0.3Sn | AgCu0.3Be0.5Sn | Condition / Tarnish |
|---|---|---|---|---------------------|
|  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.22 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม
AgCu0.3Sn - AgCu0.3Be0.2Sn - AgCu0.3Be0.3Sn - AgCu0.3Be0.5Sn

3) กลุ่ม AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al : จากตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงเพื่อดูอิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อความต้านทานการหมอง สำหรับกลุ่มนี้เป็นการนำโลหะผสมชุดอ้างอิง AgCu0.3Al และ AgCu0.3Sn มาเปรียบเทียบกับชุดที่มีการเติมทั้ง เบริลเลียม ดีบุก และอะลูมิเนียม เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีชิ้นงานและการต้านทานการหมอง จากตารางพบว่า ผลของธาตุผสมทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น เบริลเลียม ดีบุก และอะลูมิเนียม มีสามารถในการเพิ่มความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้ดีขึ้น แต่ถ้ามมีการเติมธาตุดีบุกเพียงธาตุเดียว ประสิทธิภาพดังกล่าวเพิ่มขึ้นได้ไม่มากนัก จึงต้องมีการเติมเบริลเลียม กับอะลูมิเนียมร่วมด้วย จึงจะช่วยให้การหมองเกิดได้ยากยิ่งขึ้น แต่สำหรับธาตุอะลูมิเนียม นั้น มีความสามารถในการต้านทานการหมองที่ดีเยี่ยม แม้จะเติมเพียงธาตุเดียวในปริมาณแค่ 0.3% เท่านั้น โดยจากตารางที่ 4.5 แสดงสีที่เกิดขึ้น และค่า dE^* แสดงไว้ในภาพ 4.23 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 24 ชั่วโมง ยังมีการเปลี่ยนแปลงสีที่เปลี่ยนไปช้าและน้อยมาก ๆ วัดค่า dE^* ได้เพียง 24.13 แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเติมธาตุผสมต่าง ๆ ร่วมกัน (AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al) ซึ่งมีทั้งธาตุเบริลเลียม ดีบุกและอะลูมิเนียม พบว่า ความสามารถในการต้านทานการหมองของโลหะผสมชุดนี้ก็ยิ่งด้อยกว่าชุดโลหะผสมทองแดง ที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมเพียงธาตุเดียว (AgCu0.3Al) สาเหตุเกิดจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้ของชุดโลหะผสมทั้ง




























สองนี้แตกต่างกัน โดย $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}_0.3\text{Al}$ มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่หลากหลาย มีเฟสต่าง ๆ เกิดขึ้นลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) และการกระจายตัวของโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังมีการแยกตัวของทองแดงออกมาเกิดเป็นเฟสใหม่ขึ้น ทั้งเฟสเบตา (β -phase) และเฟสสีเทา (Grey phase) ซึ่งมีทองแดงอยู่สูง น่าจะเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานการหมองน้อยกว่า เมื่อเทียบกับ $\text{AgCu}_0.3\text{Al}$ ที่มีโครงสร้างยูเทคติกลักษณะพิเศษ รูปร่างค่อนข้างคล้าย ๆ กัน กระจายตัวอยู่เต็มเนื้อพื้นโลหะอย่างสม่ำเสมอ และมีการแยกตัวของธาตุทองแดง เป็นเฟสที่สอง (Secondary Phase) น้อยกว่า อีกทั้งส่วนผสมทางเคมีของแต่ละเฟสต่างกันออกไป จึงทำให้ $\text{AgCu}_0.3\text{Al}$ เป็นโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีความสามารถในสมบัติต้านทานการหมองที่ดีที่สุด จากทั้งหมด 7 ชุดโลหะผสมที่ทำการทดสอบ โดยสามารถดูภาพรวมของสีผิวชิ้นงานและค่า dE^* จากเครื่องทดสอบเทียบสีทุกชุดส่วนผสมจากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.24




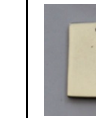































ภาพที่ 4.23 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม

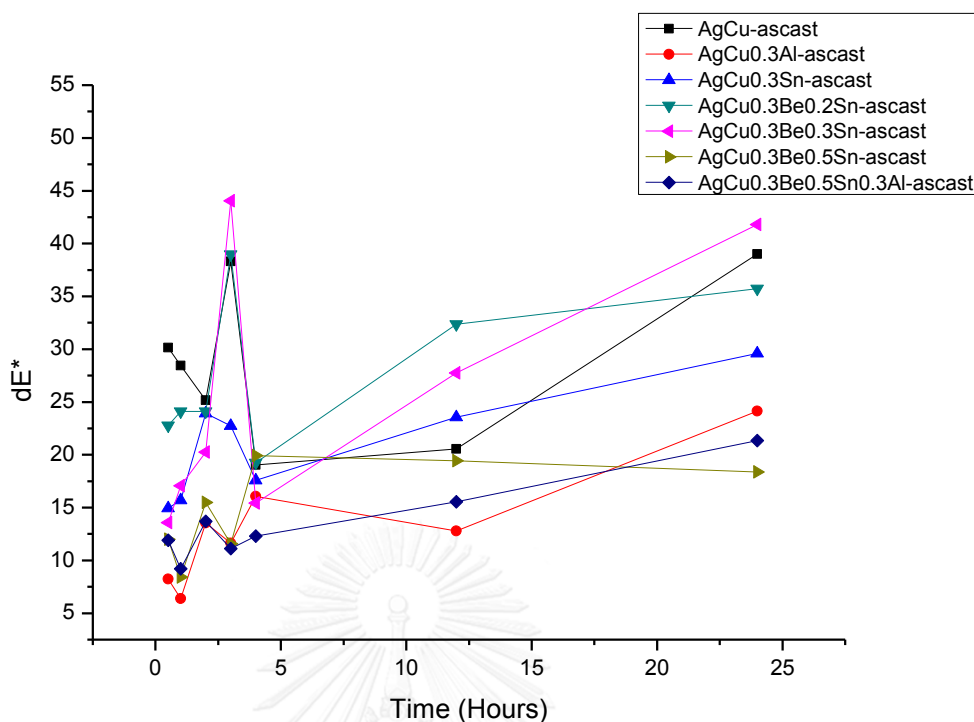
$\text{AgCu}_0.3\text{Al}$ - $\text{AgCu}_0.3\text{Sn}$ - $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}$ - $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}_0.3\text{Al}$

ตารางที่ 4.5 ผลของการทดสอบสมบัติต้านทานการหมองชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาพหลังหล่อ

| AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be0.5Sn | AgCu0.3Be0.5Sn 0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|----------------------|
|  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  | 24 Hours |

ตารางที่ 4.6 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของโลหะผสมทั้ง 7 ชุดสถานะหลังหล่อ (As-cast)

| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be 0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3 Be0.5Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|---|--|---|----------------------|
|  |  |  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.24 กราฟเส้นแสดงค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีชิ้นงานทดสอบของโลหะผสมทั้ง 7 ชุดสถานะหลังหล่อ (As-cast)

4.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการในการอบบ่ม



























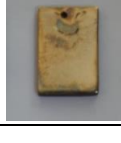













ผลของอุณหภูมิ และเวลาการในการอบบ่ม (Aged) ที่มีผลต่อสีผิวของชิ้นงานและสมบัติต้านทานการหมอง สำหรับการอบบ่ม (Aged) นั้น ผู้วิจัยจะเลือกทำการศึกษาศีผิวชิ้นงานหลังการอบบ่มโดยใช้อุณหภูมิบ่ม 350°C และ 400°C ใช้เวลาการอบบ่ม 30 และ 60 นาที เพื่อจะดูแนวโน้มที่เกิดขึ้นของอุณหภูมิและเวลาการอบบ่มเท่านั้น ว่ามีต่อสีและการหมองผลมากน้อยเพียงใด โดยนำชิ้นงานในสภาพหลังหล่อ ไปทำการอบต่อเนื่องตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานไปขัดขัดผิว แล้วจึงทำการทดสอบการหมอง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยก็ได้ทำการทดสอบทั้ง 7 ชุดโลหะผสม ซึ่งมีทั้งผลของภาพถ่ายและค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ค่า dE^*) ที่ได้จากการวัดเทียบสีด้วยเครื่องมือสเปคโตรคัลเลอริมิเตอร์ โดยผลการทดสอบที่ได้ เป็นดังนี้

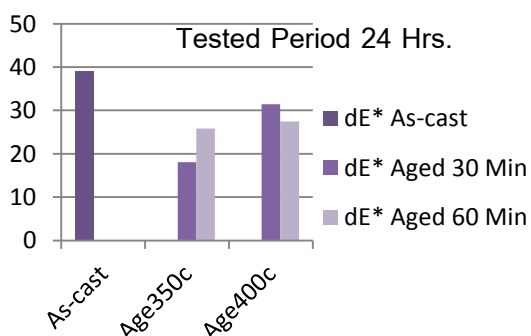
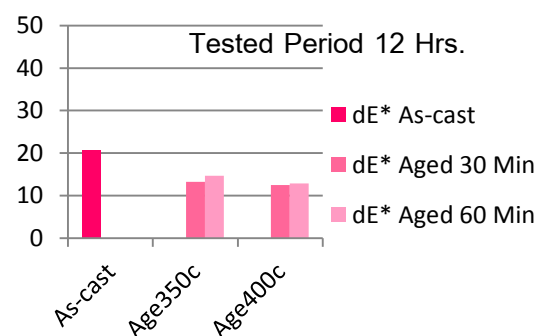
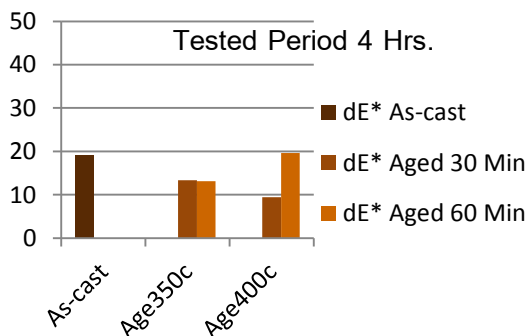
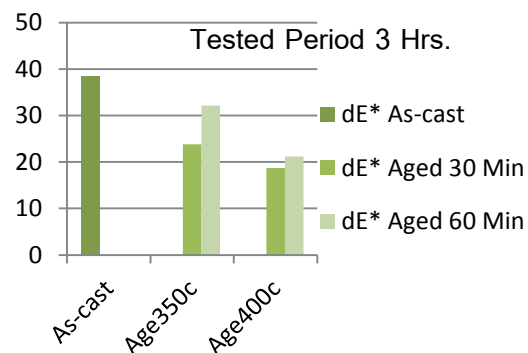
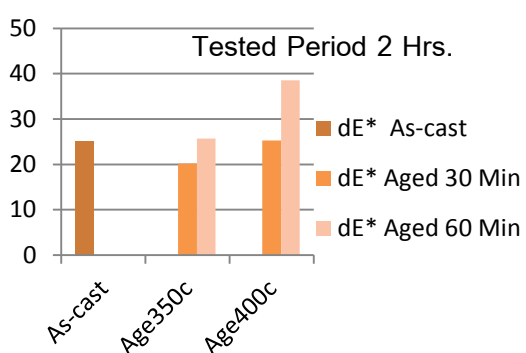
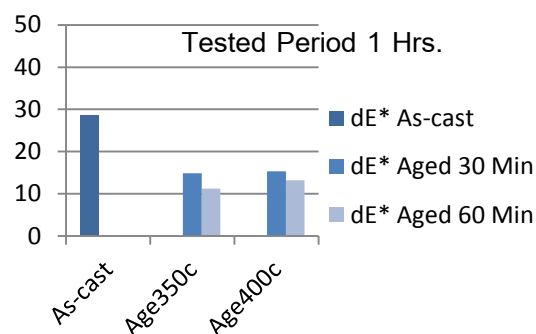
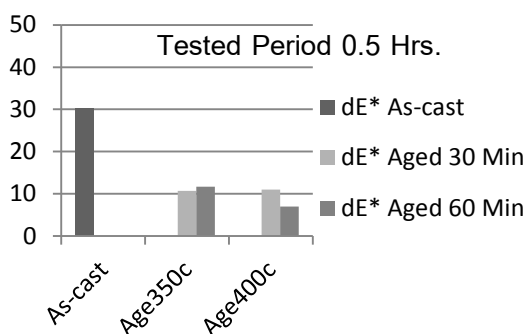
1) ชุดโลหะผสม AgCu : สำหรับโลหะผสมเงินทองแดงชุดนี้ สีผิวชิ้นงานที่ได้หลังหล่อและล้างปูนแล้ว มีสีดำมาก สีผิวหมองคล้ำชัดเจน สามารถดูได้จากภาพที่ 4.1 (ก) และหลังจากการอบบ่มแล้วลักษณะสีผิวก็ดำเหมือนเดิม และเมื่อมีการขัดเปิดผิวเพื่อเตรียมทดสอบการหมองพบว่าผิวชิ้นงานมีฝ้าแดงเกิดขึ้นและฝ้านั้นมีลักษณะฝักฝัก แม้จะมีการขัดเนื้อโลหะเงินออกไปปริมาณ

มากแล้วก็ตาม ฝ้าแดงดังกล่าวก็ยังคงปรากฏอยู่ เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจนในอากาศกับทองแดง ตั้งแต่การหล่อต้นโลหะที่อุณหภูมิสูง จนกระทั่งถึงการบ่ม การออกซิเดชันสามารถเกิดได้ง่าย อันเนื่องมาจากความร้อนที่ใช้ ทั้งในขั้นตอนการหล่อและการอบบ่ม ดังนั้นจึงพบฝ้าแดงฝังลึกอยู่ในชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าที่เวลาทดสอบ 0 ชั่วโมงสังเกตเห็น ฝ้าแดงในทุก ๆ ชิ้นงานทดสอบ

จากผลการทดสอบการหมองของชุดโลหะเงินผสมทองแดงนี้ สีผิวหลังการทดสอบ ณ เวลาทดสอบต่าง ๆ ที่ปรากฏจะไม่สามารถชี้ชัดว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบบ่มส่งผลต่อสมบัติการหมอง เป็นเพราะโลหะชุดนี้มีการเปลี่ยนแปลงสีเร็ว และเป็นการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างรุนแรงมาก ลักษณะสีที่ได้เปลี่ยนเป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงินอย่างรวดเร็วหลังผ่านเวลาการทดสอบเพียงครึ่งชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่า การเปลี่ยนแปลงสีผิวชิ้นงานไปเป็นสีฟ้า จะส่งผลทำให้ค่า dE^* ลดลง ถ้าดูจากผลของค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE^* เพียงอย่างเดียวจะระบุได้ยากกว่า อุณหภูมิและเวลาการอบบ่มส่งผลต่อความต้านทานการหมอง สำหรับกรณีของโลหะเงินผสมทองแดงชุดนี้ และยิ่งไปกว่านั้นการเกิดฝ้าแดงหลังหล่อหรือหลังการอบบ่ม ทำให้การวัดค่า dE^* ของชิ้นงานเริ่มต้นก่อนจะทำการทดสอบในบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีการคลาดเคลื่อนและส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าสีหลังการทดสอบผิดพลาดไปด้วย แต่เมื่อทำการสังเกตชิ้นงานทดสอบด้วยตาเปล่า จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบบ่มนั้น มีสีผิวที่เปลี่ยนไปมากกว่า ชิ้นงานสภาพหลังหล่อดังในภาพที่ 4.25

ตารางที่ 4.7 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu ก่อนและหลังการอบบ่ม

| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|--|---|---------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |











































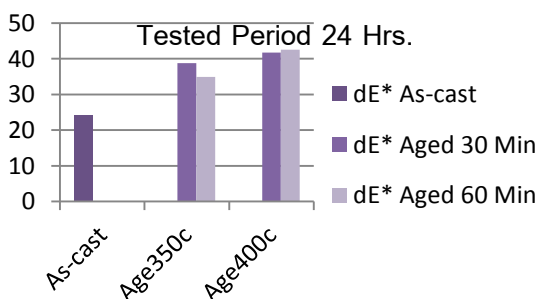
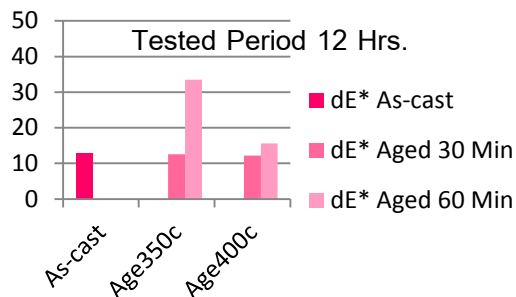
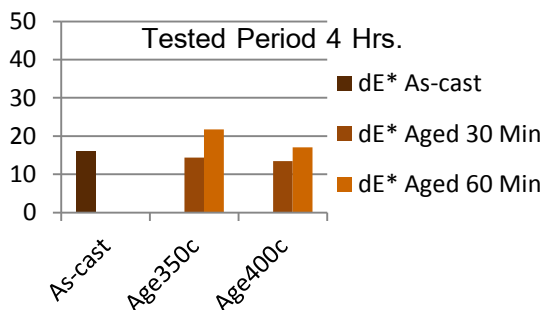
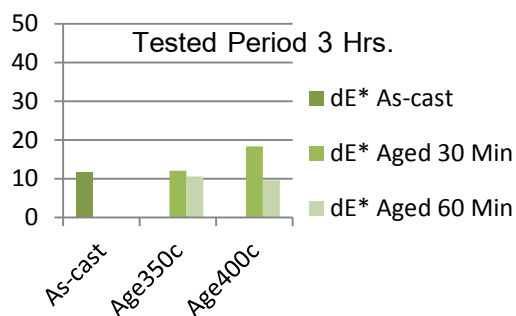
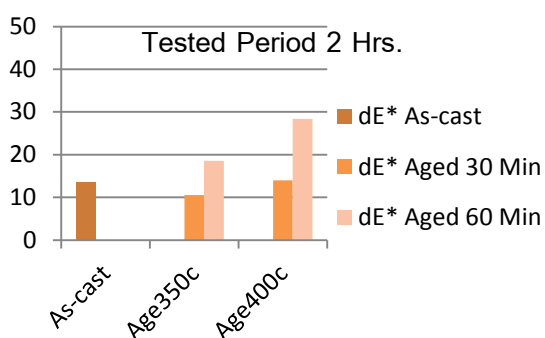
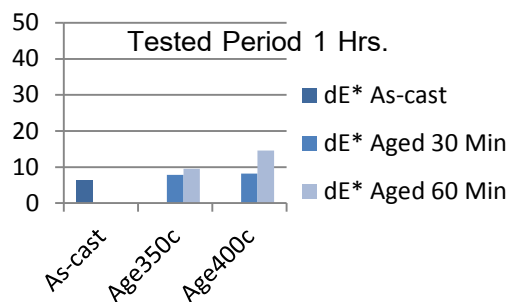
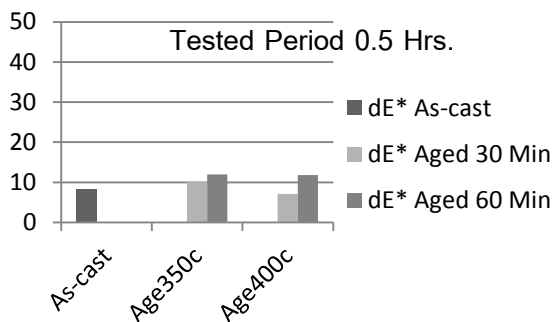
ภาพที่ 4.25 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)

2) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Al : สีผิวชิ้นงานสภาพหลังหล่อมีความขาว (ออกสีเหลืองนิด ๆ) มากกว่าโลหะผสมชุดอื่น ๆ ดังภาพที่ 4.1(ข) และหลังผ่านการอบบ่มแล้วนั้นสีผิวของชิ้นงานมีความเข้มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น โดยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพหลังหล่อเลย ตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.26 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิและเวลาการอบบ่ม ลดความต้านทานการหมองของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากอิทธิพลของอะลูมิเนียมที่เป็นธาตุผสมมีประสิทธิภาพในการต้านทานการหมองที่สูงมาก มากที่สุดใบบรรดาธาตุผสมอื่น ๆ ที่เติมลงไปในการวิจัยนี้ (Sn, Be, Al) สามารถสร้างฟิล์ม Al_2O_3 ขึ้นเพื่อต้านทานการทำปฏิกิริยา จึงทำให้สีผิวและค่า dE^* ของชิ้นงานทดสอบค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ แม้เวลาการทดสอบจะผ่านไปแล้วจาก 0 – 3 ชั่วโมง สีผิวของชิ้นงานก็เปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองอ่อน ๆ เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงสี dE^* ที่วัดได้มีค่า 11.64, 12.12, 18.33 สำหรับชิ้นงานทดสอบการหมองสภาพหลังหล่อ หลังอบบ่ม $350^\circ C$ และหลังอบบ่ม $400^\circ C$ โดยใช้เวลาอบบ่ม 30 นาที ตามลำดับ และเมื่อครบเวลาทำการทดสอบ 24 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงสี dE^* ที่วัดได้มีค่า 24.13, 38.81, 41.7 สำหรับชิ้นงานทดสอบการหมองสภาพหลังหล่อ หลังอบบ่ม $350^\circ C$ และหลังอบบ่ม $400^\circ C$ โดยใช้เวลาอบบ่ม 30 นาที ตามลำดับเช่นเดิม ซึ่งหลังผ่านการทดสอบ 24 ชั่วโมงแล้ว สีของชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล อย่างไรก็ตาม โลหะผสมชุดนี้เหมาะสมมากในการที่จะเลือกนำไปใช้เป็นเครื่องประดับ สามารถต้านทานการหมองได้ดี เพราะสมบัติที่สำคัญของเครื่องประดับ คือ ความแวววาว และความสวยงามของสีตัวเนื้อโลหะ

3) ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn : สำหรับชุดโลหะผสมเงินทองแดงดีบุก แสดงพฤติกรรมเดียวกับในกรณีของชุดโลหะผสมเงินทองแดง AgCu คือ มีการเกิดฝ้าแดงฝังลึกในชิ้นงานหลังสภาพหล่อ และเกิดการเปลี่ยนสีผิวอย่างรวดเร็วหลังการทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง ปรากฏการเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลต่อค่า dE^* แสดงในภาพที่ 4.27 ทำให้ค่าแสงสะท้อนที่วัดได้จากเครื่องดูเหมือนจะมีค่าต่ำลง ทั้งที่การสังเกตด้วยตาเปล่านั้น (ภาพที่ 4.9) พบความหมองที่เกิดมีลักษณะรุนแรงมากกว่า (มากกว่าสีน้ำตาล) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบในแต่ละตำแหน่งที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีหรือค่า dE^* ที่วัดได้มีความแปรปรวนสูง (ค่าค่อนข้างกว้างไปมาจากผลของการเปลี่ยนสีและฝ้าที่เกิดขึ้น) อย่างไรก็ตามจากรูป (ภาพที่ 4.27) จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบบ่มเป็นปัจจัยเพิ่มความหมองของชิ้นงานทดสอบ นั่นคือ การต้านทานการหมองของวัสดุลดลง โดยถ้าพิจารณาจากสีผิวเพื่อจะไปผลิตเป็นเครื่องประดับ ธาตุผสมชุดนี้อาจจะยังไม่เหมาะสม

ตารางที่ 4.8 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Al ก่อนและหลังการอบป่ม

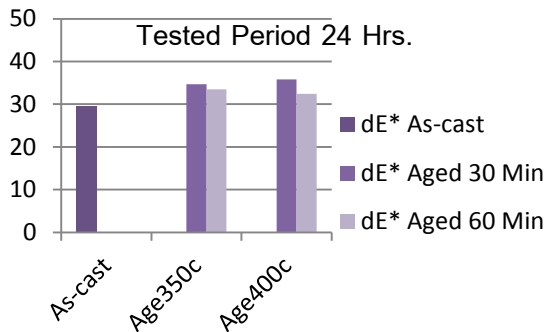
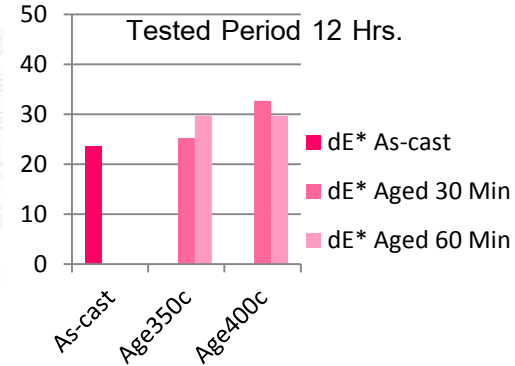
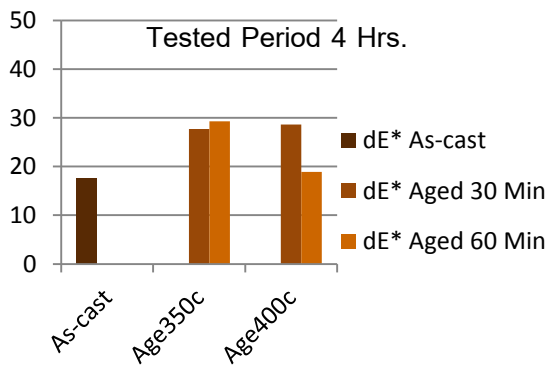
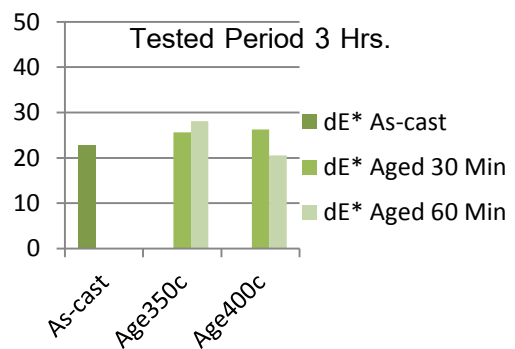
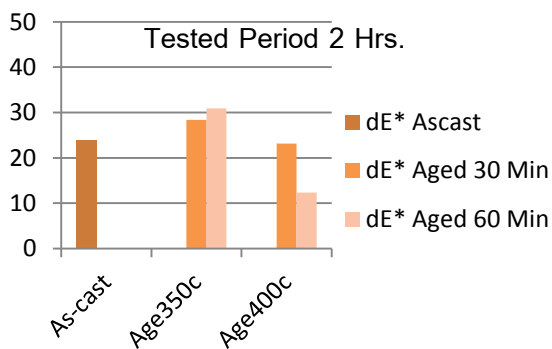
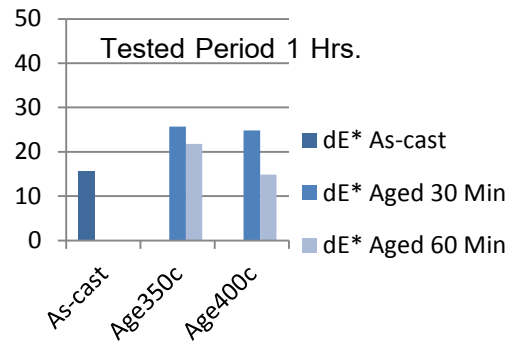
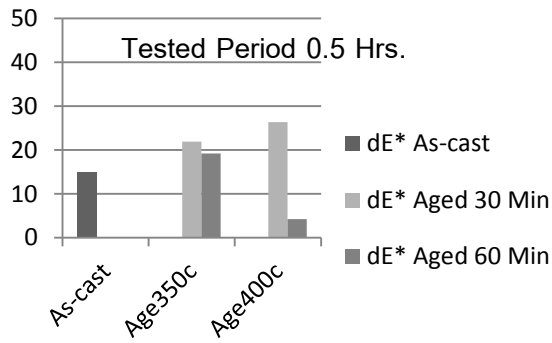
| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|---|---|---------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.26 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Al ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่างๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)

ตารางที่ 4.9 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม

| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|--|---|---------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.27 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)









































- 4) ชุดโลหะผสม Ag-0.3Be-6.0Cu-0.2Sn
- 5) ชุดโลหะผสม Ag-0.3Be-5.9Cu-0.3Sn
- 6) ชุดโลหะผสม Ag-0.3Be-5.7Cu-0.5Sn

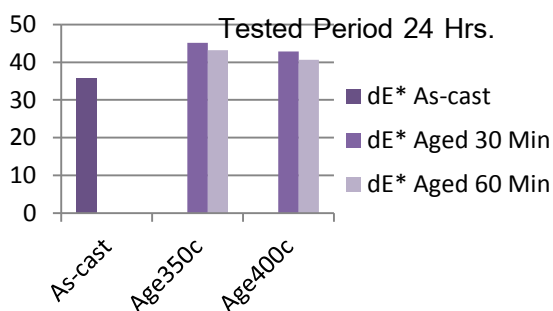
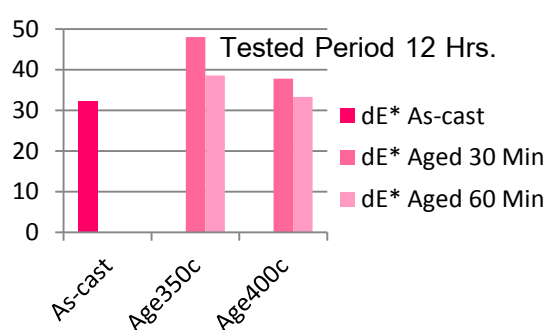
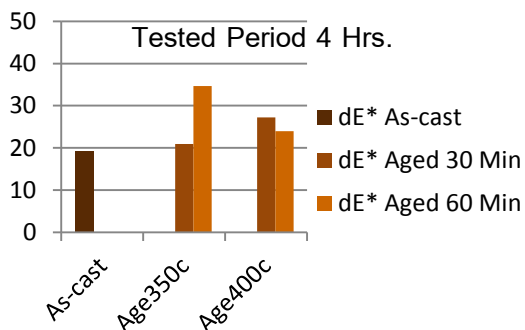
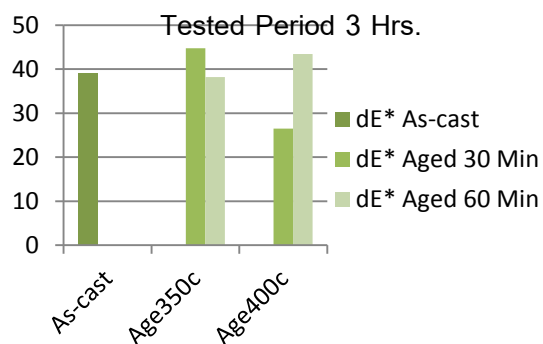
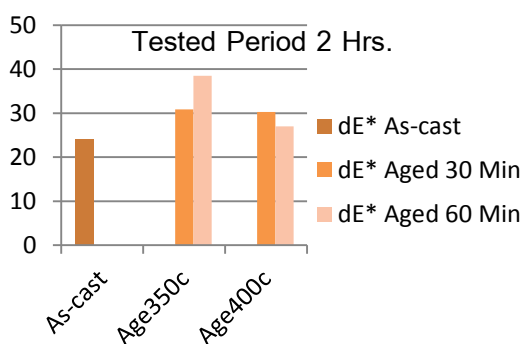
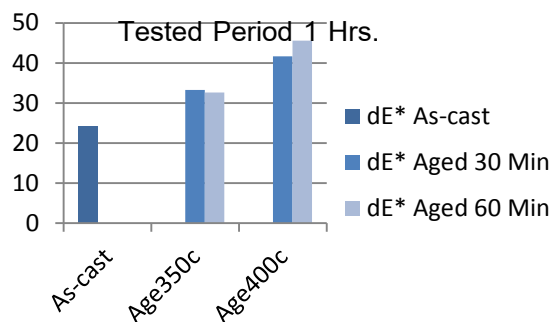
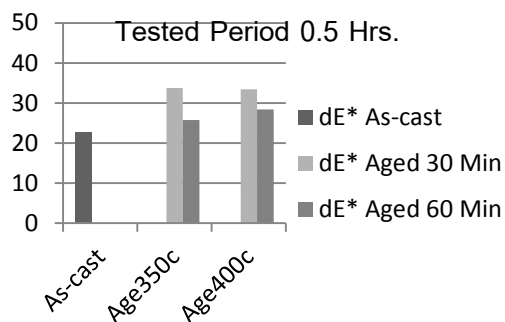
ชุดโลหะผสม 3 ชุดนี้ไม่พบฝ้าแดงบนผิวชิ้นงานทดสอบหลังหล่อ และชิ้นงานสภาพหลังหล่อมีลักษณะเป็นสีของเนื้อโลหะเงิน ออกสีเทา ๆ เล็กน้อย โดยเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่มสีผิวที่ได้จะคล้ำกว่าเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (สีเทาเข้มขึ้นกว่าเดิม) ซึ่งขึ้นกับปริมาณดีบุกที่เติม สำหรับชุดโลหะเงินที่มีการเติมธาตุผสมมากขึ้น โดยเติมธาตุเบริลเลียม 0.3% อีกทั้งปรับธาตุดีบุกให้อยู่ในช่วง 0.2 – 0.3% เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสีนั้น นอกจากเบริลเลียมและดีบุกจะช่วยให้มีความสามารถในการต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวแล้ว พบว่า เมื่อมีการเติมธาตุดีบุกมากขึ้น ยังช่วยชะลอการหมองของชิ้นงานทดสอบได้อีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีผิวชิ้นงานจะรุนแรงน้อยลงเมื่อปรับธาตุดีบุกจาก 0.2% ไปเป็น 0.3% และเป็น 0.5% ตามลำดับ เห็นได้ชัดเจนว่า สีผิวของชิ้นงานทดสอบมีความหมองคล้ำลดลงอย่างชัดเจน ดูได้ในตารางที่ 4.10 – 4.12 โดยสอดคล้องกับค่าวัดเทียบสีที่ได้ในภาพที่ 4.28 – 4.30 ซึ่งชุดโลหะผสมทั้ง 3 ชุดนี้มีแนวโน้มของความต้านทานการหมองลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบบ่มเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที และจาก 350°C เป็น 400°C ยกตัวอย่างเช่น ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE^* ของชุดโลหะ AgCu0.3Be0.2Sn หลังผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีค่า 24.12 (ชิ้นงานสภาพหลังหล่อ), 33.25 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 30 นาที), 32.66 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 60 นาที), 41.68 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 30 นาที) , 45.55 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 60 นาที)

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงสีของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn นั้นหลังผ่านการทดสอบการหมองนาน 0.5 ชั่วโมง ได้ค่า dE^* เท่ากับ 13.57 (ชิ้นงานสภาพหลังหล่อ), 26.7 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 30 นาที), 29.55 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 60 นาที), 42.23 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 30 นาที), 42.89 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 60 นาที)

และกรณีของโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn หลังผ่านการทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง 3 ชั่วโมง แล้ววัดค่าความเปลี่ยนแปลงสี พบว่า dE^* มีค่า 11.57 (ชิ้นงานสภาพหลังหล่อ), 9.94 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 30 นาที), 15.83 (หลังการอบบ่ม 350°C เป็นเวลา 60 นาที), 20.92 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 30 นาที), 26.135 (หลังการอบบ่ม 400°C เป็นเวลา 60 นาที) เป็นต้น





















ตารางที่ 4.10 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม

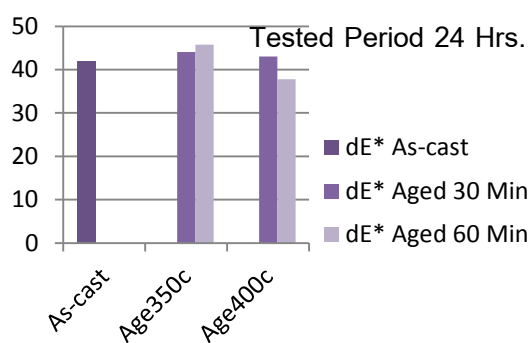
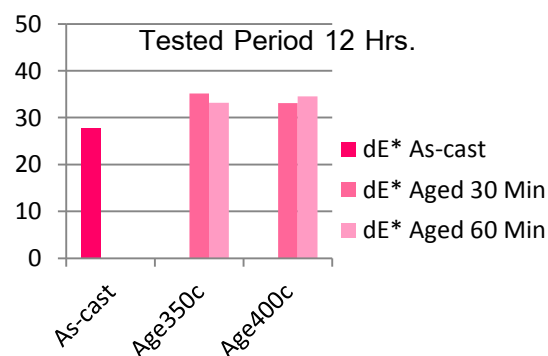
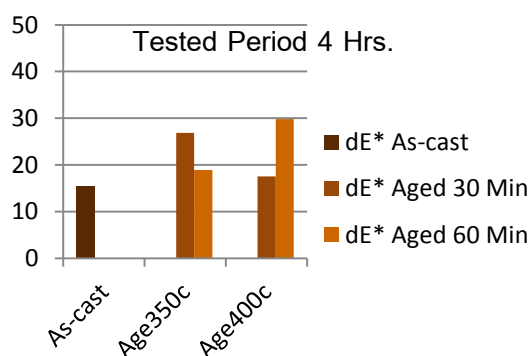
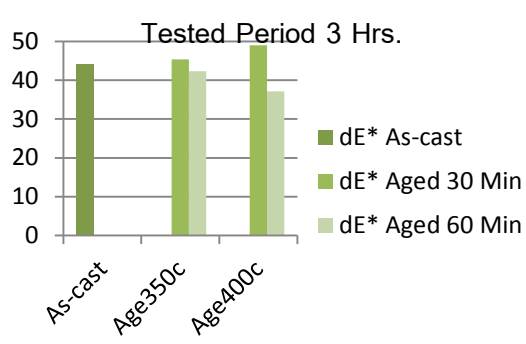
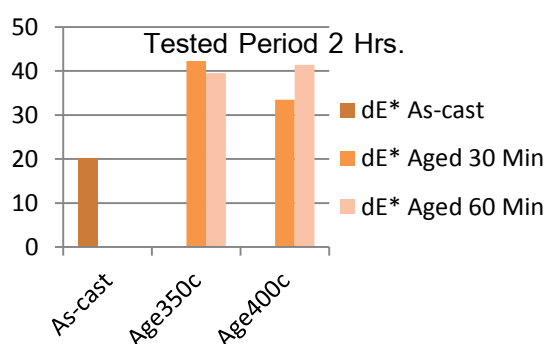
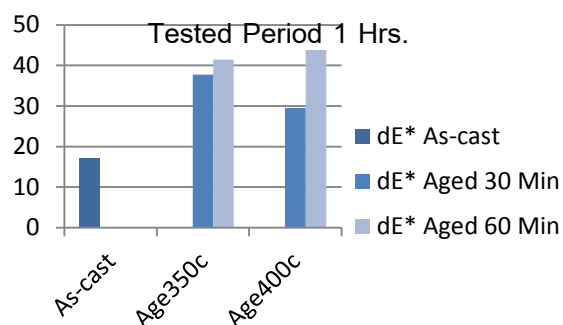
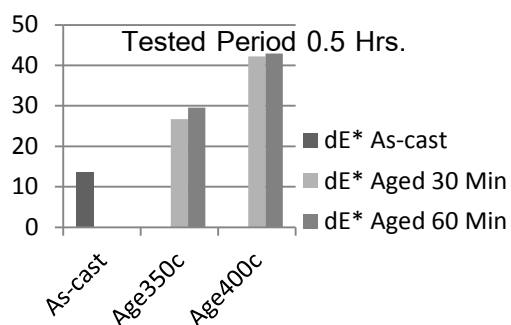
| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|---|---|---------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.28 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่างๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)









































ตารางที่ 4.11 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม

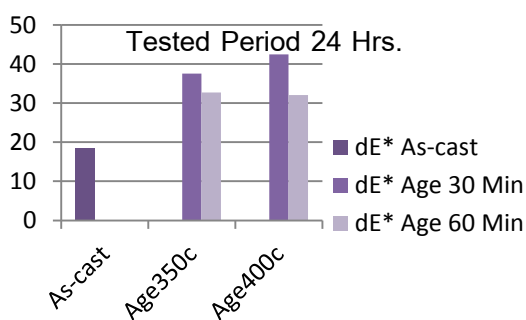
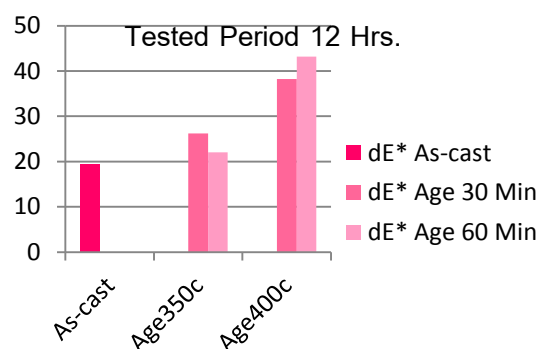
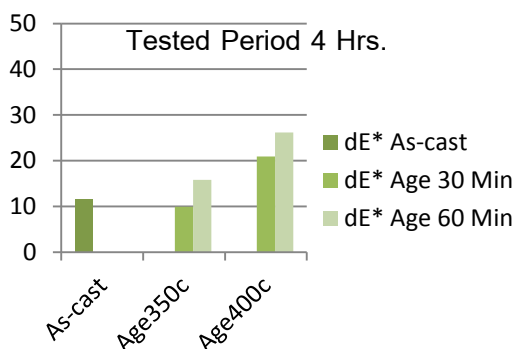
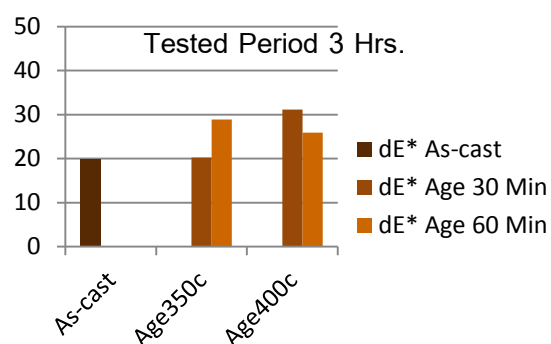
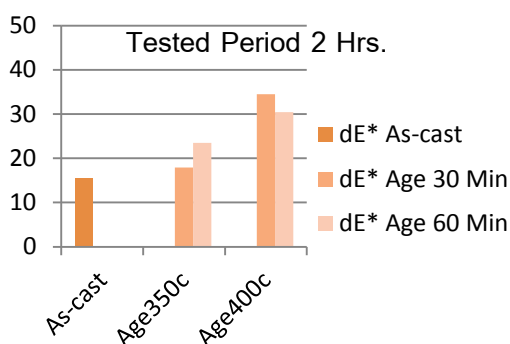
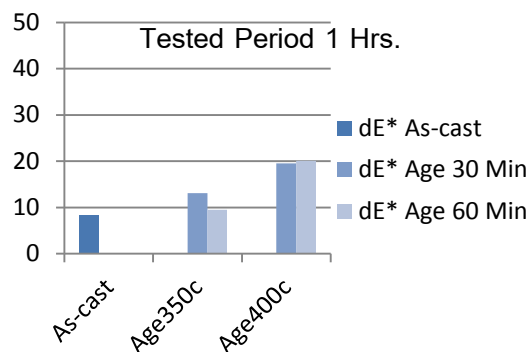
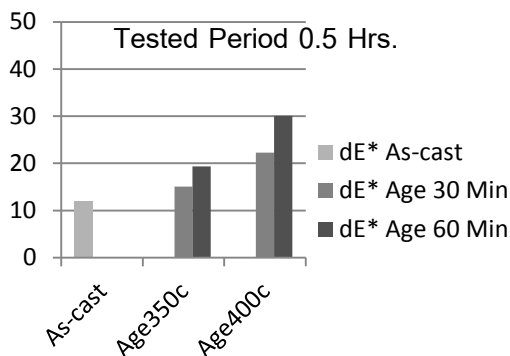
| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|---|---|---------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.29 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.3}\text{Sn}$ ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่างๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)

ตารางที่ 4.12 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีและความหมองหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม

| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition |
|---|---|---|--|---|-----------|
| | | | | | Tarnish |
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.30 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่างๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)









































7) ชุดโลหะผสม $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}_0.3\text{Al}$: สำหรับโลหะผสมชุดนี้ก็เช่นเดียวกัน คือ สภาพหลังหล่อไม่เกิดฝ้าแดง และสีผิวหลังอบบ่มเข้มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามโลหะผสมชุดนี้มีการเติมทั้งเบริลเลียม 0.3% ดีบุก 0.5% และอะลูมิเนียม 0.3% เนื่องจากผู้ทำวิจัยคาดว่าจะได้ทั้งสมบัติทางกลและสมบัติต้านทานการหมองที่ดีที่สุด เพราะ จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลนั้น ธาตุโลหะผสมเหล่านี้ ทั้งเบริลเลียม (Be), ดีบุก (Sn) และอะลูมิเนียม (Al) มีคุณสมบัติช่วยในการลดความหมองของโลหะเงินทั้งสิ้น พร้อมทั้งสามารถช่วยให้เกิดตะกอนของธาตุเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยผลที่ได้ในตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.31 นั้นแสดงให้เห็นว่า ธาตุผสมที่เติมลงไปสามารถช่วยในการต้านทานและชะลอความหมองที่เกิดขึ้นได้จริง ซึ่งสามารถสังเกตจากสีที่ปรากฏ และค่า dE^* จากการวัดเทียบสี ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดลดลงอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของธาตุผสม ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติดังกล่าว รวมทั้งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าอุณหภูมิและเวลาการอบบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความหมองคล้ำมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยขึ้นงานสภาพหลังหล่อ เมื่อผ่านการทดสอบการหมอง 0.5 – 24 ชั่วโมงนั้น ค่า dE^* อยู่ในช่วง 11.92 – 21.34 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ค่อนข้างน้อยมาก นอกจากนี้ เมื่อนำชิ้นงานทดสอบทำการอบบ่มด้วยอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ แล้วนำไปผ่านการทดสอบสมบัติการต้านทานการหมอง โดยใช้เวลาทดสอบ 0.5 – 24 ชั่วโมงพบว่า การเปลี่ยนแปลงสีที่วัดได้มีค่าอยู่ช่วง 6.11 – 32.81 (สำหรับผ่านการอบบ่ม 350°C นาน 30 นาที), 5.26 – 33.54 (ผ่านการอบบ่ม 350°C นาน 60 นาที), 6.07 – 23.31 (ผ่านการอบบ่ม 400°C นาน 30 นาที), และมีค่า dE^* ช่วง 6.9 – 27.73 (ผ่านการอบบ่ม 400°C นาน 60 นาที)

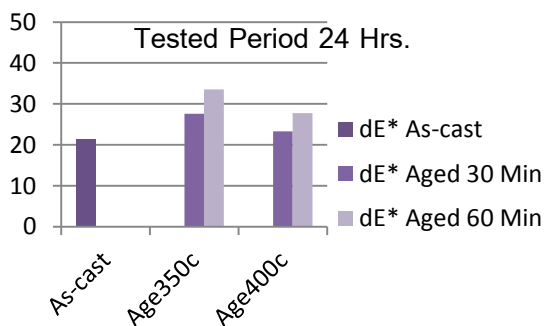
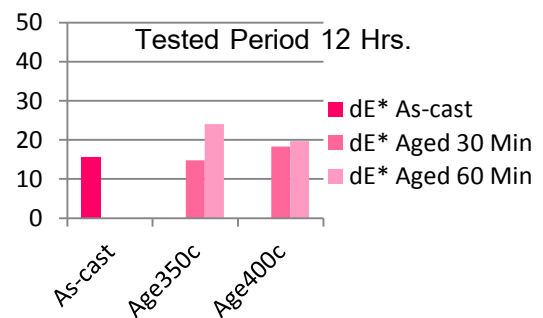
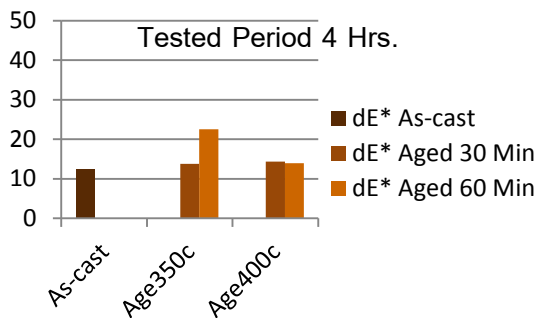
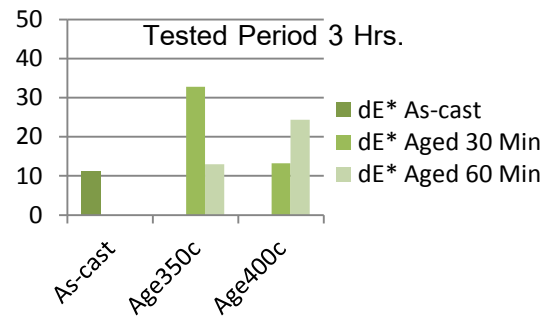
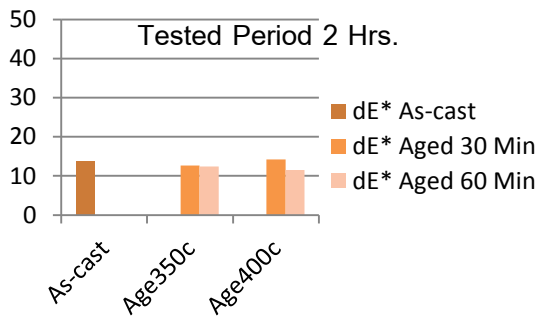
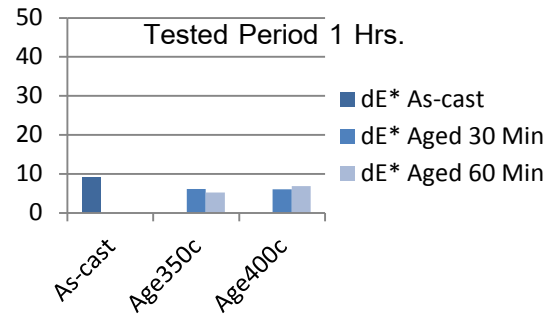
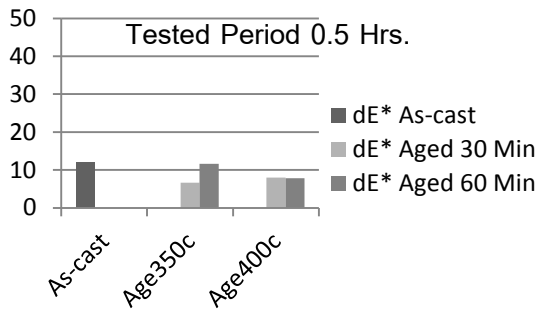
แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานการหมองของชุดโลหะผสม $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}_0.3\text{Al}$ พบว่ายังด้อยกว่าโลหะผสมชุด $\text{AgCu}_0.3\text{Al}$ ที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมเพียงธาตุเดียว แต่ค่าที่ได้มีความต่างกันไม่มาก ดังนั้น การเลือกใช้โลหะผสมไปผลิตเป็นเครื่องประดับเงินสปริง นอกจากต้องการความแข็งแรงแล้ว ข้อสำคัญที่ควรคำนึงถึงก็คือ หลังจากผลิตแล้วเครื่องประดับมีความเงางาม สีสวย สามารถต้านทานการหมองได้ดี ซึ่งทั้ง $\text{AgCu}_0.3\text{Al}$ และ $\text{AgCu}_0.3\text{Be}_0.5\text{Sn}_0.3\text{Al}$ จะเป็นตัวเลือกที่ดีเหมาะสำหรับการทำเป็นเครื่องประดับได้

จึงสามารถสรุปได้ว่าในบรรดาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด ที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองสมบัติการต้านทานการหมองและวัดเทียบค่าสีแล้วนั้น ชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ให้สมบัติความต้านทานการหมองดีที่สุดคือ $\text{AgCu}_{0.3}\text{Al}$ และรองลงมาเป็นชุด $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ และชุดโลหะผสมอื่น ๆ เป็น $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$, $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.3}\text{Sn}$, $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.2}\text{Sn}$, $\text{AgCu}_{0.3}\text{Sn}$ และ AgCu ตามลำดับ ซึ่งชุดโลหะผสม 2 ลำดับสุดท้ายนี้ยังไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง เนื่องจากสีผิวไม่สวยงาม มีฝ้าเล็กที่เกิดบนผิวชิ้นงาน อีกทั้งยังมีปัญหาแตกเปราะหลังหล่อดั่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



ตารางที่ 4.13 ภาพชิ้นงานเปรียบเทียบสีหลังทำการทดสอบสมบัติการหมองของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al ก่อนและหลังการอบบ่ม

| As-Cast | Age 350°C / 30 min | Age 350°C / 60 min | Age 400°C / 30 min | Age 400°C / 60 min | Condition / Tarnish |
|---|---|---|---|---|------------------------|
|  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4.31 กราฟแท่งแสดงค่า dE* ที่วัดได้จากเครื่องวัดเทียบสีของชิ้นงานทดสอบของโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al ก่อนและหลังการอบบ่ม ณ เวลาการทดสอบต่างๆ กัน (0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมง)

4.6 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลได้จากการทดสอบแรงดึง โดยทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดึง (Universal tensile testing machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR10K, LLOYD Instruments, England ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือจากศูนย์ทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้อัตราความเร็ว (Tension speed) ในการดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) และ อัตราการยืดตัวของชิ้นงานหรือเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) จากนั้นจะสามารถคำนวณค่าสมบัติความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะหล่อให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM E 8M-96 โดยทำการทดสอบชิ้นงาน 5 ชิ้นต่อหนึ่งชุดหรือแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งค่าความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) สามารถคำนวณได้จาก

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (13)$$

โดย σ_y คือ ค่าความเค้น ณ จุดคราก [MPa]
 E คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น [MPa]

ส่วนการทดสอบความแข็งจะทำด้วยวิธีวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ ใช้สเกลเอ (Rockwell Scale A Test) ยี่ห้อ GALILEO durometria ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ที่ได้ใช้เครื่องมือจากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการวัดด้วยสเกลเอนี้จะใช้หัวกดเพชรทรงกรวย ใช้แรงกดหลัก (Major load) เท่ากับ 60 kgf เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุโลหะเงิน สเตอริงที่ค่อนข้างอ่อนนุ่ม การวัดค่าความแข็งจะกดชิ้นงาน 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

การอภิปรายผลของสมบัติทางกล ผู้เขียนจะเรียงลำดับเป็นกลุ่มๆ เหมือนกับผลของการทดสอบสมบัติต้านทานการหมองหัวข้อ 4.5 ที่ผ่านมา เพื่อจะสามารถเรียงลำดับลำดับได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถเห็นภาพได้อย่างชัดเจน โดยผลของอิทธิพลของธาตุผสมที่เติม การปรับเปลี่ยนธาตุผสมของชุดโลหะเงินสเตอริงแต่ละชุด และอุณหภูมิที่ใช้ รวมถึงระยะเวลาสำหรับการอบบ่มให้ตกตะกอนเพิ่มความแข็งแรง เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลต่าง ๆ แก่โลหะเงินสเตอริงที่ต้องการให้มีค่า

ความสปริงสูง (Modulus of Resilience) (ซึ่งจะเรียงสมบัติทางกล ค่า Modulus of Resilience, ค่า Yield stress, ค่า Elongation และค่าความแข็ง ตามลำดับ) ชุดโลหะเงินผสมที่ทำการทดสอบ จะมีทั้งหมด 7 ชุด และจะแบ่งการอภิปรายออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

4.6.1 กลุ่ม AgCu / AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn

4.6.2 กลุ่ม AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn

4.6.3 กลุ่ม AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทุก ๆ ชุด และทุก ๆ ชิ้นงาน เมื่อผ่านการหล่อและได้ต้นโลหะแล้ว จะนำไปผ่านการล้างปูนให้สะอาด และนำชิ้นงานที่ได้ตัดออกเป็นชิ้น ๆ ออกจากต้นโลหะ แล้วนำไปผ่านกระบวนการอบบ่มเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) ด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม แล้วทำการจุ่มลงในน้ำเย็นอย่างรวดเร็ว (Water quench) โดยกลไกที่เกิดขึ้นจะมาจากการตกตะกอนแยกตัวของเฟสที่มีทองแดงสูง (Cu-rich phase) ออกจากเฟสอัลฟา (α , Ag-rich phase) เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงในเนื้อเงินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงตามเส้นแสดงความสามารถในการละลายสูงสุด (Solvus line) และหากทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วขณะโลหะกำลังแข็งตัว จะสามารถยับยั้งการตกตะกอนของทองแดงได้ เกิดเป็นสภาวะอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดและเมื่อทำการอบ กระตุ้นหรืออบที่อุณหภูมิต่ำ ก็จะทำให้เกิด Cu-rich phase ที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะไม่มีการอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solutionization) เหมือนวิธีการที่นิยมทำกันทั่วไป การตัดชิ้นตอนรอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solutionization) ดังกล่าวออกไปนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเกิดคราบทองแดงออกไซด์ (Fire scale) เพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวนั้นจะสูงประมาณ 700 – 800°C และยังคงผลต่อการเสียความแข็งแรงและความแข็งเนื่องจากสูญเสียปริมาณทองแดง จากการแพร่ของทองแดงไปที่บริเวณผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้การตัดชิ้นตอนดังกล่าวออกยังช่วยลดต้นทุน เวลาและค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ให้น้อยลง อย่างไรก็ตาม การวิจัยในครั้งนี้จึงทำการหล่อแล้วอบบ่ม (Aging) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงต่อเนื่อง โดยปราศจากการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ซึ่งผลที่ได้สามารถยืนยันว่าการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงโดยวิธีนี้ให้สมบัติทางกลสูง ทั้งยังผลิตเป็นชิ้นงานที่มีค่าความเป็นสปริงเหมาะสมเพื่อตอบสนองการใช้งานของอุตสาหกรรมและตลาดเครื่องประดับได้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบบ่ม คือ

- 350°C ใช้เวลา 0, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที

- 400°C ใช้เวลา 0, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที

4.6.1 กลุ่ม AgCu / AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn : จากการทดสอบสมบัติทางกล พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วย การอบบ่ม (Aging) แล้วนั้นส่งผลทำให้สมบัติทางกล มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี ทั้งที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 350°C และ 400°C ทุกระยะเวลาการอบเวลาใด ๆ เมื่อสังเกตผลที่ได้จากการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมและดีบุก เห็นได้ชัดว่า การเติมธาตุอะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) และดีบุก (AgCu0.3Sn) ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงและสมบัติทางกลลดลง เมื่อเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง (AgCu) ที่ไม่ได้มีการเติมธาตุผสมอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม โลหะเงินผสมอะลูมิเนียมชุด AgCu0.3Al ยังได้ค่าความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ระดับที่สูงกว่าค่าความเป็นสปริงของเหล็กกล้า [15] ดังแสดงในภาพที่ 4.32

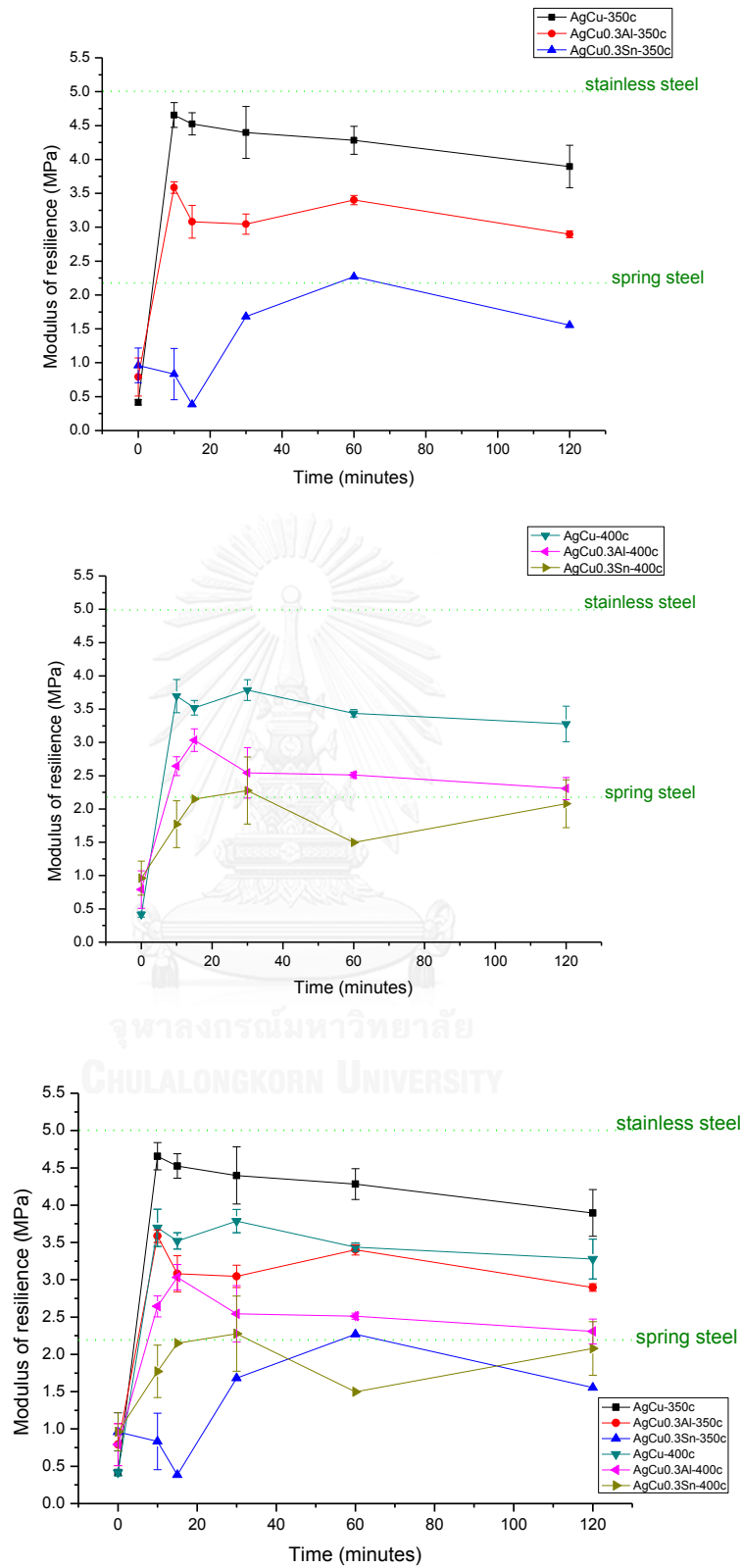
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการอบบ่ม จากภาพที่ 4.32 พบว่าการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C จะได้ค่าความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) สูงกว่าการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C ตัวอย่างเช่น หลังการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C โลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) มีค่าความเป็นสปริงในช่วง 4.0 – 4.75 MPa ส่วนโลหะเงินผสมทองแดง ดีบุก (AgCu0.3Sn) มีค่าความเป็นสปริง 1.0 – 2.25 MPa และโลหะเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) มีค่าสปริงในช่วง 3.0 – 3.6 MPa ก็จะได้เห็นว่า การเติมอะลูมิเนียม ทำให้ค่าสมบัติความเป็นสปริงเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความเป็นสปริงของเหล็กกล้า (Spring steel = 2.2 MPa) แต่ต่ำกว่าค่าความเป็นสปริงของเหล็กกล้าไร้สนิม (Spring stainless steel = 5.0 MPa) และโลหะเงินผสมที่เติมทองแดงอย่างเดียว (AgCu) ขณะที่การเติมดีบุกแม้ว่าหลังการอบบ่มจะทำให้ค่าความเป็นสปริงเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนสปริง เพราะมีค่าความเป็นสปริงต่ำ (ต่ำกว่าสปริงเหล็กกล้า, Spring steel) ซึ่งในกรณีของการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C สมบัติความเป็นสปริงก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิอบบ่ม 350°C แต่ค่าที่ได้จะมีค่าความเป็นสปริงต่ำกว่า ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการเติมธาตุอะลูมิเนียม ให้ค่าความเป็นสปริงที่เหมาะสม และจากผลทดสอบสมบัติการหมองแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการหมองที่มีค่าสูง จึงเหมาะสมที่จะผลิตเป็นชิ้นส่วนโลหะเงินสปริง ที่มีความเป็นสปริงและความต้านทานการหมองดี

ภาพที่ 4.33 ในส่วนของผลการทดสอบการต้านทานแรงดึงนี้ ก็พบว่า ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) จะมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสมบัติความเป็นสปริง ดังภาพที่ 4.23 ตัวอย่างเช่น โลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) หลังอบบ่ม มีค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ในช่วง 330 – 350 MPa ส่วนชุดโลหะเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) ได้ค่าอยู่ในช่วง 260 – 310 MPa และโลหะเงินผสมทองแดง ดีบุก (AgCu0.3Sn) มีค่าความเค้น ณ จุดคราก 100 – 210 MPa ซึ่งเมื่อทำการเทียบค่าความเค้น ณ จุดครากของชิ้นงานหลังอบบ่ม (Aged)

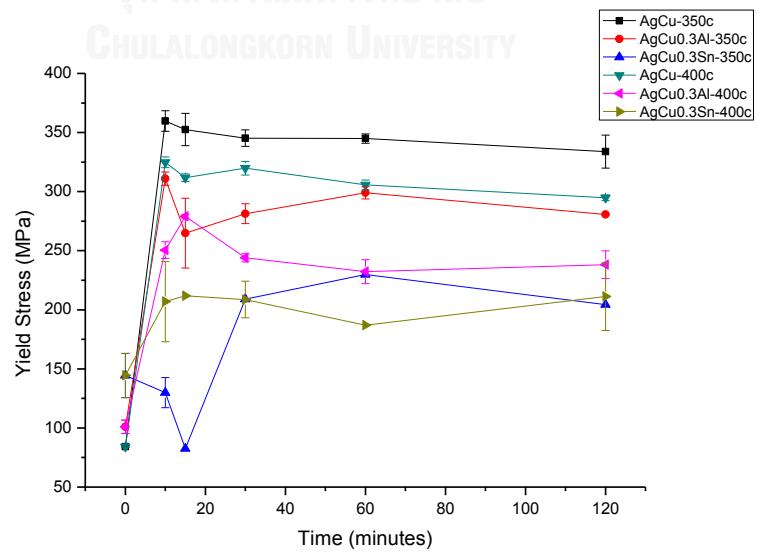
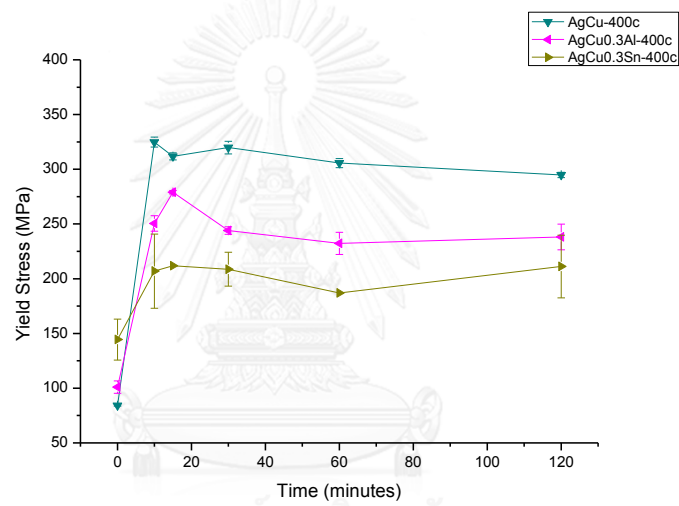
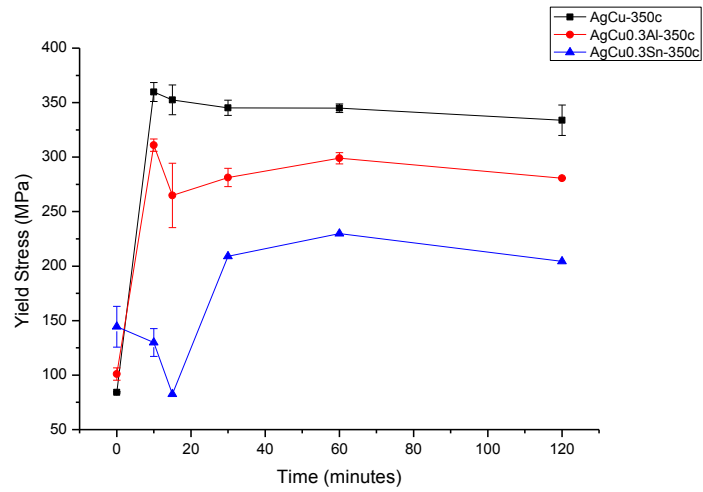
กับชิ้นงานทดสอบสภาพหล่อ (As-cast) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นถึง 6 – 7 เท่าสำหรับโลหะชุด AgCu , 2.5 – 3 เท่าของชุดโลหะ AgCu0.3Al และ 0.5 – 0.75 เท่าในโลหะผสม AgCu0.3Sn ตามลำดับ

ในส่วนของค่าความเหนียวหรืออัตราการยืด (Elongation) จะพบว่าในสภาพหล่อหลังนั้น มีอัตราการยืดตัวที่สูงที่สุด โดยโลหะเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) ให้ค่าความเหนียวสูงถึง 60% แต่หลังจากที่ผ่านกระบวนการอบบ่มแล้ว มีผลทำให้ความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ความเหนียวที่ลดลงยังมีค่าที่อยู่ในระดับใกล้เคียงกันกับโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) ซึ่งอยู่ในช่วง 20 ถึง 30% ซึ่งอยู่ในช่วงระดับเดียวกัน แตกต่างกันไม่มาก แสดงในภาพที่ 4.34

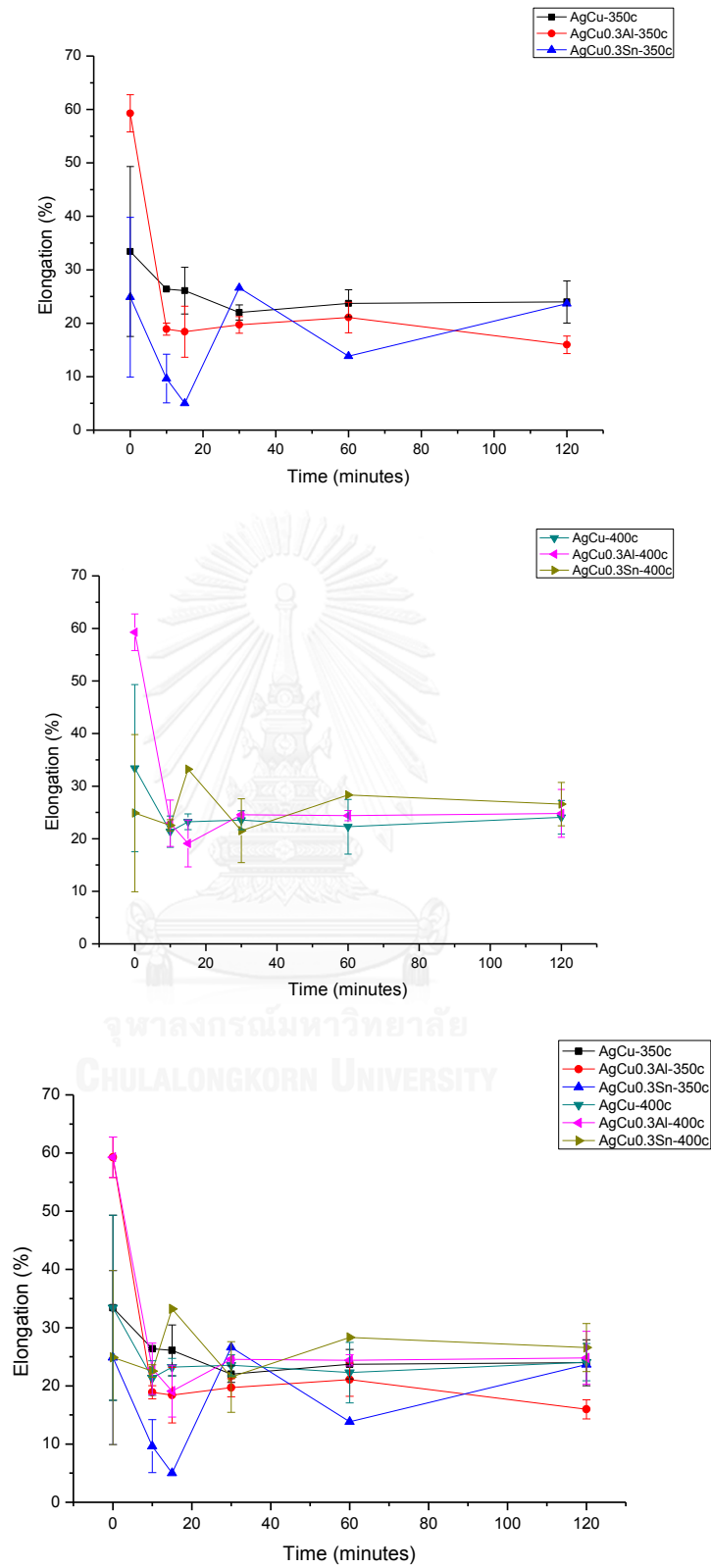
อย่างไรก็ตาม โลหะผสมชุดเงินทองแดง (AgCu) และ โลหะเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง ดีบุก (AgCu0.3Sn) นั้นพบปัญหาการแตกเปราะของชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อ (As-cast) เป็นจำนวนมาก และยังพบปัญหาการเกิดฝ้าแดงฝังลึกลงบนผิวชิ้นงาน แม้จะมีการขัดเปิดหน้าผิวโลหะเงินออกเป็นเวลานานแล้วก็ตาม แต่คราบของฝ้าที่ปรากฏก็ไม่มีลดลงหรือหายไป เมื่อพิจารณาค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ ภาพที่ 4.35 พบว่า มีแนวโน้มเดียวกับค่าความเป็นสปริง และค่าความเค้น ณ จุดคราก กล่าวคือ เมื่อนำชิ้นงานสภาพหล่อ ไปผ่านการอบบ่มแล้ว ค่าความแข็งจะสูงขึ้นเป็น 3 – 8 เท่าของความแข็งของชิ้นงานสภาพหล่อ



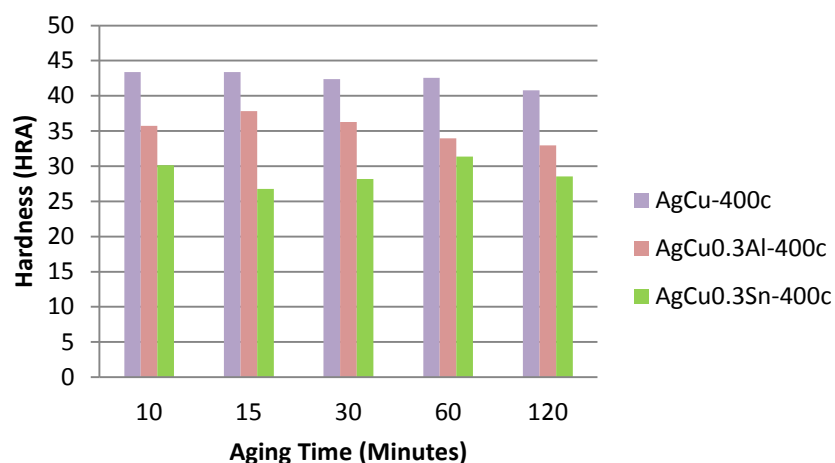
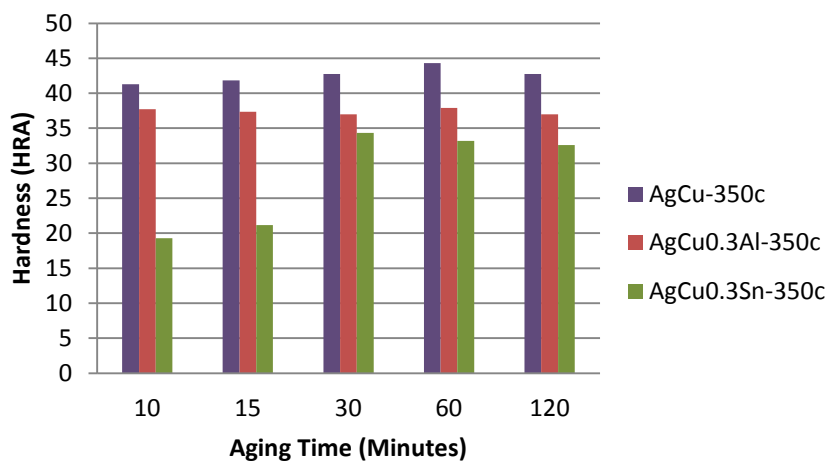
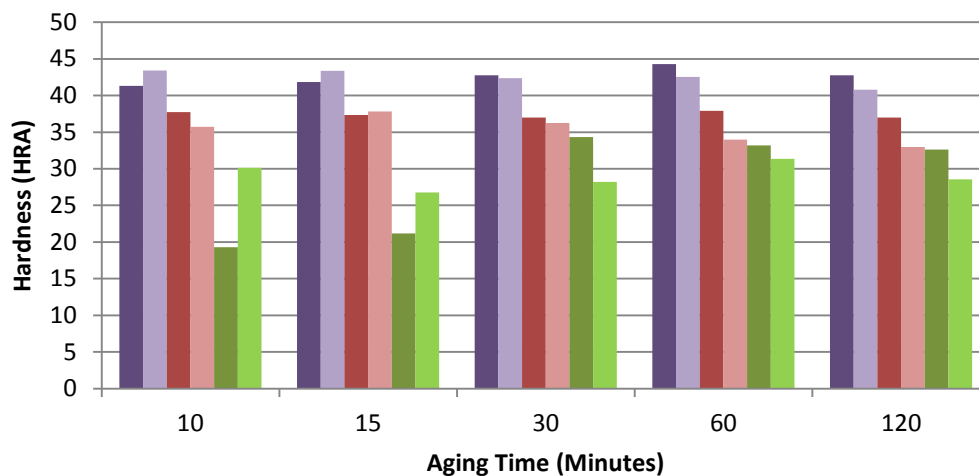
ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงค่าสมบัติความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C



** Aging time 0 minute: ND = Not Detect (ค่าต่ำกว่าสเกล HRA Rockwell) **

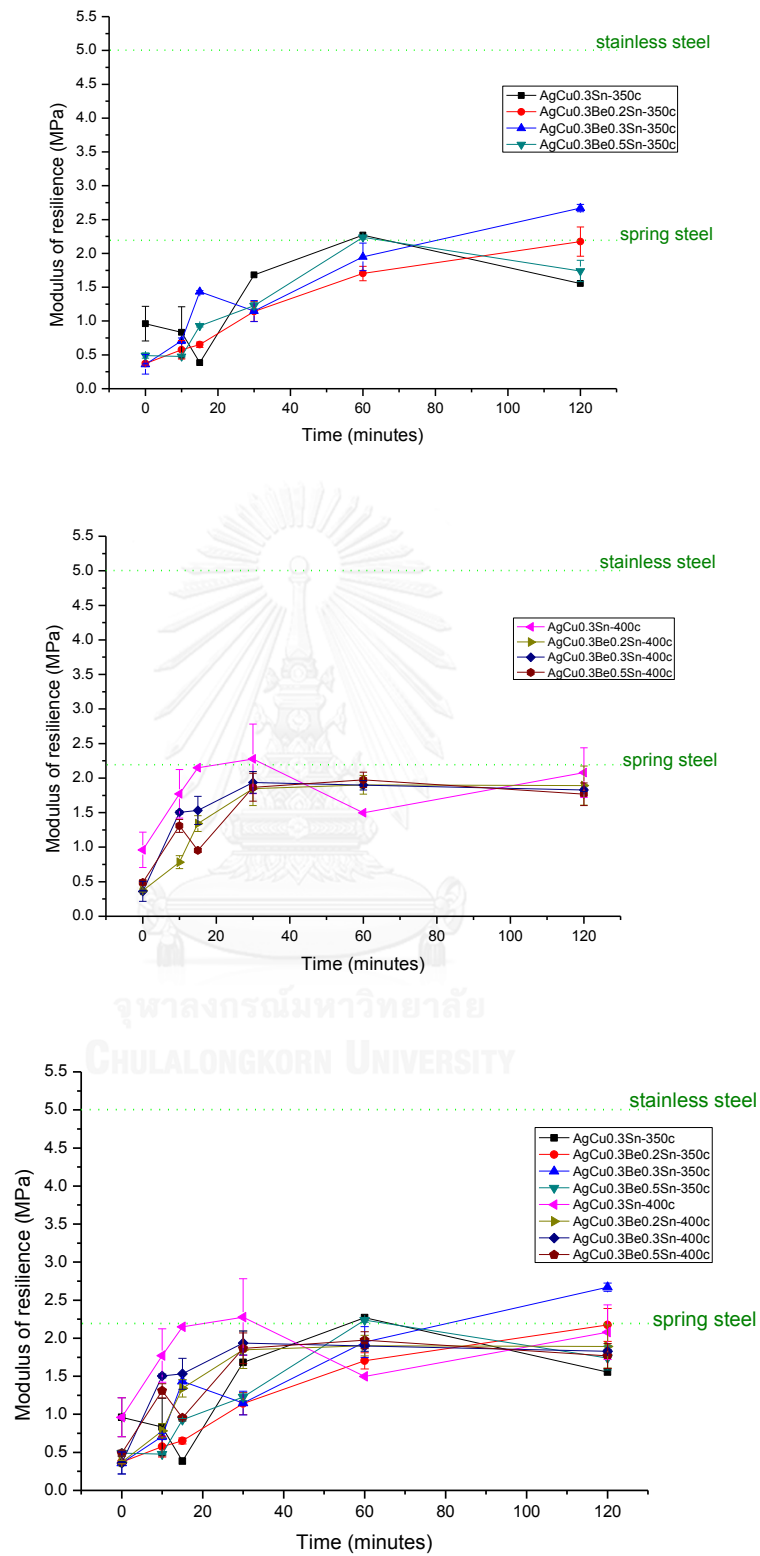
ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ
AgCu – AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C

4.6.2 กลุ่ม AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.2Sn / AgCu0.3Be0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn : โลหะผสมกลุ่มนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนธาตุดีบุก เดิม ในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อดูผล โดยจะปรับค่าดีบุกให้อยู่ในช่วง 0.2 – 0.5% โดยกำหนดให้ธาตุเบริลเลียมคงที่ที่ปริมาณ 0.3% เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย จากการศึกษาเงินสเตอร์ลิง 935⁽⁴⁷⁾ โดยควบคุมปริมาณเบริลเลียม 0.13 – 0.65% ทำการอบบ่มด้วยความร้อนโดยใช้เทคนิคการบ่มเพิ่มความแข็งด้วยตะกอน (Precipitation hardening) ที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 250 – 350 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาการบ่ม 7 – 120 นาที พบว่า สมบัติทางกลต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งการเติมธาตุเบริลเลียมนั้น นอกจากจะส่งผลในด้านการต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงแล้ว ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โลหะเงินสปริงโดยการช่วยเร่งการเกิดตะกอน (Precipitate) ขณะทำการอบบ่มให้เร็วขึ้นได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในผลของการวิจัยนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่ม มีสมบัติทางกลดีขึ้นกว่าในสภาพหลังหล่อ แต่ค่าสมบัติทางกลที่ได้ไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับโลหะเงินผสมทองแดง (AgCu) และโลหะเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al) จากภาพที่ 4.36 พบว่า ค่าความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมทั้ง 4 ชุด มีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นสปริงของเหล็กกล้า (spring steel = 2.2 MPa) จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตและทำเป็นสปริงมากนัก ยกเว้นกรณีที่ไม่ต้องการค่าความเป็นสปริงสูง แต่ต้องการความเหนียวที่ดี เพราะค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ที่ได้อยู่ในระดับ 35-40% โดยค่าความเป็นสปริง พบอยู่ในช่วง 0.35 – 2.67 MPa ถึงแม้ค่าความเป็นสปริงจะน้อยกว่าแต่ก็สามารถเทียบกับวัสดุสปริงโลหะชนิดอื่น เช่น บรอนซ์ที่ผ่านการรีด มีค่าความเป็นสปริงประมาณ 0.42 MPa หรือเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 1.2% มีค่าความเป็นสปริง 1.93 MPa เป็นต้น ชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่เติมเบริลเลียม 0.3% และปรับเปลี่ยนดีบุกช่วง 0.2 – 0.5% จึงสามารถจะนำไปใช้เป็นตัวเลือกในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องประดับเงินที่มีสมบัติค่าสปริงไม่สูงมากได้ ส่วนอุณหภูมิในการอบบ่มนั้นการอบบ่มที่ 350°C ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าอบที่ 400°C

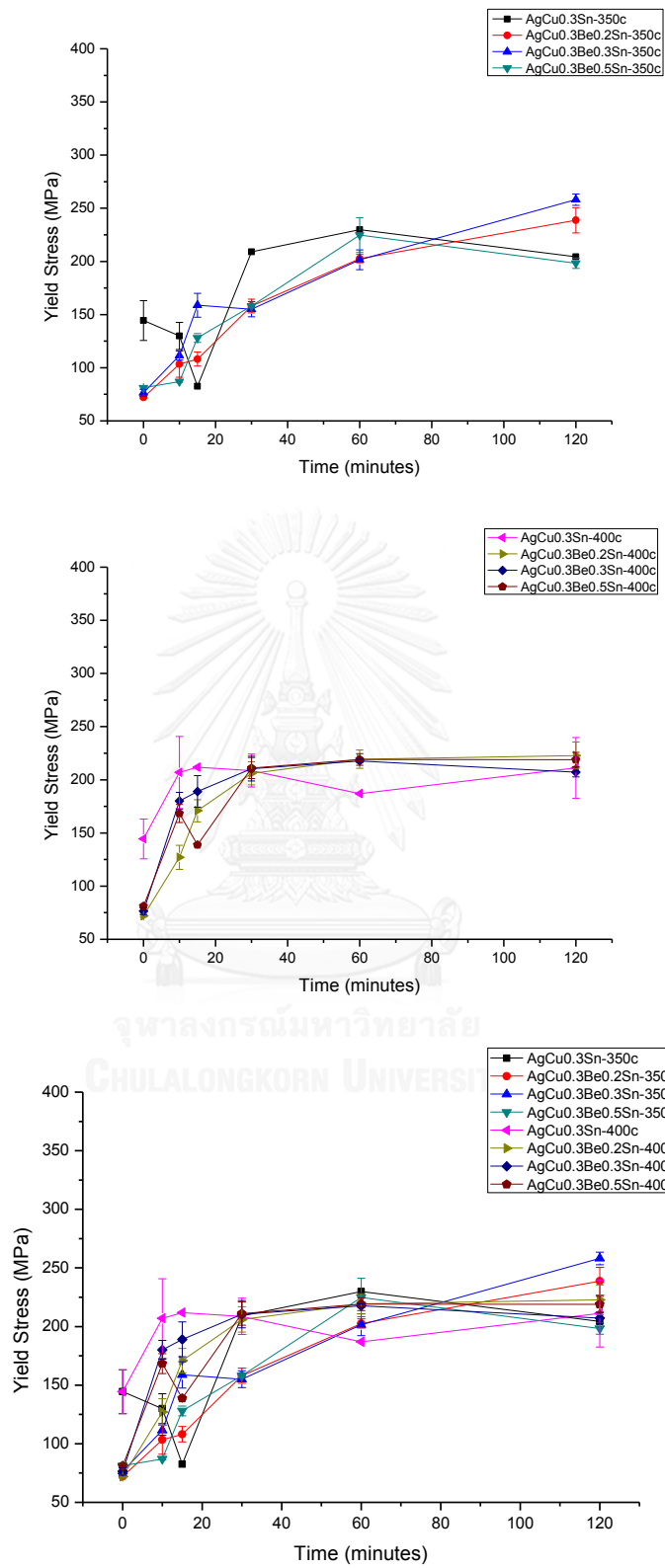
จากภาพที่ 4.37 ค่าความเค้น ณ จุดครากของโลหะผสมกลุ่มนี้เป็นไปเช่นเดียวกับค่าความเป็นสปริง โดยความเค้น ณ จุดครากที่เพิ่มขึ้นหลังการอบบ่ม มีค่าอยู่ในช่วง 100 – 260 MPa ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาการอบบ่มด้วย เช่นเดียวกับความแข็งในภาพที่ 4.39 มีค่าอยู่ในช่วง 15 – 35 HRA โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าความเหนียวหรืออัตราการยืดตัวของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ภาพที่ 4.38 นั้นโลหะผสมเงิน เบริลเลียม ดีบุก มีอัตราการยืดตัวของชิ้นงานค่อนข้างดีเยี่ยม ช่วง 15 – 50% (เนื่องจากค่าความแข็งแรงไม่สูงมาก) แต่สำหรับโลหะผสมชุดเงินดีบุกที่ ปราศจากการเติมเบริลเลียมนั้น มีความเหนียวที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งโลหะผสมชุด AgCu0.3Sn มี

ปัญหาการแตกเปราะของชิ้นงานหลังหล่อ โดยจากการสังเกตพบว่ารอยแตกของชิ้นงานหลังทดสอบการดึง จะมีจุดสี่เทา ๆ บริเวณรอยแตก ซึ่งอาจเป็นจุดกำเนิดของดึงแล้วขาดเร็วมีความเหนียวต่ำ โดยผู้เขียนสันนิษฐานว่า อาจเป็นกรณีที่ดีบุกมีการแยกตัวออกมาเป็นเม็ด ๆ ขณะน้ำโลหะเย็นตัว อาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในขั้นต่อไป

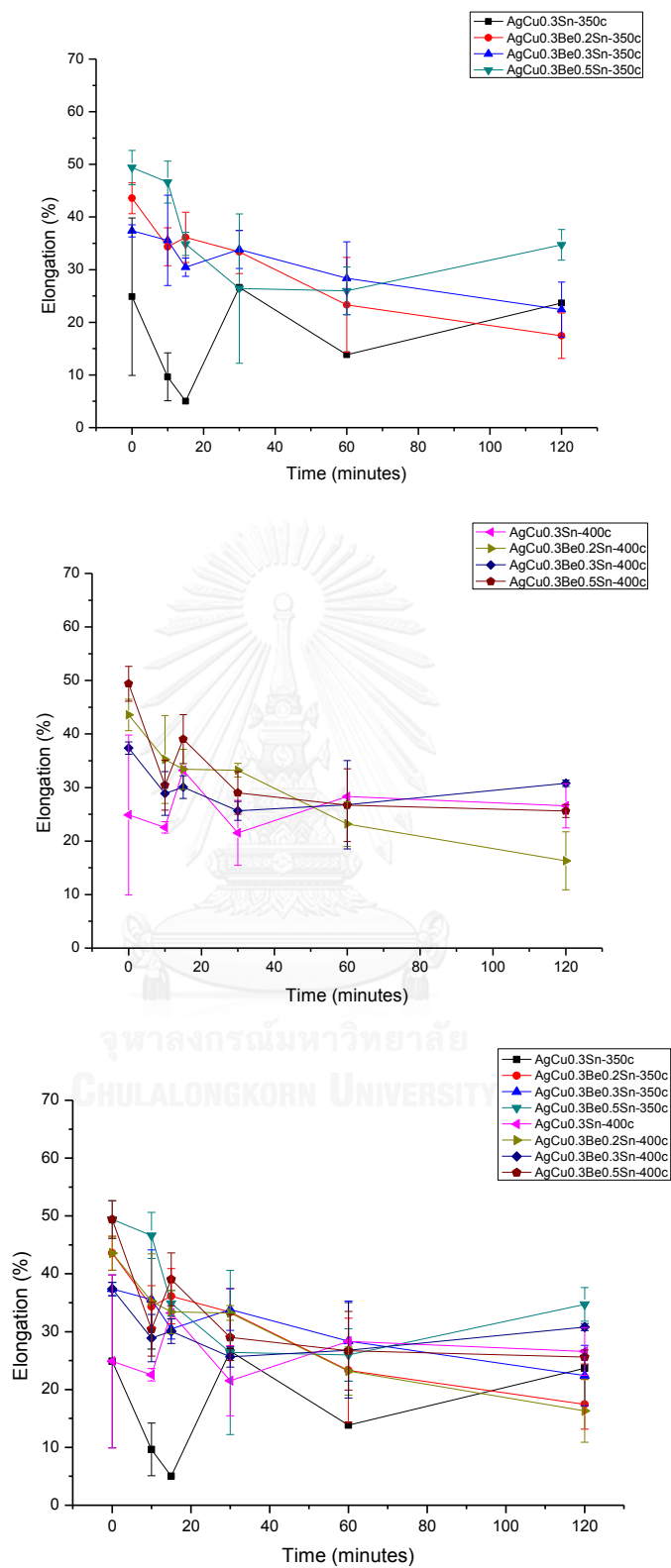




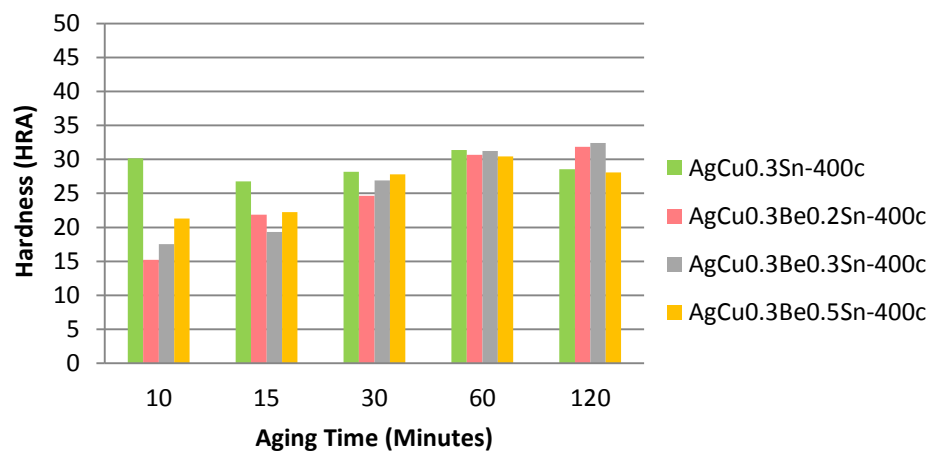
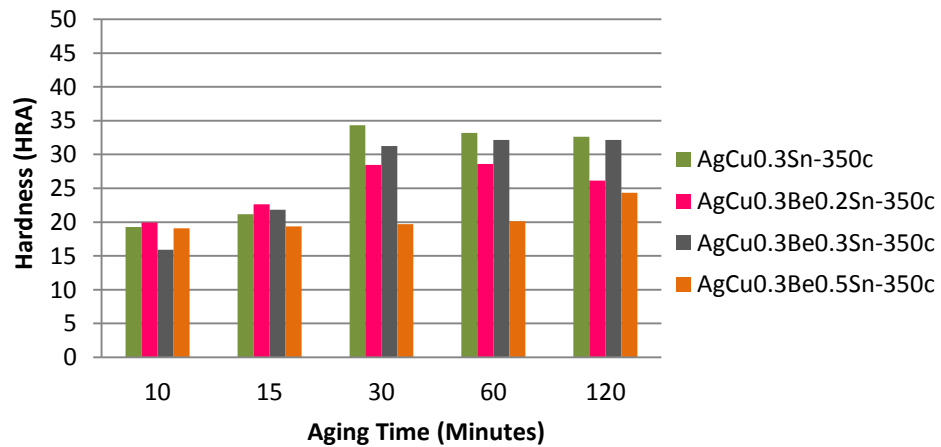
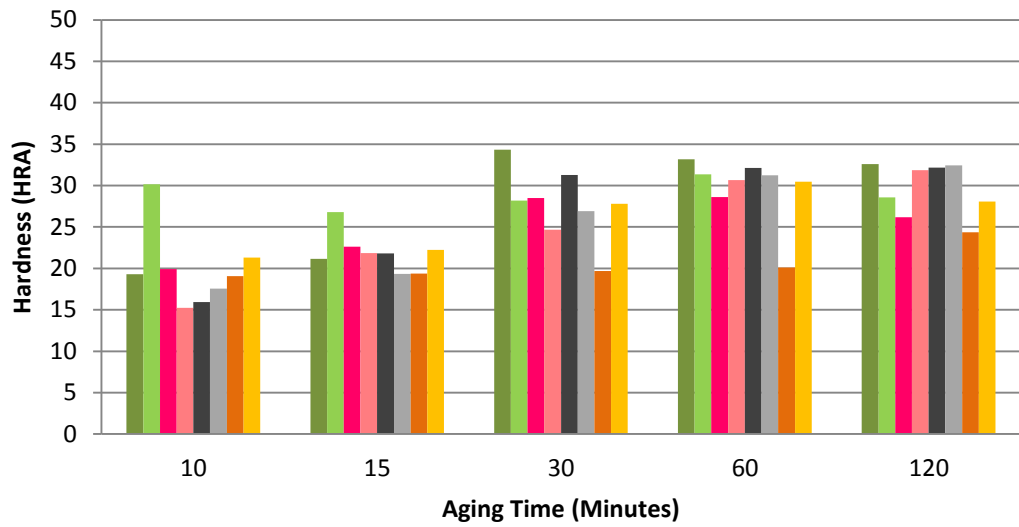
ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงค่าสมบัติความเป็นสปริง (Modulus of Resilience) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu_{0.3}Sn – AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn – AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn – AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.38 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C



** Aging time 0 minute: ND = Not Detect (ค่าต่ำกว่าสเกล HRA Rockwell) **

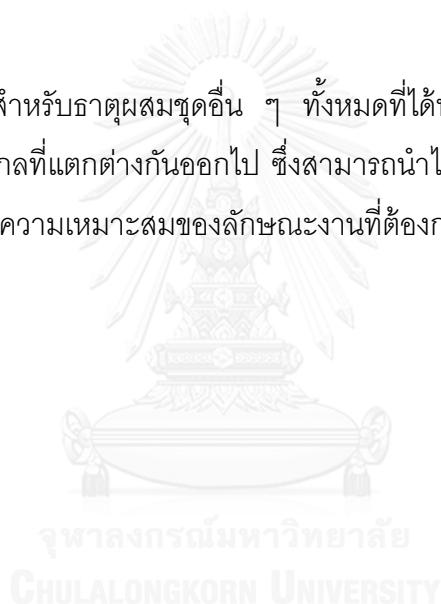
ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.2Sn – AgCu0.3Be0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C

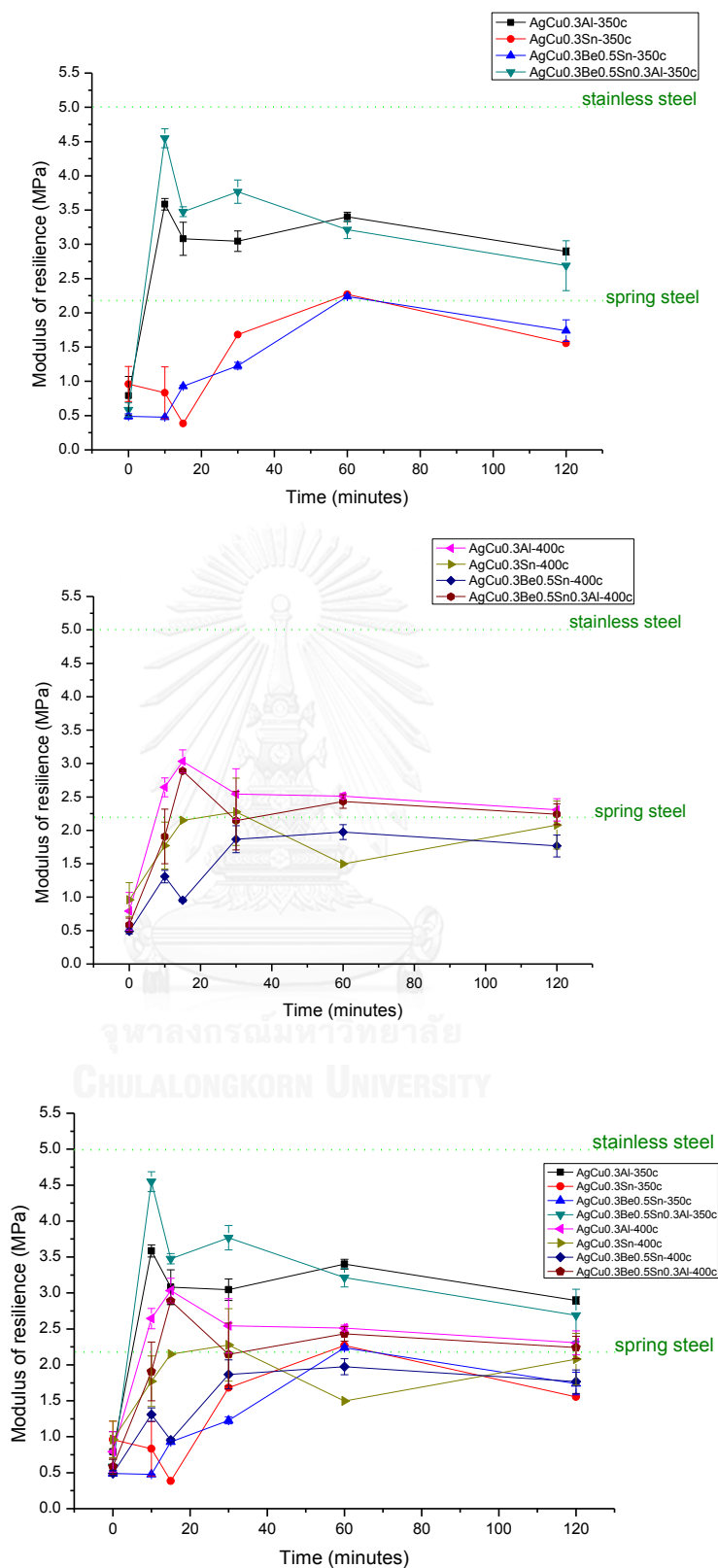
4.6.3 กลุ่ม AgCu0.3Al / AgCu0.3Sn / AgCu0.3Be0.5Sn / $\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$: ชุดโลหะผสมกลุ่มนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของการเติมธาตุผสมต่าง ๆ โดยมีทั้งการเติม อะลูมิเนียม (AgCu0.3Al), ดีบุก (AgCu0.3Sn) เบริลเลียมร่วมกับดีบุก (AgCu0.3Be0.5Sn) และการเติมเบริลเลียม ดีบุก ร่วมกับอะลูมิเนียม ($\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$) โดยผลการเติมธาตุผสม เหล่านี้ช่วยในการต้านทานการหมองที่ตีขึ้น อีกทั้งช่วยให้ชิ้นงานสภาวะหลังการอบบ่มมีคุณสมบัติ ที่ตีขึ้น ทั้งด้านความแข็งแรง และสมบัติทางกลต่าง ๆ จากภาพที่ 4.40 ผลของสมบัติความเป็น สปริงของทั้ง 4 ชุดโลหะผสมนี้ หลังผ่านการอบบ่มโดยใช้เวลาเพียงไม่นาน (ทั้ง 350°C และ 400°C) ค่าความเป็นสปริงเพิ่มขึ้นสูงมากโดยเฉพาะชุดโลหะกลุ่ม AgCu0.3Al และ $\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$ ซึ่งค่าความเป็นสปริงที่ทดสอบได้จะอยู่ในช่วง 2.0 – 4.5 MPa มากขึ้น กว่าเดิม 6 – 9 เท่า โดยค่าความเป็นสปริงที่เพิ่มขึ้นเข้าใกล้สปริงของวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เลยทีเดียว แต่สำหรับชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn และ AgCu0.3Be0.5Sn ที่ไม่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียม นั้น สมบัติความเป็นสปริงก็ปรับค่าสูงขึ้นหลังทำการอบ สามารถเทียบกับ สปริงของเหล็กกล้าได้เมื่อใช้เวลากการอบบ่มที่ 60 นาที โดยใช้อุณหภูมิ 350°C แต่ค่าที่ได้ก็ไม่สูง เท่ากับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุอะลูมิเนียมเติมลงไป 2 ชุด ที่กล่าวข้างต้น เนื่องจาก อะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการหมองได้ดีกว่าธาตุอื่น ๆ เมื่อ พิจารณาความเค้น ณ จุดครากตามภาพที่ 4.41 และค่าความแข็งแรงจากภาพที่ 4.43 พบว่าเป็น แนวโน้มเดียวกับสมบัติความเป็นสปริง และช่วงความเค้นจุดครากที่ได้หลังการอบบ่มของชุดโลหะ กลุ่ม AgCu0.3Al และ $\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$ จะอยู่ในช่วง 200 – 357 MPa ซึ่งมีความแข็งแรง สูงกว่าชุดธาตุผสมอื่น ๆ ส่วนค่าความแข็งแรงจะอยู่ในช่วง 20 – 50 HRA

เมื่อพิจารณาความเหนียวของวัสดุที่ได้ของโลหะเงินกลุ่มนี้ ภาพที่ 4.42 พบว่า อัตราการ ยืดตัวส่วนใหญ่ของโลหะกลุ่มนี้มีความเหนียวที่ดี เว้นแต่โลหะผสมชุด $\text{AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al}$ ที่ มีค่าความแข็งแรง สมบัติความเป็นสปริงสูงที่สุด ซึ่งเป็นธรรมชาติของวัสดุโลหะที่มีความแข็งแรง สูงแล้ว ความเหนียว หรืออัตราการยืดหยุ่นจะลดลง ดังนั้น จึงควรจะมีระดับระว่างในการเลือกใช้ โลหะผสมชนิดนี้ที่มีสมบัติสปริงสูง แต่ความเหนียวที่ได้มีค่าประมาณ 8 – 12% เท่านั้น แต่ในทาง การผลิตและใช้งานนั้นก็ยิ่งถือว่ายอมรับได้สำหรับอัตราการยืดตัวดังกล่าว สามารถนำไปผลิตเป็น ชิ้นงานเครื่องประดับบางที่ต้องการความคงทนและความสวยงามของลวดลาย

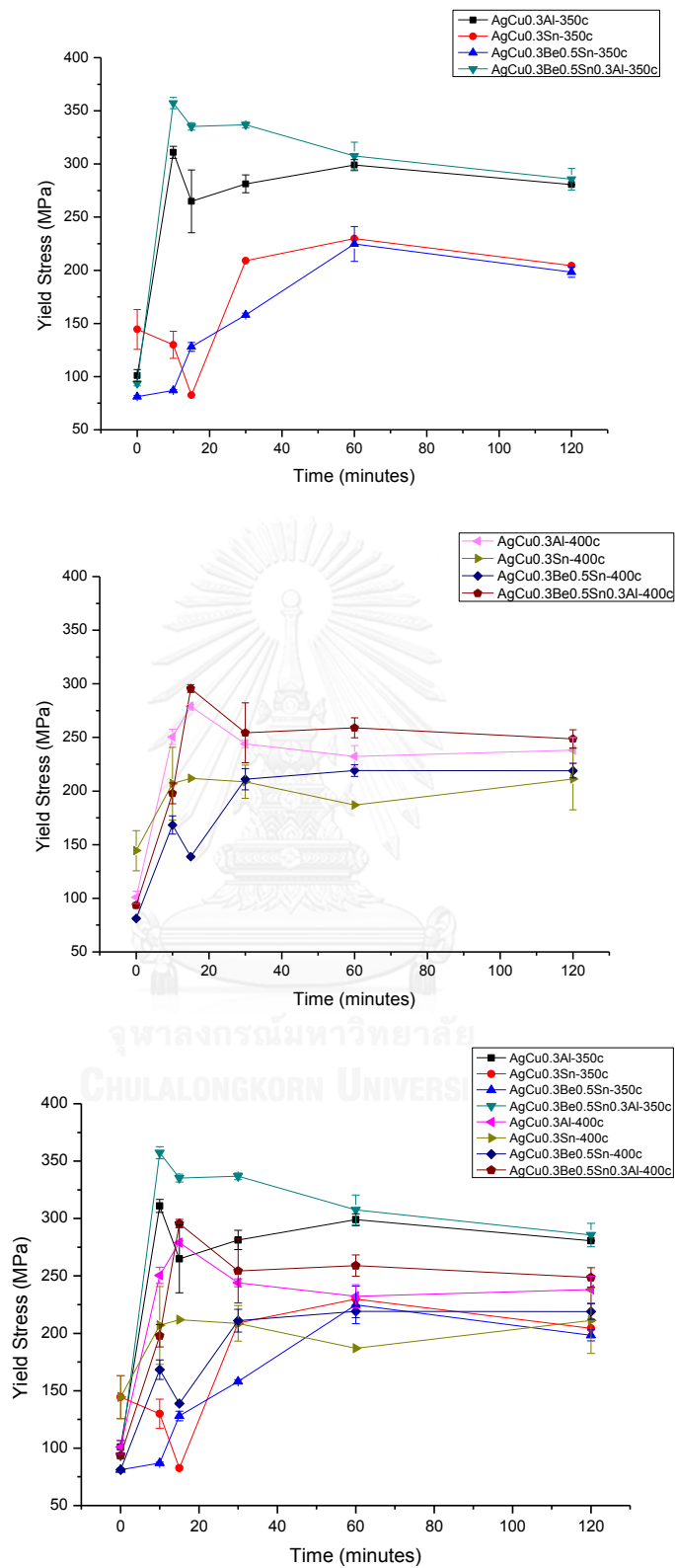
ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ชุดโลหะผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นเครื่องประดับ ที่ต้องการสมบัติความเป็นสปริงสูง และมีสีผิวสวยงาม สามารถต้านทานการหมองที่ดีจากสภาวะบรรยากาศการใช้งานปกติ สามารถเลือก ชุดโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Al}$ นอกจากจะมีความเป็นสปริงสูง ต้านทานการหมองดีแล้วยังมีอัตราการยืดตัวของวัสดุที่สูงมากพอและมีความเหมาะสม หรืออาจจะใช้โลหะผสมชุด $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ ก็ได้เช่นกัน แต่ควรระวังในชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่ต้องการความเหนียว เพราะโลหะผสมชุดนี้มีอัตราการยืดตัวที่จำกัด อย่างไรก็ตาม ในการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุด สำหรับโลหะผสมในการทำวิจัยครั้งนี้ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบบ่มคือ 350°C ใช้เวลาในการอบบ่ม 15 – 30 นาที เนื่องจากถ้าใช้เวลานานกว่านี้ทำให้ความแข็งแรงและสมบัติความเป็นสปริงที่ได้ลดลง อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองต้นทุน ค่าใช้จ่าย และเวลาในการผลิต

อย่างไรก็ตาม สำหรับธาตุผสมชุดอื่น ๆ ทั้งหมดที่ได้ทำการวิจัยครั้งนี้ก็ยังมีค่าความเป็นสปริงและสมบัติทางกลที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถนำไปเลือกใช้งานหรือผลิตเป็นชิ้นส่วนของเครื่องประดับได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานที่ต้องการ

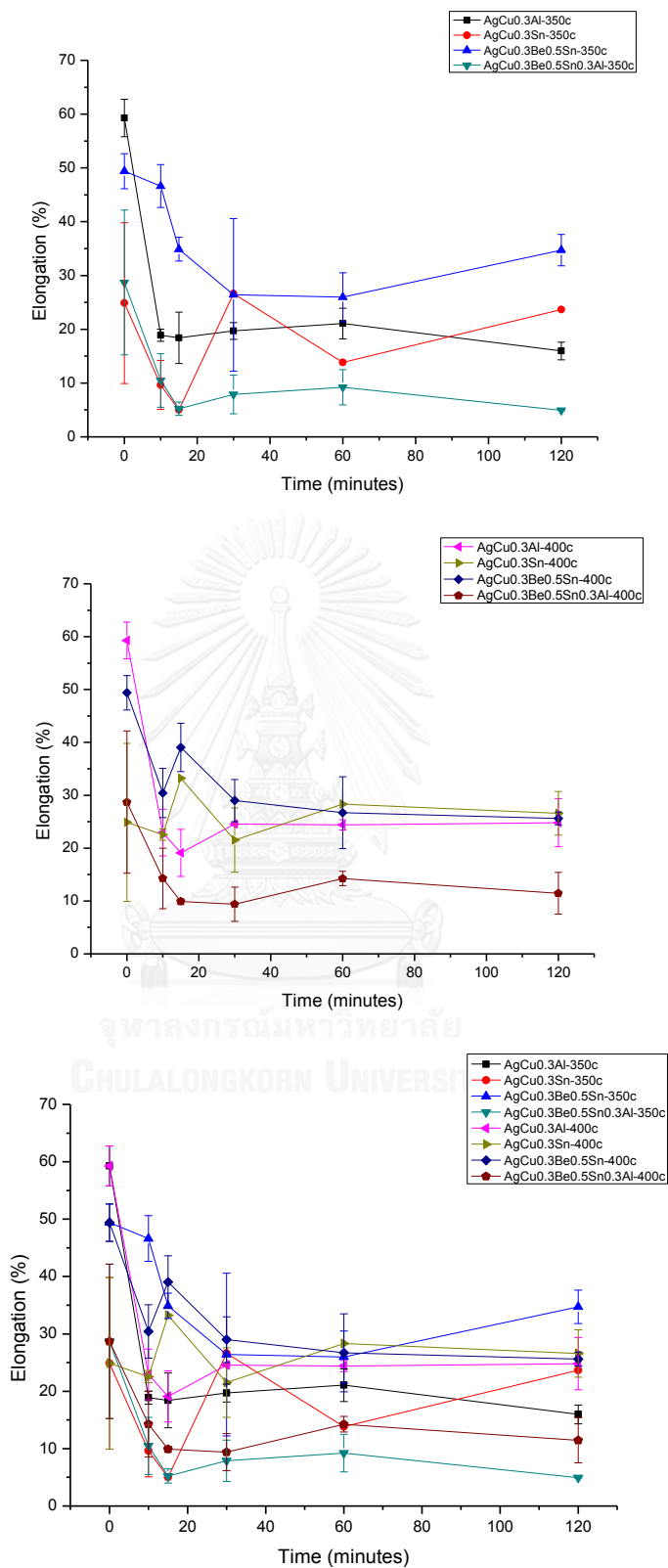




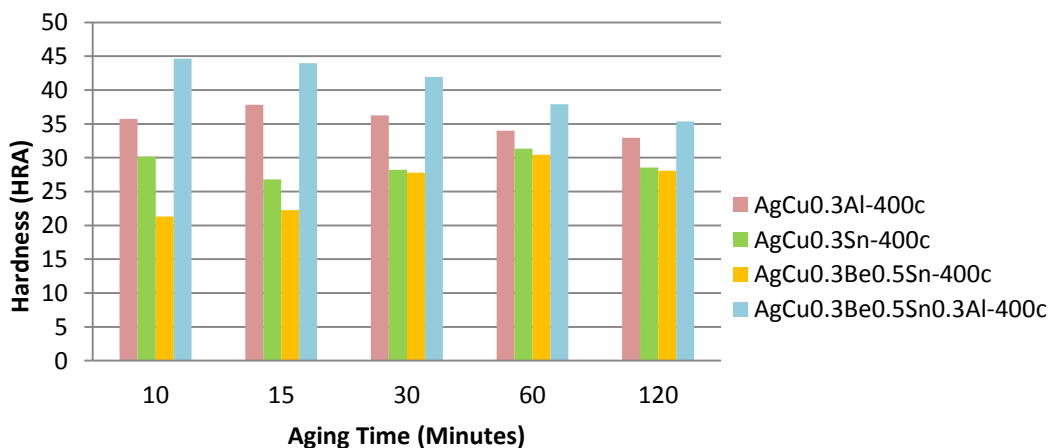
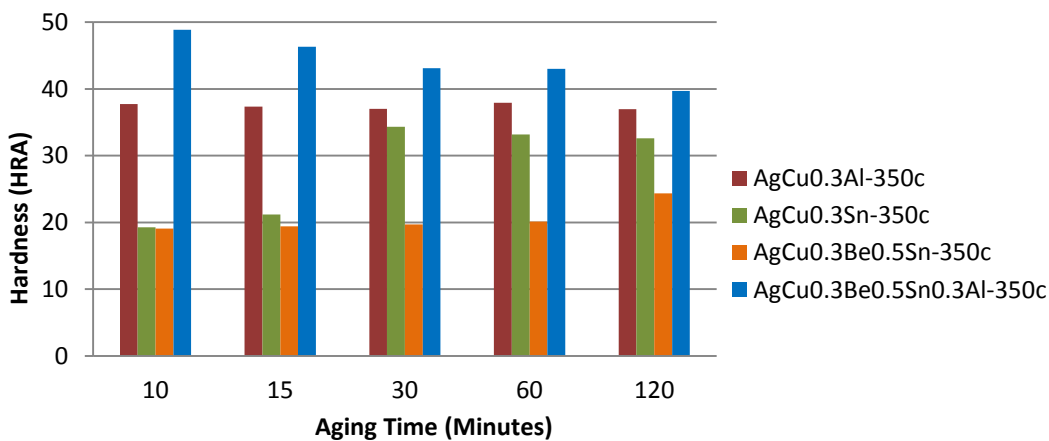
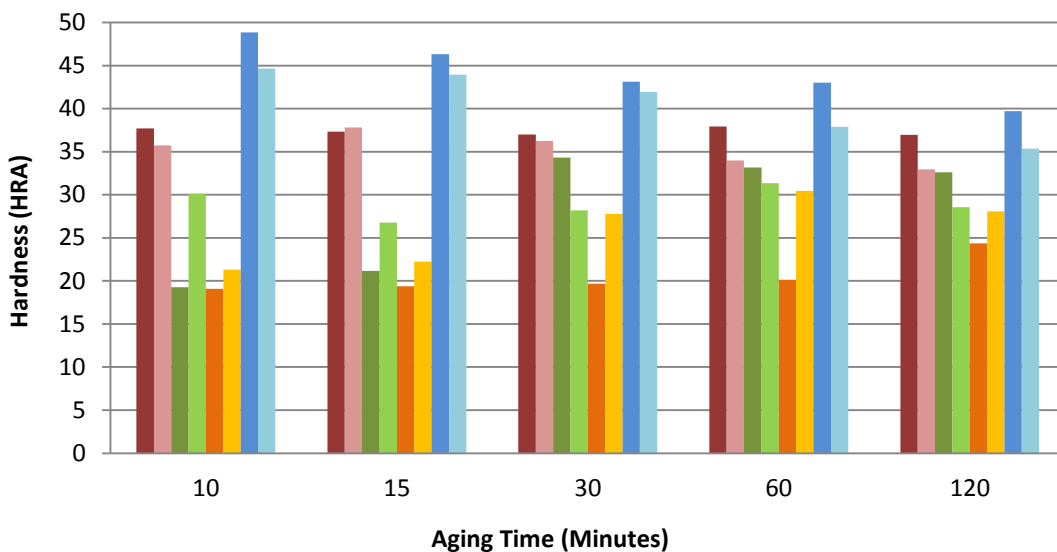
ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงสมบัติ Modulus of Resilience ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C



ภาพที่ 4.42 กราฟแสดงค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังอบบ่ม 350°C และ 400°C



** Aging time 0 minute: ND = Not Detect (ค่าต่ำกว่าสเกล HRA Rockwell) **

ภาพที่ 4.43 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness, HRA) ของ AgCu0.3Al – AgCu0.3Sn – AgCu0.3Be0.5Sn – AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al หลังการอบบ่ม 350°C และ 400°C

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) การเติมอะลูมิเนียม ทำให้เฟสเบตา (β -phase) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ กับโครงสร้างยูเทคติก รูปร่างเชื่อมต่อกัน การเติมดีบุก ทำให้โครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณลดลงและขนาดเล็กกว่า แต่พบเฟสเบตาขนาดใหญ่ที่อยู่ในโครงสร้างยูเทคติก ส่วนธาตุเบริลเลียมและธาตุดีบุก ทำให้แกนของโครงสร้างเดรนไดรท์ และระยะห่างระหว่างแกนของเดรนไดรท์ลดลง ท้องแดงเกิดการแยกตัวจากโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างพื้น เป็นเฟสเบตาและเฟสสีเทามากขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าเฟสสีเทาจะเป็น β -CuBe หรือ β' -CuBe โดยการเติมธาตุเบริลเลียมร่วมกับดีบุก ยังส่งผลให้เฟสเบตา (β -phase) มีลักษณะกลมมนมากยิ่งขึ้น

2) การเติมธาตุเบริลเลียม และอะลูมิเนียม ช่วยให้เกรนมีขนาดเล็กลง โดยขนาดเกรน (0.5 – 2 มิลลิเมตร) ที่ได้เล็กละเอียดกว่าโลหะผสม AgCu และโลหะผสม AgCu_{0.3}Sn (3 – 7 มิลลิเมตร) ประมาณ 3 – 6 เท่า และธาตุเบริลเลียม ธาตุอะลูมิเนียมถูกพบกระจายตัวอยู่ทั้งโครงสร้างพื้น และในโครงสร้างยูเทคติก

3) ธาตุผสมมีผลต่อสมบัติด้านทานการหมองและค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้ โดยการเติมอะลูมิเนียม เบริลเลียม และการเติมปริมาณธาตุดีบุกที่เพิ่มมากขึ้นสามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานการหมองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีอิทธิพลต่อการป้องกันการหมองของชิ้นงานได้ดีที่สุด ชุดโลหะผสม AgCu_{0.3}Al มีการเปลี่ยนแปลงค่าสีน้อยที่สุด โดยวัดค่า dE^* ได้ต่ำสุด อุณหภูมิและเวลาการอบบ่ม ส่งผลต่อสีผิวและสมบัติการต้านทานการหมองของชิ้นงานทดสอบ เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบบ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงสีและความหมองที่เกิดบนผิวชิ้นงานก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

4) การอบบ่ม ส่งผลทำให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกชิ้นงานทดสอบ ทั้งค่าความแข็งแรง ค่าความเค้น ณ จุดคราก ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับที่ต้องการสมบัติความแข็งแรงสูง และมีสีผิวสวยงาม ด้านทานการหมองดีในสภาวะบรรยากาศการใช้งานปกติ คือ โลหะผสม AgCu_{0.3}Al ที่อุณหภูมิอบบ่ม 350°C และเวลาอยู่ในช่วง 15 – 30 นาที โดยมีสมบัติค่าสปริงเท่ากับ 2.6 – 3.6 MPa ค่าความเค้น ณ จุดคราก 232 – 310 MPa

5.2 ปัญหาและข้อเสนอนแนะ

1) ควรศึกษาการระยะเวลาการเย็นตัวของน้ำโลหะเนื่องจากปัญหาการแตกเปราะของชิ้นงานโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อของชุด AgCu และ AgCu_{0.3}Sn เกิดขึ้นในสภาวะการเย็นตัวของโลหะเร็วเกินไป

2) ควรมีการศึกษาชั้นฟิล์ม หรือชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังผ่านการทดสอบสมบัติการหมอง (Tarnish Test) ของชิ้นงาน และหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม เพื่อเข้าใจกลไกที่เกิดขึ้น คุณสมบัติของชั้นฟิล์ม หรือชั้นออกไซด์ดังกล่าว

3) การศึกษาการปริมาณและกระจายตัวของตะกอน (Precipitation) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope :TEM) รวมถึงธาตุเบริลเลียม (Be) ที่มีข้อจำกัดไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ธรรมดาได้ เนื่องจากเป็นเบริลเลียมธาตุที่เบา และมีขนาดเล็กมากๆ ก็สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ด้วย TEM

4) โลหะผสมในกลุ่มที่มีการปรับเติมธาตุดีบุก 0.2 – 0.5% ซึ่งประกอบไปด้วย AgCu_{0.3}Sn, AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn, AgCu_{0.3}Be_{0.3}Sn และ AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn แม้ว่าความแข็งแรง และสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมทั้ง 4 ชุดนี้ จะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ (0.35 – 2.67 MPa) แต่ยังมี ความเหนียวที่ดี เพราะค่าอัตราการยืดตัว (Elongation) ที่ได้อยู่ในระดับ 15 – 50% ซึ่งมีค่าสูงสามารถนำไปใช้ตัวเลือกในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องประดับเงินอื่น ๆ ได้

5) สำหรับโลหะผสมที่มีสมบัติความเป็นสปริงและมีความแข็งแรงสูงมาก แต่ให้ความยืดหยุ่นต่ำ ตัวอย่างเช่น ชุดโลหะผสม AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al ที่มีค่าความเค้นจุดคราก 200 – 357 MPa และสมบัติความเป็นสปริงสูงถึง 2.0 – 4.55 MPa แต่มีอัตราการยืดตัวที่จำกัดในช่วง 8 – 12% เท่านั้น สามารถนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับได้ ซึ่งควรผลิตให้เป็นชิ้นงานบางเพื่อป้องกันการเสียรูป เช่น กำไลบาง แหวนบาง ที่มีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง เน้นการแสดงลวดลายสวยงาม และความคงทนแทน

รายการอ้างอิง

1. สงวนรักษ์ โล้วานิชย์เจริญ, ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. ปีการศึกษา 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. ตระกูลศักดิ์ สุขวีร์, การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียม เกรด 935, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. ปีการศึกษา 2549, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และคณะ, การปรับปรุงโลหะเงินสปริงเกรด 935 เพื่อการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเครื่องประดับ, ส. สำนักนายกรัฐมนตรี้, 1 พฤศจิกายน 2555.
4. ดร.ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, รวบรวมจาก หนังสือสารานุกรมธาตุ. ; from: <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Ag.html> , [http://th.wikipedia.org/wiki/เงิน_\(โลหะ\)](http://th.wikipedia.org/wiki/เงิน_(โลหะ))".
5. มอก. 21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน กระทรวงอุตสาหกรรม. 2515, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม: กระทรวงอุตสาหกรรม.
6. Pradyot P., *Handbook of Inorganic Chemicals*. 2002. pp. 253, 271, 275, 276, 313, 318, 818 , 822, 826, 833, 842, 845, 935, 940, 941, 991, 992.
7. อ.วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีประยุกต์ (02-411-105) หน่วยที่ 3 โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ (Metals and metal corrosion). 2554, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร: วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก ภาควิชาวิศวกรรม.
8. Patnaik, P., ph.D, *Handbook of Inorganic Chemicals*. 2002:97-255, New York: McGraw-Hill.
9. ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่ออนไลน์. หัวข้อเรื่องดีบุก. หมวดหมู่ : การใช้ประโยชน์ของโลหะชนิดต่างๆ. ; from: <http://lc.dpim.go.th/kb/1074>.
10. ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่ออนไลน์. หัวข้อเรื่องทองแดง. หมวดหมู่ : การใช้ประโยชน์ของโลหะชนิดต่างๆ]. ; from: <http://lc.dpim.go.th/kb/1077>.

11. สมนึก วัฒนศรียกูล และคณะ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ, ส. (สกว.), มกราคม 2544. p. 13.
12. ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่ออนไลน์. หัวข้อเรื่องอะลูมิเนียม. หมวดหมู่ : การใช้ประโยชน์ของโลหะชนิดต่างๆ]. ; from: <http://lc.dpim.go.th/kb/1084> และ <http://www.kme10.com/mo4y2552/mo403/noname13.html>.
13. W.F. Hosford., *Mechanical Behavior of Materials*. 2005, University of Michigan.
14. Ashby, Michael F. and David RH Jones., *Engineering Materials: An Introduction to Their Properties and Applications*. 1985: 32-35, Oxford: Pergamon Press Ltd.
15. Lessells, J.M., *Strength and Resistance of Metals*. 1954: 7, New York: John Wiley & Sons, Inc,
16. Properties of Precious Metals. ASM Handbook., *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material*. Vol. 2. 10th ed. 2000: 699-702, Ohio: ASM International.
17. อภิชชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตติภรณ์., เอกสารประกอบการเรียน เรื่องการทดสอบความแข็ง. ; from: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/CV/Lab_5_Hardness.pdf
18. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. ; from: <http://www.isit.or.th/>
19. ; from: <http://www.twiprofessional.com/content/jk74.html>.
20. มนต์ สติกรจินดา., บรอนซ์เบริลเลียม, โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. 2543: 36-40, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Phase diagram. ASM Handbook., *Alloy Phase Diagrams*. Vol. 3. 10th ed. 2000:28, Ohio: ASM International.
22. G. Effenberg and S. Ilyenko., *Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data*. 2007, Materials Science International Team, MSIT.
23. ; from: <http://materials-informatics-class-fall2015.github.io/MIC-Ternary-Eutectic-Alloy/2015/09/08/First-Post-About-Paper/>.

24. Edgar E. Vidal., *Beryllium Chemistry and Processing*, in *Lawrence Livermore National Laboratory*, A.G.a.E.N.C. Dalder, Editor. July 2009, Brush Wellman, Inc.,
25. ; from: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F02879428#page-1>
26. Milton Ohring., *How Engineering Materials are strengthened and toughened*. Engineering Materials Science, chapter 9 1995-12-01.
27. Reed-Hill, Robert E., *Physical Metallurgy Principle*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc.,
28. Christopher, Raub. *Use of Silver in Jewelry in The Proceeding of The Santa Fe Symposium of Jewelry Manufacturing Technology*. 1989: 241-256.
29. พรหมมินทร์ เจริญยิ่ง., ผลของธาตุผสมซิลิคอนและแคลเซียมต่อการลดออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลวในเตาอินดัคชันที่สภาวะบรรยากาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ. ปีการศึกษา 2542, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
30. Vinal, G.W., and Schramm. 1934, G.M Metal Industry (N.T.). p. 1, 15, 22, 100, 151, 231.
31. เอกสารสรุปโครงการการจัดการองค์ความรู้ภาควิชาคหกรรมศาสตร์., คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 4 กุมภาพันธ์ 2556.
; from: http://cms2.swu.ac.th/Portals/เอกสารอ้างอิง/HOM_55_7.2_2.3.pdf
32. Konica Minolta. *Precise color communication*. 2003 ; from:
https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/PRECISE_COLOR_COMMUNICATION/pcc_english_13.pdf.
33. เอกสิทธิ์ นิสารัตนาพร และศิริรัตน์ นิสารัตนาพร., อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, Editor. 2547. p. 51-67.
34. Gardam G.E., *Sterling Silver Containing Aluminium, Metallurgia*. 1953. p. 29.
35. Carrano, R. in *Proceedings of the fourth Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*. 1990.
36. Slomon, Hedley Archibald., *Improvement in and Relating to Alloying Containing Beryllium and Silver*. May 25, 1932: 1-4.

37. McFarland, James C. and Fort Thomas., *Age Hardening Silver of Sterling of Higher Standard*. Sept 14, 1932: 1-2.
38. Robert H. Leach., *Alloys*. April 17, 1934: 1-2.
39. Emmert Kenneth L, Hensel Franz R, Wiggs James W., *Silver copper alloy*. Apr. 9, 1940, CI 75-173.
40. สิริพร โจนนันต์, สุรศิษฐ์ โจนนันต์, เกียรติกร แสงอำนาจเดช, สุริยงค์ ช้างนิล และ อเนก พานแววาว, อิทธิพลของการอบบ่มที่มีผลต่อโครงสร้างและความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (*The Effect of Age Hardening on Structure and Hardness of Silver Sterling*), การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1., 31 สิงหาคม 2550., สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
41. Carrano V Richard, and Mondillo A Ronald., *Tarnish-resistant Hardenable Fine Silver Alloys*. Oct. 31, 2000.
42. Youdelis, W.V., *Silver-copper-germanium alloys having high oxidation resistant melts*. 1978.
43. Croce Scott M., *Anti-tarnish silver alloy*. Jan 11, 2005.
44. Peter Gamon Johns., *Process for making finished or semi-finished articles of silver alloy*. Oct 21, 2010.
45. Melvin Bernhard, James T. Sivertsen., *Silver alloy compositions, and master alloy compositions*. Aug 13, 1991.
46. Franz It. Hensel, Kenneth L. Emmert, and James W. Wiggs, *SILVER ALLOY*. Apr. 9, 1940.
47. Robert H. Leach., *ALLOYS*. Feb. 18, 1936.
48. James C. McFarland., *Age hardening silver of sterling or higher standard*. Dec 11, 1934.
49. ปวีร์ชัย ชัยโคม, สิริพร โจนนันต์ และไพฑูริย์ ช่างทอง., การปรับปรุงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สแกนเดียม และกระบวนการอบแข็ง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 32. ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2552.

50. American Society of Testing and Materials., *Annual Book of ASTM Standard*.
Vol. 03.01. ASTM E 8M - 96 , 1996. pp. 76 – 96.
51. ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ รศ.ดร. ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี., โครงการการปรับปรุง
โลหะเงินสปริงเกรด 935 ด้วยเบรลด์เลียม, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 22 เมษายน 2555, เสนอสำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักนายกรัฐมนตรี.





ภาคผนวก ก.

ลักษณะต้นโลหะเงินสเตอร์ลิงและสีของชิ้นงานสภาพหลังหล่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ก1. ภาพต้นโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อ (As-cast) และล้างปูนเรียบร้อยแล้วของโลหะผสม ทั้ง 7 ชุด

1. ชุดโลหะผสม AgCu :

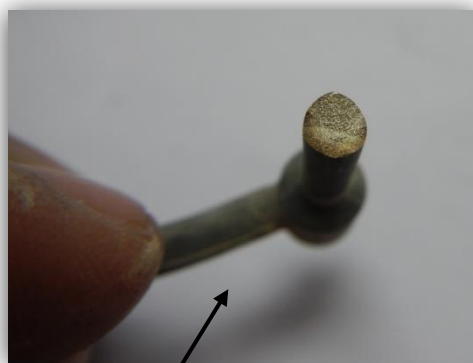


ชิ้นงานแตกเปราะหลังหล่อ ซึ่งมีการแตกหักขณะล้างปูน และขณะใช้คีมตัดออกจากต้นโลหะเงินสเตอร์ลิง

2. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Al :



3. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn :



ชิ้นงานมีลักษณะแตกเปราะหลังหล่อที่ต้นโลหะ โดยจะแตกหัก
ขณะล้างปูน และขณะใช้คีมตัดออกจากต้นโลหะเงินสเตอร์ลิง

4. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn :



5. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn :



6. ชุดโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$:



7. ชุดโลหะผสม $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$:



ภาคผนวก ข.

ข้อมูล ICP-OES จากศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

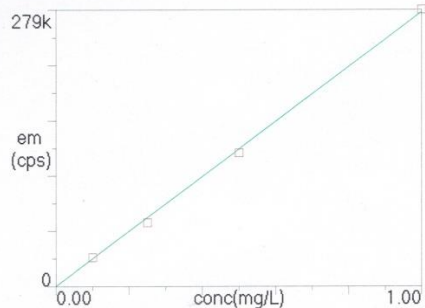
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Calib

Method: Nawarat-Ag-080316

Result:

Ag 328.068



1

Method: Nawarat-Ag-080316

Page 1

Date: 3/8/2016 4:56:09 PM

=====
Analysis BegunStart Time: 3/8/2016 4:29:44 PM
Logged In Analyst: Dentistry CU
Spectrometer Model: Optima 7300 DVPlasma On Time: 3/8/2016 4:22:56 PM
Technique: ICP Continuous
Autosampler Model: S10Sample Information File: C:\pe\Dentistry CU\Sample Information\Nawarat-080316\Ag-1.10-BS1-2-5-10.sif
Batch ID:
Results Data Set: Nawarat-Ag-s1.100-080316
Results Library: C:\pe\Dentistry CU\Results\Results.mdb=====
Sequence No.: 1
Sample ID: reagent blank
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution:Autosampler Location: 13
Date Collected: 3/8/2016 4:29:51 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: reagent blank

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 253111.5 | 253719.2 | 0.920 mg/L | 0.920 mg/L | 16:31:08 |
| 2 | Ag 328.068 | 254303.7 | 254911.3 | 0.924 mg/L | 0.924 mg/L | 16:31:22 |
| 3 | Ag 328.068 | 254295.5 | 254903.1 | 0.924 mg/L | 0.924 mg/L | 16:31:36 |

Mean Data: reagent blank

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 254511.2 | 0.923 mg/L | 0.0025 | 0.923 mg/L | 0.0025 | 0.27% |

=====
Sequence No.: 2
Sample ID: BS1
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution: 100XAutosampler Location: 62
Date Collected: 3/8/2016 4:32:51 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: BS1

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 11998351.8 | 11998959.5 | 42.57 mg/L | 4257 mg/L | 16:34:02 |
| 2 | Ag 328.068 | 11990907.1 | 11991514.8 | 42.55 mg/L | 4255 mg/L | 16:34:16 |
| 3 | Ag 328.068 | 12124727.5 | 12125335.1 | 43.03 mg/L | 4303 mg/L | 16:34:30 |

Mean Data: BS1

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 12038603.1 | 42.72 mg/L | 0.273 | 4272 mg/L | 27.3 | 0.64% |

=====
Sequence No.: 3
Sample ID: BS2
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution: 100XAutosampler Location: 63
Date Collected: 3/8/2016 4:35:49 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: BS2

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 12903394.5 | 12904002.1 | 45.85 mg/L | 4585 mg/L | 16:37:00 |
| 2 | Ag 328.068 | 12863379.7 | 12863987.3 | 45.71 mg/L | 4571 mg/L | 16:37:13 |
| 3 | Ag 328.068 | 12964318.1 | 12964925.8 | 46.07 mg/L | 4607 mg/L | 16:37:26 |

Mean Data: BS2

Method: Nawarat-Ag-080316 Page 2 Date: 3/8/2016 4:56:09 PM

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 12910971.7 | 45.88 mg/L | | 0.184 | 4588 mg/L | 18.4 | 0.40% |

Sequence No.: 4
 Sample ID: BS5
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 100X

Autosampler Location: 64
 Date Collected: 3/8/2016 4:38:46 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS5

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 11896480.3 | 11897088.0 | 42.20 mg/L | 4220 mg/L | 16:39:57 |
| 2 | Ag 328.068 | 12142204.3 | 12142811.9 | 43.09 mg/L | 4309 mg/L | 16:40:11 |
| 3 | Ag 328.068 | 12022746.1 | 12023353.7 | 42.66 mg/L | 4266 mg/L | 16:40:24 |

Mean Data: BS5

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 12021084.5 | 42.65 mg/L | | 0.445 | 4265 mg/L | 44.5 | 1.04% |

Sequence No.: 5
 Sample ID: BS10
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 100X

Autosampler Location: 65
 Date Collected: 3/8/2016 4:41:44 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS10

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 13632645.3 | 13633253.0 | 48.50 mg/L | 4850 mg/L | 16:42:54 |
| 2 | Ag 328.068 | 13611794.0 | 13612401.7 | 48.42 mg/L | 4842 mg/L | 16:43:08 |
| 3 | Ag 328.068 | 13498036.7 | 13498644.4 | 48.01 mg/L | 4801 mg/L | 16:43:21 |

Mean Data: BS10

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 13581433.0 | 48.31 mg/L | | 0.263 | 4831 mg/L | 26.3 | 0.54% |

Sequence No.: 6
 Sample ID: AgCu
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 100X

Autosampler Location: 66
 Date Collected: 3/8/2016 4:44:40 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 12790838.3 | 12791446.0 | 45.44 mg/L | 4544 mg/L | 16:45:51 |
| 2 | Ag 328.068 | 12764891.7 | 12765499.4 | 45.35 mg/L | 4535 mg/L | 16:46:04 |
| 3 | Ag 328.068 | 12799106.0 | 12799713.7 | 45.47 mg/L | 4547 mg/L | 16:46:17 |

Mean Data: AgCu

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 12785553.0 | 45.42 mg/L | | 0.065 | 4542 mg/L | 6.5 | 0.14% |

Sequence No.: 7
 Sample ID: AgCu0.3Sn
 Analyst:
 Initial Sample Wt:

Autosampler Location: 67
 Date Collected: 3/8/2016 4:47:37 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:

Method: Nawarat-Ag-080316

Page 3

Date: 3/8/2016 4:56:09 PM

Dilution: 100X

Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu0.3Sn

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 13016263.4 | 13016871.1 | 46.26 mg/L | 4626 mg/L | 16:48:51 |
| 2 | Ag 328.068 | 13034935.4 | 13035543.1 | 46.33 mg/L | 4633 mg/L | 16:49:07 |
| 3 | Ag 328.068 | 12957393.3 | 12958001.0 | 46.05 mg/L | 4605 mg/L | 16:49:23 |

Mean Data: AgCu0.3Sn

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 13003471.7 | 46.21 mg/L | 0.147 | 4621 mg/L | 14.7 | 0.32% |

Sequence No.: 8

Sample ID: AgCu0.3Al

Analyst:

Initial Sample Wt:

Dilution: 100X

Autosampler Location: 68

Date Collected: 3/8/2016 4:50:43 PM

Data Type: Original

Initial Sample Vol:

Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu0.3Al

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Ag 328.068 | 12740630.0 | 12741237.7 | 45.26 mg/L | 4526 mg/L | 16:51:55 |
| 2 | Ag 328.068 | 12809660.2 | 12810267.9 | 45.51 mg/L | 4551 mg/L | 16:52:08 |
| 3 | Ag 328.068 | 13035045.9 | 13035653.5 | 46.33 mg/L | 4633 mg/L | 16:52:22 |

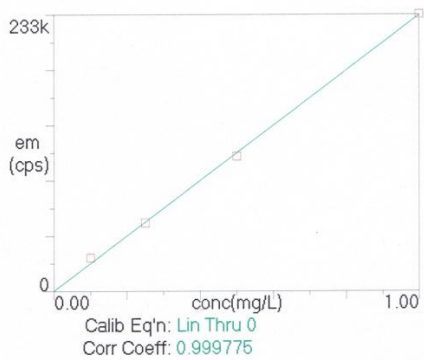
Mean Data: AgCu0.3Al

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Ag 328.068 | 12862386.4 | 45.70 mg/L | 0.558 | 4570 mg/L | 55.8 | 1.22% |

Calib

Method: Nawarat-Cu-080316
Result: Nawarat-Cu-std-080316

Cu 327.393



1

Method: Nawarat-Cu-080316

Page 1

Date: 3/8/2016 3:33:51 PM

=====
Analysis Begun

Start Time: 3/8/2016 3:07:27 PM Plasma On Time: 3/8/2016 2:36:39 PM
 Logged In Analyst: Dentistry CU Technique: ICP Continuous
 Spectrometer Model: Optima 7300 DV, S/N No Serial #Autosampler Model: S10

Sample Information File: C:\pe\Dentistry CU\Sample Information\Nawarat-080316\Cu-BS1-2-5-10.sif
 Batch ID:
 Results Data Set: Nawarat-Cu-sample-080316
 Results Library: C:\pe\Dentistry CU\Results\Results.mdb

Sequence No.: 1 Autosampler Location: 13
 Sample ID: reagent blank Date Collected: 3/8/2016 3:07:27 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: Sample Prep Vol:

Replicate Data: reagent blank

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 13068.5 | 14149.6 | 0.061 mg/L | 0.061 mg/L | 15:08:46 |
| 2 | Cu 327.393 | 12374.3 | 13455.4 | 0.058 mg/L | 0.058 mg/L | 15:09:02 |
| 3 | Cu 327.393 | 12648.3 | 13729.4 | 0.059 mg/L | 0.059 mg/L | 15:09:17 |

Mean Data: reagent blank

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 13778.1 | 0.059 mg/L | 0.0015 | 0.059 mg/L | 0.0015 | 2.54% |

Sequence No.: 2 Autosampler Location: 14
 Sample ID: BS1 Date Collected: 3/8/2016 3:10:32 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS1

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 52040186.7 | 52041267.8 | 224.3 mg/L | 224.3 mg/L | 15:11:50 |
| 2 | Cu 327.393 | 52182225.0 | 52183306.0 | 224.9 mg/L | 224.9 mg/L | 15:12:11 |
| 3 | Cu 327.393 | 52075855.8 | 52076936.8 | 224.5 mg/L | 224.5 mg/L | 15:12:32 |

Mean Data: BS1

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 52100503.6 | 224.6 mg/L | 0.32 | 224.6 mg/L | 0.32 | 0.14% |

Sequence No.: 3 Autosampler Location: 15
 Sample ID: BS2 Date Collected: 3/8/2016 3:13:52 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS2

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 57252501.4 | 57253582.5 | 246.8 mg/L | 246.8 mg/L | 15:15:13 |
| 2 | Cu 327.393 | 57813609.9 | 57814690.9 | 249.2 mg/L | 249.2 mg/L | 15:15:37 |
| 3 | Cu 327.393 | 58007720.7 | 58008801.7 | 250.1 mg/L | 250.1 mg/L | 15:16:01 |

Mean Data: BS2

Method: Nawarat-Cu-080316 Page 2 Date: 3/8/2016 3:33:51 PM

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 57692358.4 | 248.7 mg/L | | 1.69 | 248.7 mg/L | 1.69 | 0.68% |

Sequence No.: 4
 Sample ID: BS5
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 16
 Date Collected: 3/8/2016 3:17:21 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS5

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|-------------|--------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 50884832.7 | 50885913.7 | 219.3 mg/L | | 219.3 mg/L | 15:18:40 |
| 2 | Cu 327.393 | 50668647.0 | 50669728.1 | 218.4 mg/L | | 218.4 mg/L | 15:19:04 |
| 3 | Cu 327.393 | 50574927.1 | 50576008.1 | 218.0 mg/L | | 218.0 mg/L | 15:19:27 |

Mean Data: BS5

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 50710550.0 | 218.6 mg/L | | 0.69 | 218.6 mg/L | 0.69 | 0.31% |

Sequence No.: 5
 Sample ID: BS10
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 17
 Date Collected: 3/8/2016 3:20:47 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS10

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|-------------|--------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 49193138.5 | 49194219.5 | 212.1 mg/L | | 212.1 mg/L | 15:22:06 |
| 2 | Cu 327.393 | 49611840.8 | 49612921.9 | 213.9 mg/L | | 213.9 mg/L | 15:22:27 |
| 3 | Cu 327.393 | 49584717.0 | 49585798.1 | 213.7 mg/L | | 213.7 mg/L | 15:22:49 |

Mean Data: BS10

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 49464313.2 | 213.2 mg/L | | 1.01 | 213.2 mg/L | 1.01 | 0.47% |

Sequence No.: 6
 Sample ID: AgCu
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 18
 Date Collected: 3/8/2016 3:24:09 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|-------------|--------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 60285520.1 | 60286601.2 | 259.9 mg/L | | 259.9 mg/L | 15:25:27 |
| 2 | Cu 327.393 | 60710370.9 | 60711452.0 | 261.7 mg/L | | 261.7 mg/L | 15:25:48 |
| 3 | Cu 327.393 | 60538797.9 | 60539879.0 | 261.0 mg/L | | 261.0 mg/L | 15:26:09 |

Mean Data: AgCu

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 60512644.1 | 260.9 mg/L | | 0.92 | 260.9 mg/L | 0.92 | 0.35% |

Sequence No.: 7
 Sample ID: AgCu0.3Sn
 Analyst:
 Initial Sample Wt:

Autosampler Location: 19
 Date Collected: 3/8/2016 3:27:28 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:

Method: Nawarat-Cu-080316

Page 3

Date: 3/8/2016 3:33:51 PM

Dilution: 1X

Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu0.3Sn

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 56852851.7 | 56853932.7 | 245.1 mg/L | 245.1 mg/L | 15:28:48 |
| 2 | Cu 327.393 | 57567734.7 | 57568815.8 | 248.2 mg/L | 248.2 mg/L | 15:29:11 |
| 3 | Cu 327.393 | 57335360.9 | 57336442.0 | 247.2 mg/L | 247.2 mg/L | 15:29:34 |

Mean Data: AgCu0.3Sn

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 57253063.5 | 246.8 mg/L | 1.57 | 246.8 mg/L | 1.57 | 0.64% |

=====

Sequence No.: 8
Sample ID: AgCu0.3Al
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution: 1X

Autosampler Location: 20
Date Collected: 3/8/2016 3:30:55 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCu0.3Al

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Cu 327.393 | 59900065.5 | 59901146.6 | 258.2 mg/L | 258.2 mg/L | 15:32:13 |
| 2 | Cu 327.393 | 59843983.4 | 59845064.5 | 258.0 mg/L | 258.0 mg/L | 15:32:34 |
| 3 | Cu 327.393 | 59833607.9 | 59834689.0 | 257.9 mg/L | 257.9 mg/L | 15:32:55 |

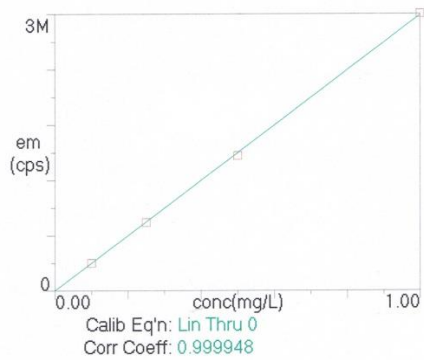
Mean Data: AgCu0.3Al

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Cu 327.393 | 59860300.0 | 258.0 mg/L | 0.15 | 258.0 mg/L | 0.15 | 0.06% |

Calib

Method: Nawarat-Be-080316
Result: Nawarat-Cu-sample-080316

Be 313.107



1

Method: Nawarat-Be-080316

Page 1

Date: 3/8/2016 5:19:34 PM

=====
Analysis BegunStart Time: 3/8/2016 5:02:22 PM
Logged In Analyst: Dentistry CU
Spectrometer Model: Optima 7300 DVPlasma On Time: 3/8/2016 4:22:56 PM
Technique: ICP Continuous
Autosampler Model: S10Sample Information File: C:\pe\Dentistry CU\Sample Information\Nawarat-080316\Be-BS1-2-5-10.sif
Batch ID:
Results Data Set: Nawarat-Be-s1.10-080316
Results Library: C:\pe\Dentistry CU\Results\Results.mdb=====
Sequence No.: 1
Sample ID: reagent blank
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution:
Autosampler Location: 13
Date Collected: 3/8/2016 5:02:23 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: reagent blank

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Be 313.107 | -5080.6 | 1306.5 | 0.000 mg/L | 0.000 mg/L | 17:03:40 |
| 2 | Be 313.107 | -5142.2 | 1244.9 | 0.000 mg/L | 0.000 mg/L | 17:03:54 |
| 3 | Be 313.107 | -5050.0 | 1337.1 | 0.000 mg/L | 0.000 mg/L | 17:04:08 |

Mean Data: reagent blank

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Be 313.107 | 1296.2 | 0.000 mg/L | 0.0000 | 0.000 mg/L | 0.0000 | 3.62% |

=====
Sequence No.: 2
Sample ID: BS1
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution: 10X
Autosampler Location: 26
Date Collected: 3/8/2016 5:05:23 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: BS1

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Be 313.107 | 4107769.4 | 4114156.5 | 1.230 mg/L | 12.30 mg/L | 17:06:36 |
| 2 | Be 313.107 | 4082418.0 | 4088805.0 | 1.223 mg/L | 12.23 mg/L | 17:06:53 |
| 3 | Be 313.107 | 4099465.7 | 4105852.8 | 1.228 mg/L | 12.28 mg/L | 17:07:09 |

Mean Data: BS1

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Be 313.107 | 4102938.1 | 1.227 mg/L | 0.0039 | 12.27 mg/L | 0.039 | 0.32% |

=====
Sequence No.: 3
Sample ID: BS2
Analyst:
Initial Sample Wt:
Dilution: 10X
Autosampler Location: 27
Date Collected: 3/8/2016 5:08:29 PM
Data Type: Original
Initial Sample Vol:
Sample Prep Vol:-----
Replicate Data: BS2

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Be 313.107 | 4612646.3 | 4619033.4 | 1.381 mg/L | 13.81 mg/L | 17:09:43 |
| 2 | Be 313.107 | 4610206.9 | 4616594.0 | 1.380 mg/L | 13.80 mg/L | 17:09:59 |
| 3 | Be 313.107 | 4630322.0 | 4636709.1 | 1.386 mg/L | 13.86 mg/L | 17:10:16 |

Mean Data: BS2

Method: Nawarat-Be-080316 Page 2 Date: 3/8/2016 5:19:34 PM

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Be 313.107 | 4624112.2 | 1.383 mg/L | 0.0033 | 13.83 mg/L | 0.033 | 0.24% |

Sequence No.: 4
 Sample ID: BS5
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 10X

Autosampler Location: 28
 Date Collected: 3/8/2016 5:11:36 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS5

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Be 313.107 | 4254499.9 | 4260887.0 | 1.274 mg/L | 12.74 mg/L | 17:12:52 |
| 2 | Be 313.107 | 4243054.0 | 4249441.1 | 1.271 mg/L | 12.71 mg/L | 17:13:12 |
| 3 | Be 313.107 | 4262708.2 | 4269095.3 | 1.276 mg/L | 12.76 mg/L | 17:13:31 |

Mean Data: BS5

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Be 313.107 | 4259807.8 | 1.274 mg/L | 0.0030 | 12.74 mg/L | 0.030 | 0.23% |

Sequence No.: 5
 Sample ID: BS10
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 10X

Autosampler Location: 29
 Date Collected: 3/8/2016 5:14:50 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS10

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Be 313.107 | 4398076.6 | 4404463.7 | 1.317 mg/L | 13.17 mg/L | 17:16:06 |
| 2 | Be 313.107 | 4367168.6 | 4373555.7 | 1.308 mg/L | 13.08 mg/L | 17:16:26 |
| 3 | Be 313.107 | 4372722.5 | 4379109.6 | 1.309 mg/L | 13.09 mg/L | 17:16:45 |

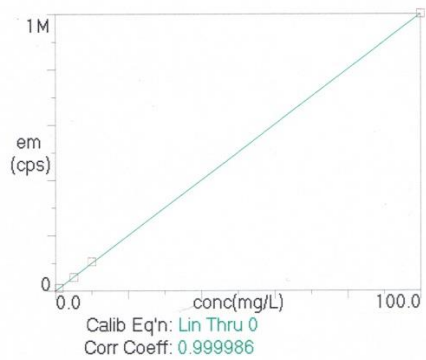
Mean Data: BS10

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Be 313.107 | 4385709.7 | 1.311 mg/L | 0.0049 | 13.11 mg/L | 0.049 | 0.38% |

Calib

Method: Nawarat-Sn-230216
Result: Nawarat-Sn-std-230216

Sn 189.927



1

=====
Analysis Begun

Start Time: 2/23/2016 2:01:28 PM Plasma On Time: 2/23/2016 1:16:49 PM
 Logged In Analyst: Dentistry CU Technique: ICP Continuous
 Spectrometer Model: Optima 7300 DV, S/N No Serial #Autosampler Model: S10

Sample Information File: C:\pe\Dentistry CU\Sample Information\Nawarat-230216\Sn-BS1-2-5-10-AgCuSn.sif
 Batch ID:
 Results Data Set: Nawarat-Sn-sample-230216
 Results Library: C:\pe\Dentistry CU\Results\Results.mdb

=====
 Sequence No.: 1 Autosampler Location: 13
 Sample ID: reagent blank Date Collected: 2/23/2016 2:01:28 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: Sample Prep Vol:

Replicate Data: reagent blank

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 1302.7 | 1276.1 | 0.120 mg/L | 0.120 mg/L | 14:02:52 |
| 2 | Sn 189.927 | 1193.9 | 1167.3 | 0.110 mg/L | 0.110 mg/L | 14:03:08 |
| 3 | Sn 189.927 | 1138.4 | 1111.8 | 0.105 mg/L | 0.105 mg/L | 14:03:23 |

Mean Data: reagent blank

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 1185.1 | 0.111 mg/L | 0.0079 | 0.111 mg/L | 0.0079 | 7.05% |

=====
 Sequence No.: 2 Autosampler Location: 14
 Sample ID: BS1 Date Collected: 2/23/2016 2:04:33 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS1

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 87359.8 | 87333.2 | 8.098 mg/L | 8.098 mg/L | 14:05:58 |
| 2 | Sn 189.927 | 86958.8 | 86932.2 | 8.060 mg/L | 8.060 mg/L | 14:06:20 |
| 3 | Sn 189.927 | 86351.3 | 86324.7 | 8.003 mg/L | 8.003 mg/L | 14:06:43 |

Mean Data: BS1

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 86863.4 | 8.054 mg/L | 0.0477 | 8.054 mg/L | 0.0477 | 0.59% |

=====
 Sequence No.: 3 Autosampler Location: 15
 Sample ID: BS2 Date Collected: 2/23/2016 2:07:56 PM
 Analyst: Data Type: Original
 Initial Sample Wt: Initial Sample Vol:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS2

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 145619.2 | 145592.6 | 13.57 mg/L | 13.57 mg/L | 14:09:21 |
| 2 | Sn 189.927 | 146919.0 | 146892.4 | 13.70 mg/L | 13.70 mg/L | 14:09:44 |
| 3 | Sn 189.927 | 143617.6 | 143591.0 | 13.39 mg/L | 13.39 mg/L | 14:10:06 |

Mean Data: BS2

Method: Nawarat-Sn-230216 Page 2 Date: 2/23/2016 2:20:51 PM

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 145358.6 | 13.55 mg/L | 0.156 | 13.55 mg/L | 0.156 | 1.15% |

Sequence No.: 4
 Sample ID: BS5
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 16
 Date Collected: 2/23/2016 2:11:19 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS5

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 216406.5 | 216379.9 | 20.23 mg/L | 20.23 mg/L | 14:12:44 |
| 2 | Sn 189.927 | 215485.3 | 215458.7 | 20.14 mg/L | 20.14 mg/L | 14:13:07 |
| 3 | Sn 189.927 | 212019.5 | 211992.9 | 19.82 mg/L | 19.82 mg/L | 14:13:29 |

Mean Data: BS5

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 214610.5 | 20.06 mg/L | 0.217 | 20.06 mg/L | 0.217 | 1.08% |

Sequence No.: 5
 Sample ID: BS10
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 17
 Date Collected: 2/23/2016 2:14:42 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS10

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 219857.0 | 219830.4 | 20.55 mg/L | 20.55 mg/L | 14:16:09 |
| 2 | Sn 189.927 | 216436.4 | 216409.7 | 20.23 mg/L | 20.23 mg/L | 14:16:32 |
| 3 | Sn 189.927 | 217838.2 | 217811.6 | 20.36 mg/L | 20.36 mg/L | 14:16:56 |

Mean Data: BS10

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 218017.2 | 20.38 mg/L | 0.162 | 20.38 mg/L | 0.162 | 0.79% |

Sequence No.: 6
 Sample ID: AgCuSn
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X

Autosampler Location: 18
 Date Collected: 2/23/2016 2:18:10 PM
 Data Type: Original
 Initial Sample Vol:
 Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCuSn

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Sn 189.927 | 124036.3 | 124009.7 | 11.55 mg/L | 11.55 mg/L | 14:19:34 |
| 2 | Sn 189.927 | 125687.9 | 125661.3 | 11.70 mg/L | 11.70 mg/L | 14:19:55 |
| 3 | Sn 189.927 | 122307.8 | 122281.2 | 11.38 mg/L | 11.38 mg/L | 14:20:16 |

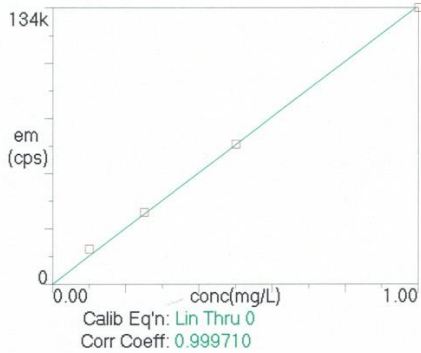
Mean Data: AgCuSn

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Sn 189.927 | 123984.1 | 11.54 mg/L | 0.159 | 11.54 mg/L | 0.159 | 1.38% |

Calib

Method: Nawarat-AI-010316
Result: Nawarat-AI-std-010316

AI 396.153



1

Method: Nawarat-Al-010316

Page 1

Date: 3/1/2016 2:13:02 PM

=====
Analysis Begun

Start Time: 3/1/2016 2:03:53 PM Plasma On Time: 3/1/2016 1:24:50 PM
 Logged In Analyst: Dentistry CU Technique: ICP Continuous
 Spectrometer Model: Optima 7300 DV, S/N No Serial #Autosampler Model: S10

Sample Information File: C:\pe\Dentistry CU\Sample Information\Nawarat-230216\Al2.sif
 Batch ID:
 Results Data Set: Nawarat-Al-sample-010316
 Results Library: C:\pe\Dentistry CU\Results\Results.mdb

Sequence No.: 1 Autosampler Location: 13
 Sample ID: reagent blank Date Collected: 3/1/2016 2:03:53 PM
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: Sample Prep Vol:

Replicate Data: reagent blank

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Al 396.153 | 9820.4 | 9638.3 | 0.071 mg/L | 0.071 mg/L | 14:05:09 |
| 2 | Al 396.153 | 6961.2 | 6779.0 | 0.050 mg/L | 0.050 mg/L | 14:05:21 |
| 3 | Al 396.153 | 5663.4 | 5481.2 | 0.041 mg/L | 0.041 mg/L | 14:05:34 |

Mean Data: reagent blank

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------|
| Al 396.153 | 7299.5 | 0.054 mg/L | 0.0157 | 0.054 mg/L | 0.0157 | 29.14% |

Sequence No.: 2 Autosampler Location: 42
 Sample ID: AgCuAl Date Collected: 3/1/2016 2:06:49 PM
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: AgCuAl

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Al 396.153 | 2079916.2 | 2079734.0 | 15.34 mg/L | 15.34 mg/L | 14:08:10 |
| 2 | Al 396.153 | 2064362.4 | 2064180.2 | 15.23 mg/L | 15.23 mg/L | 14:08:30 |
| 3 | Al 396.153 | 2063240.0 | 2063057.9 | 15.22 mg/L | 15.22 mg/L | 14:08:50 |

Mean Data: AgCuAl

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Std.Dev. | Sample Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Al 396.153 | 2068990.7 | 15.26 mg/L | 0.069 | 15.26 mg/L | 0.069 | 0.45% |

Sequence No.: 3 Autosampler Location: 43
 Sample ID: BS10 Date Collected: 3/1/2016 2:10:07 PM
 Analyst:
 Initial Sample Wt:
 Dilution: 1X Sample Prep Vol:

Replicate Data: BS10

| Repl# | Analyte | Net Intensity | Corrected Intensity | Calib. Conc. Units | Sample Conc. Units | Analysis Time |
|-------|------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Al 396.153 | 1997631.4 | 1997449.3 | 14.73 mg/L | 14.73 mg/L | 14:11:29 |
| 2 | Al 396.153 | 2044718.0 | 2044535.9 | 15.08 mg/L | 15.08 mg/L | 14:11:51 |
| 3 | Al 396.153 | 2048263.8 | 2048081.7 | 15.11 mg/L | 15.11 mg/L | 14:12:12 |

Mean Data: BS10

Method: Nawarat-Al-010316

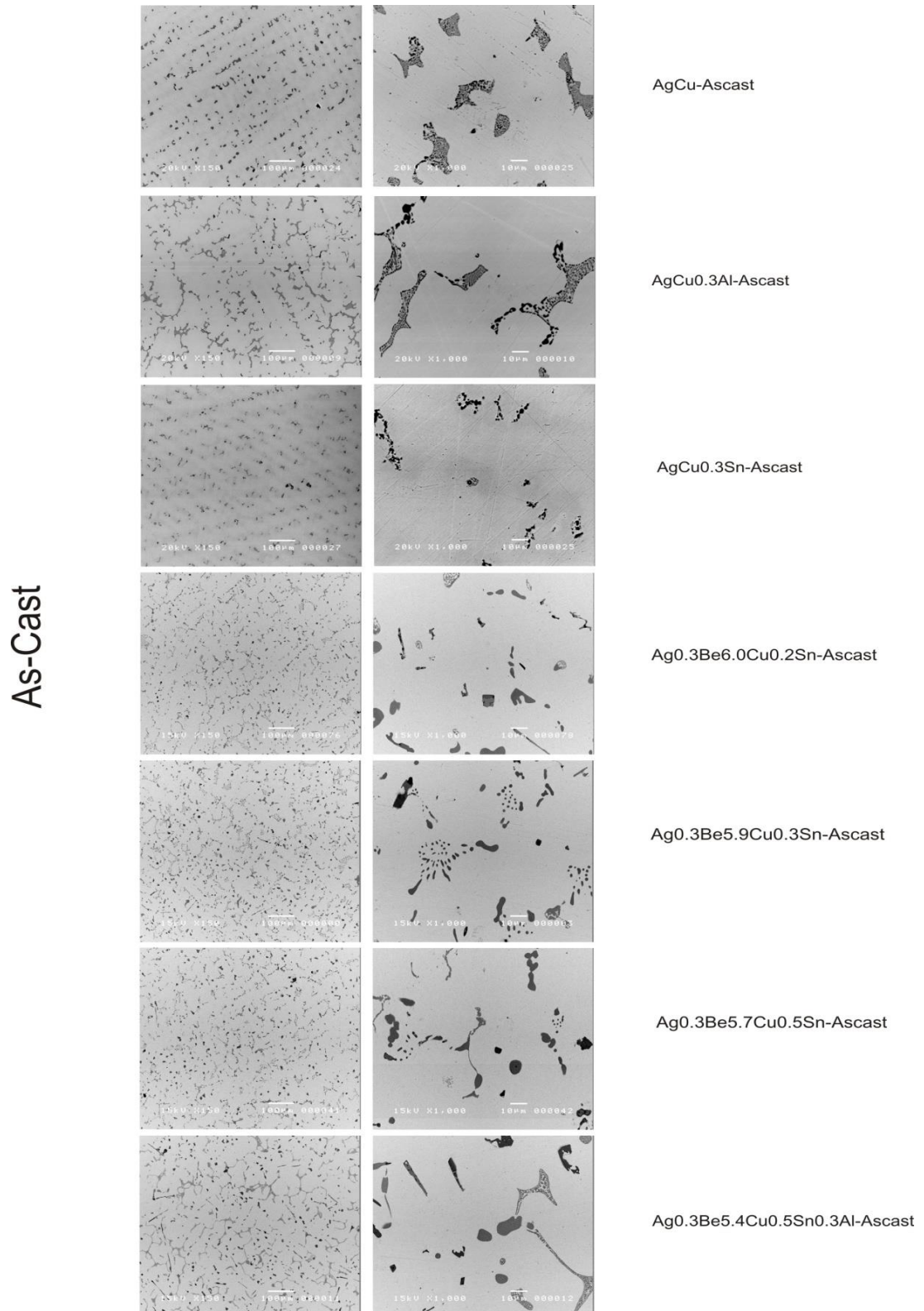
Page 2

Date: 3/1/2016 2:13:02 PM

| Analyte | Mean Corrected Intensity | Conc. Units | Calib. Units | Std.Dev. | Conc. Units | Std.Dev. | RSD |
|------------|--------------------------|-------------|--------------|----------|-------------|----------|-------------|
| Al 396.153 | 2030022.3 | 14.98 | mg/L | 0.209 | 14.98 | mg/L | 0.209 1.40% |

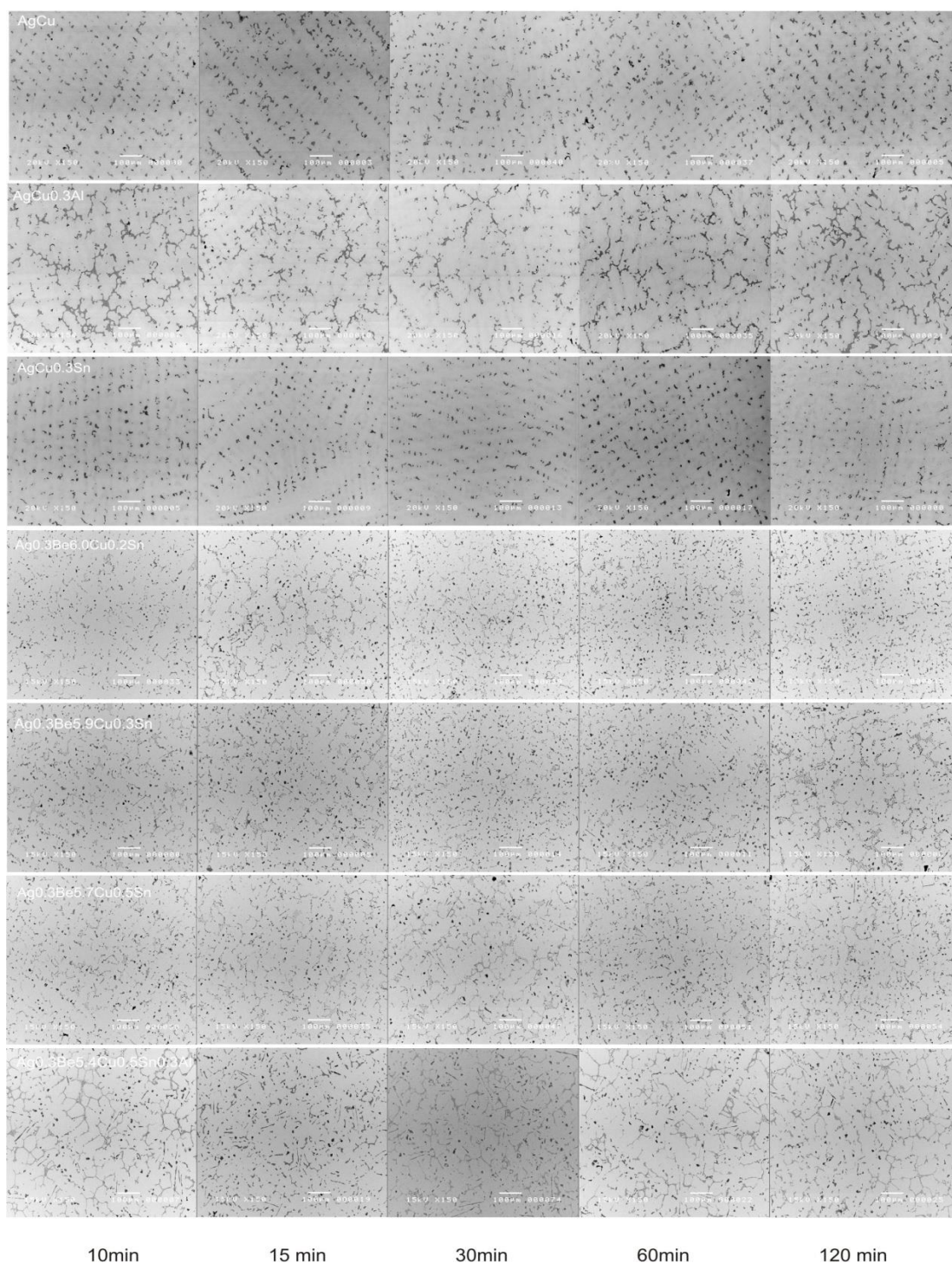


ภาพที่ ค1. โครงสร้างจุลภาคสภาพหลังหล่อ (As-cast) ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะเงินสเตอร์ลิง



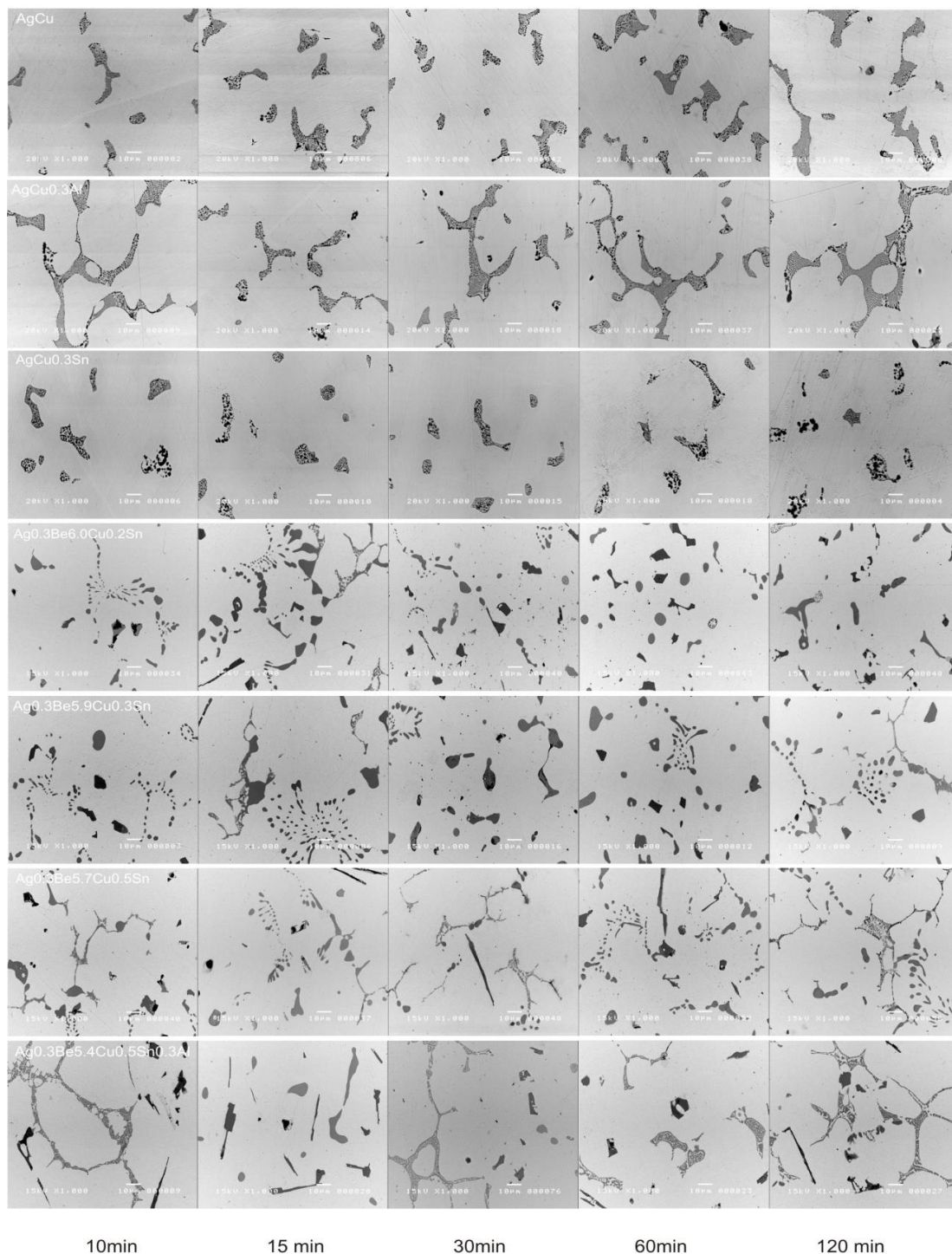
ภาพที่ ค2. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 150 เท่า

Age 350 °C-150x



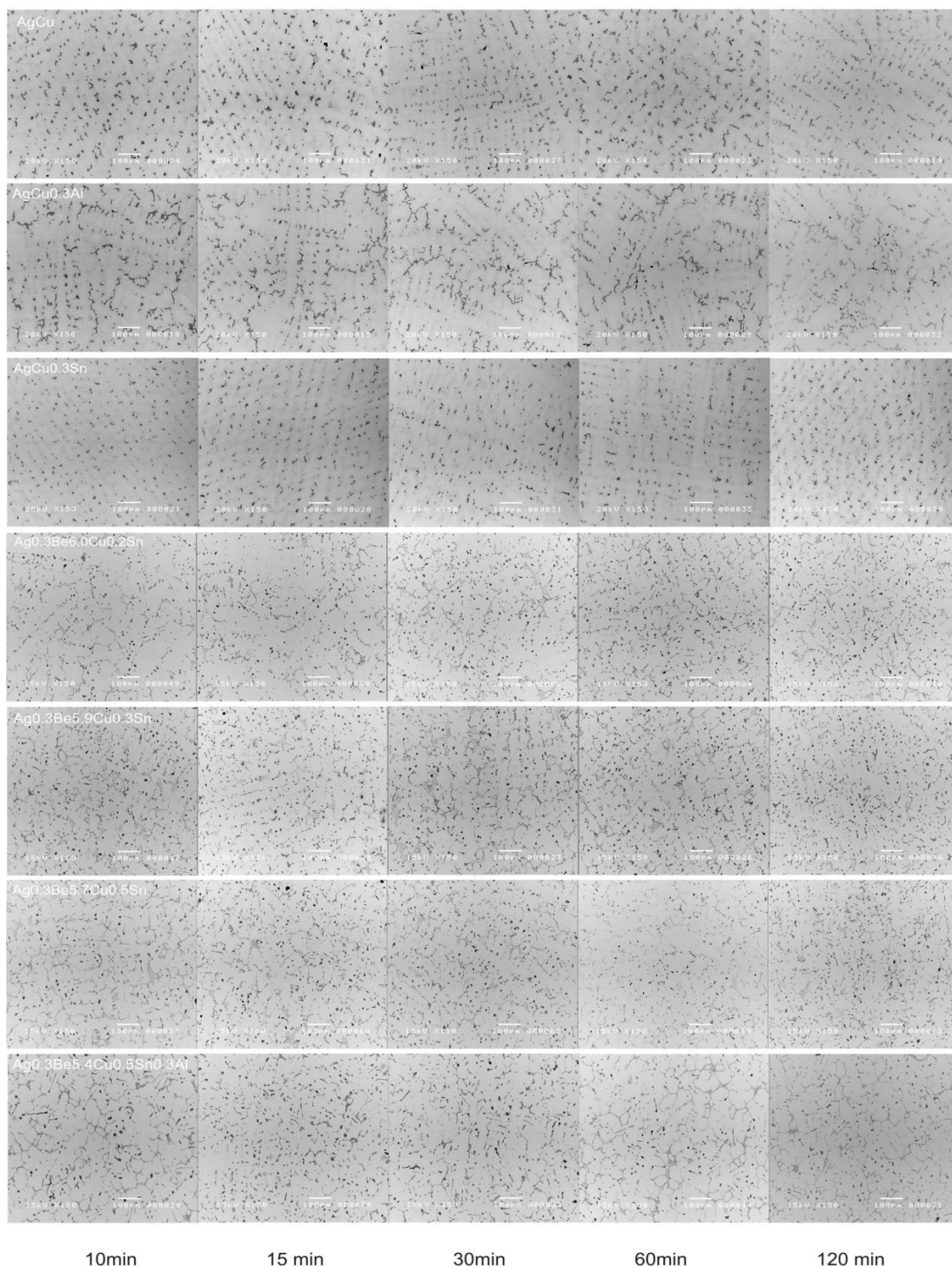
ภาพที่ ค3. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

Age 350 °C-1000x



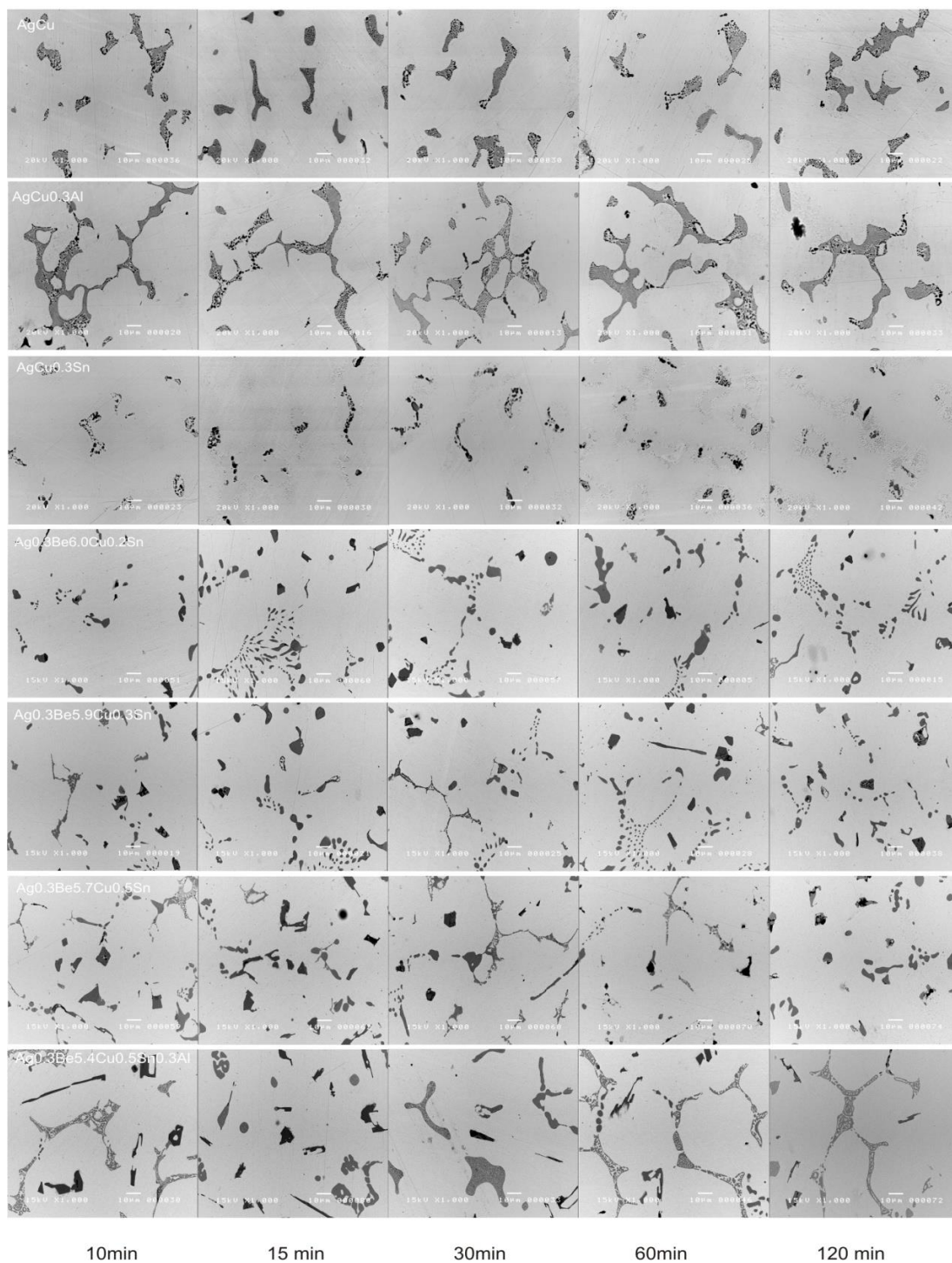
ภาพที่ ค4. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 150 เท่า

Age 400 °C-150x

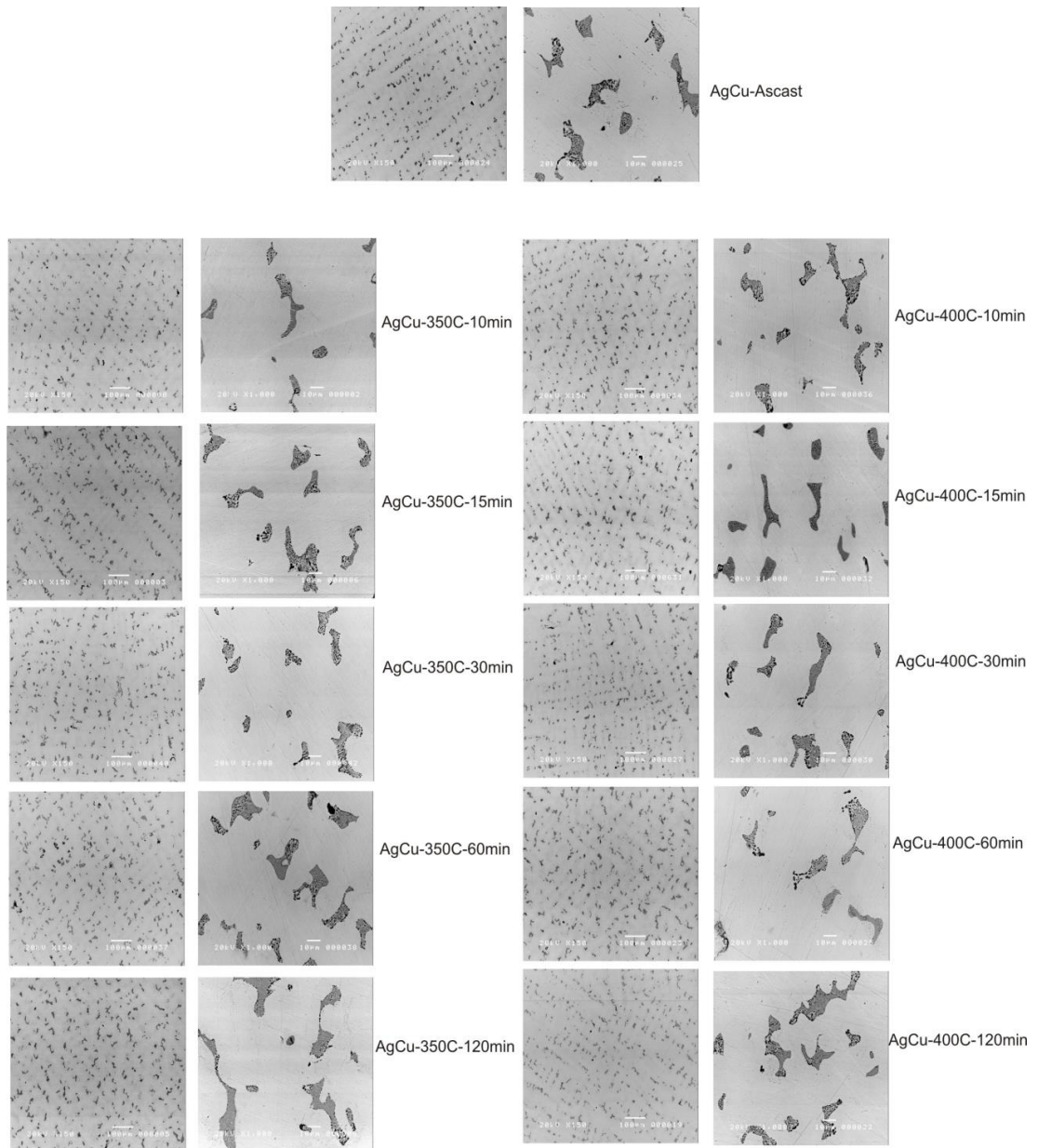


ภาพที่ ค5. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทั้ง 7 ชุดโลหะผสม : หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

Age 400 °C-1000x

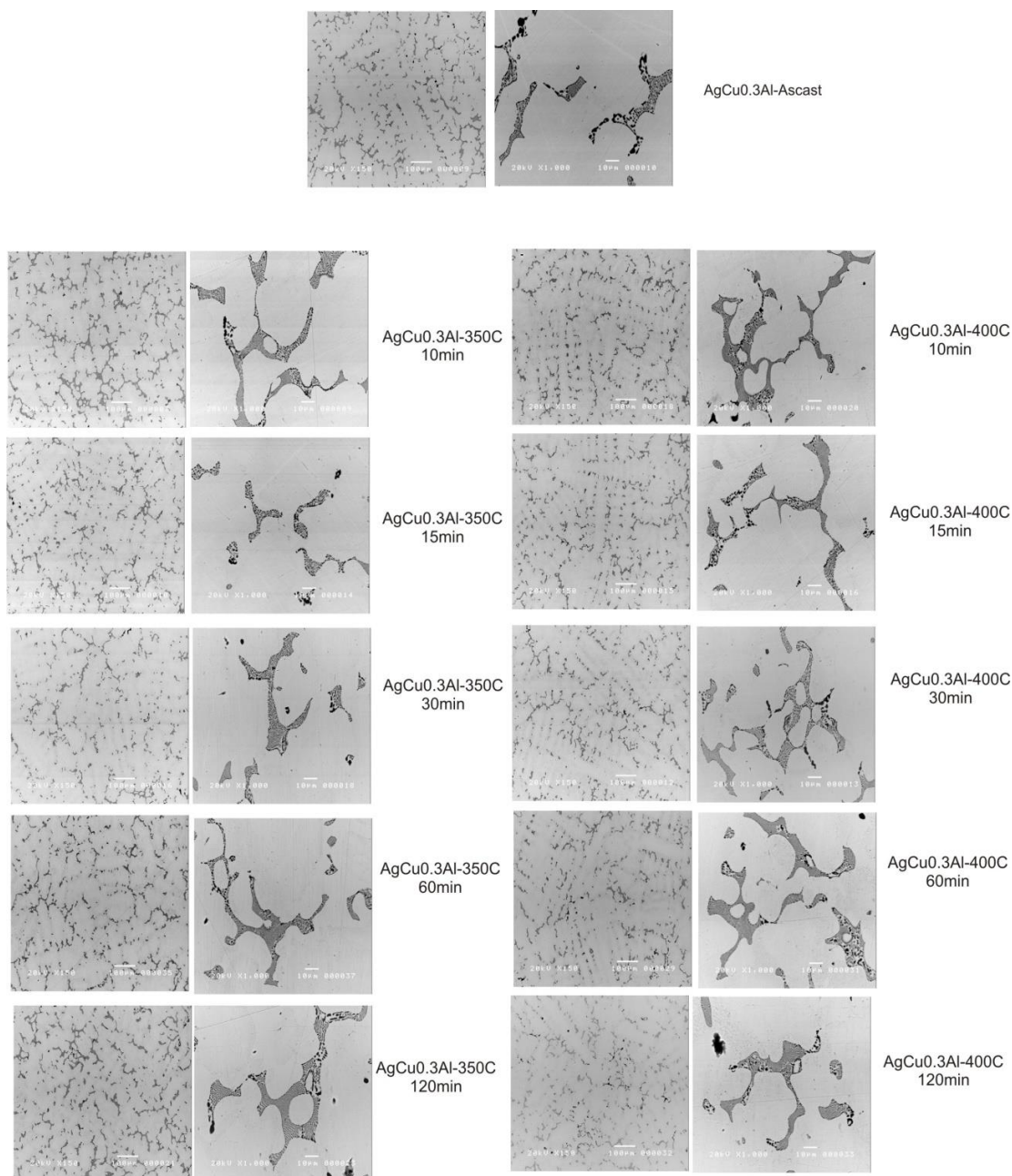


ภาพที่ ค6. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) - ชุดโลหะผสม AgCu : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



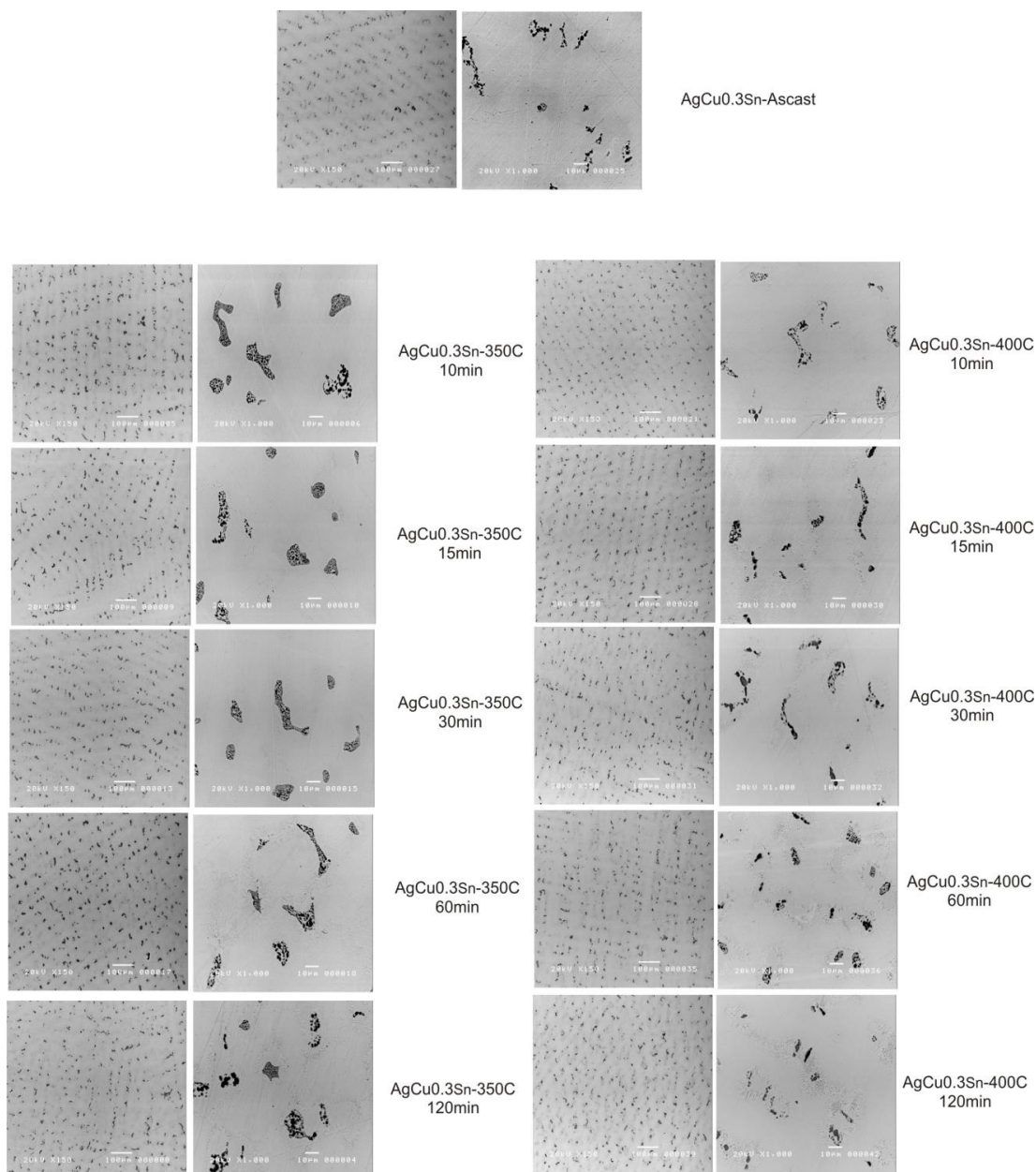
Ag-Cu-Ref.

ภาพที่ ค7. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) - ชุคโลหะผสม AgCu0.3Al : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



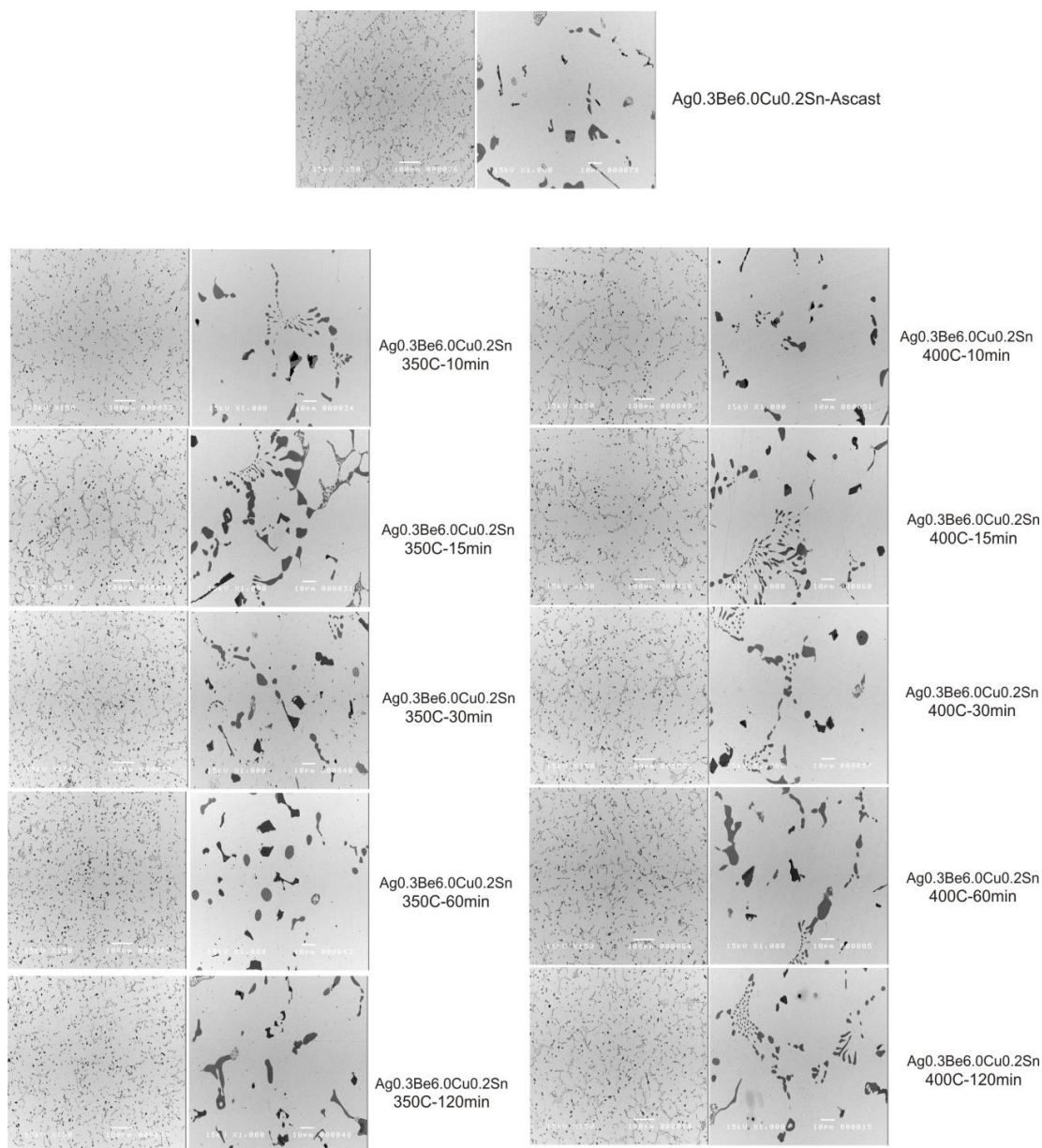
Ag-Cu-0.3Al-Ref.

ภาพที่ ค8. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) - ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



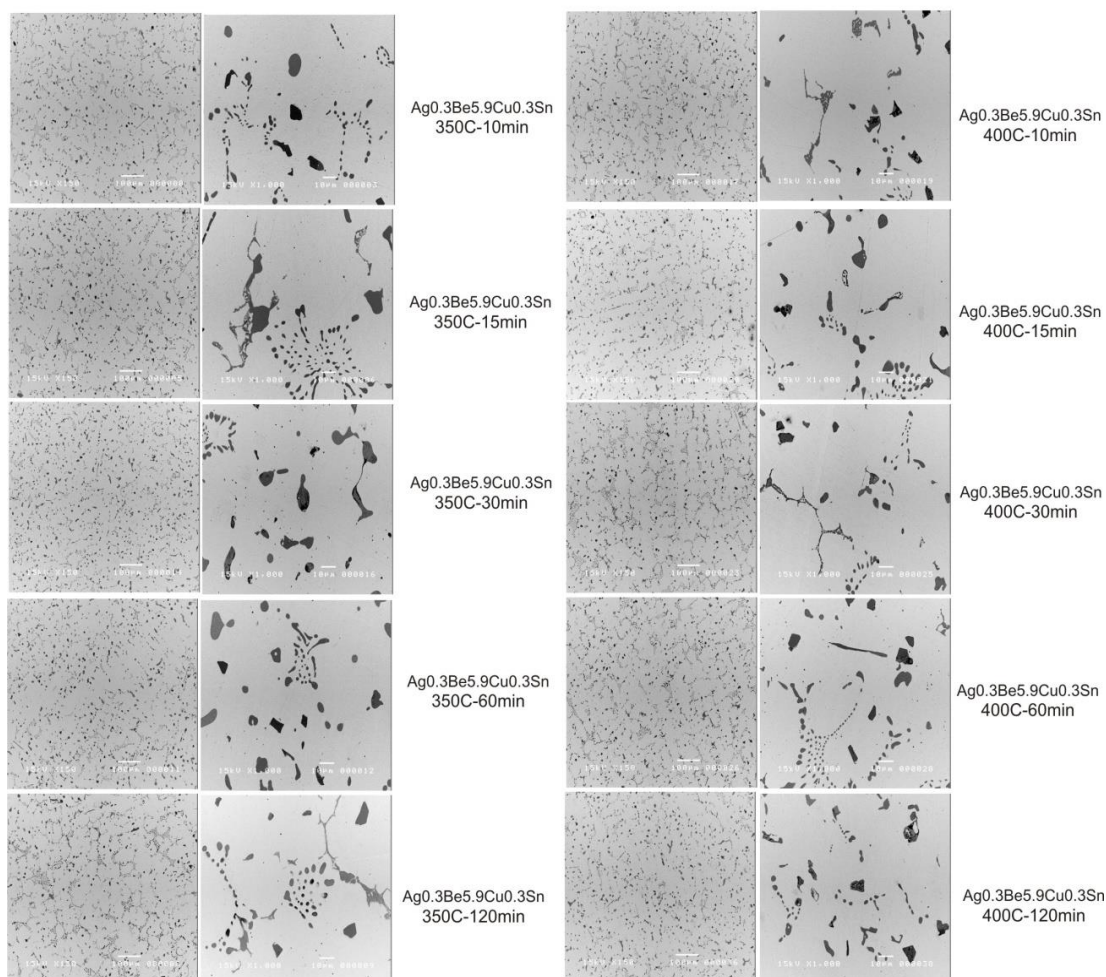
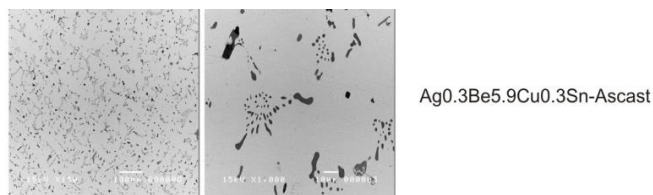
Ag-Cu-0.3Sn-Ref.

ภาพที่ ค9. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) – ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



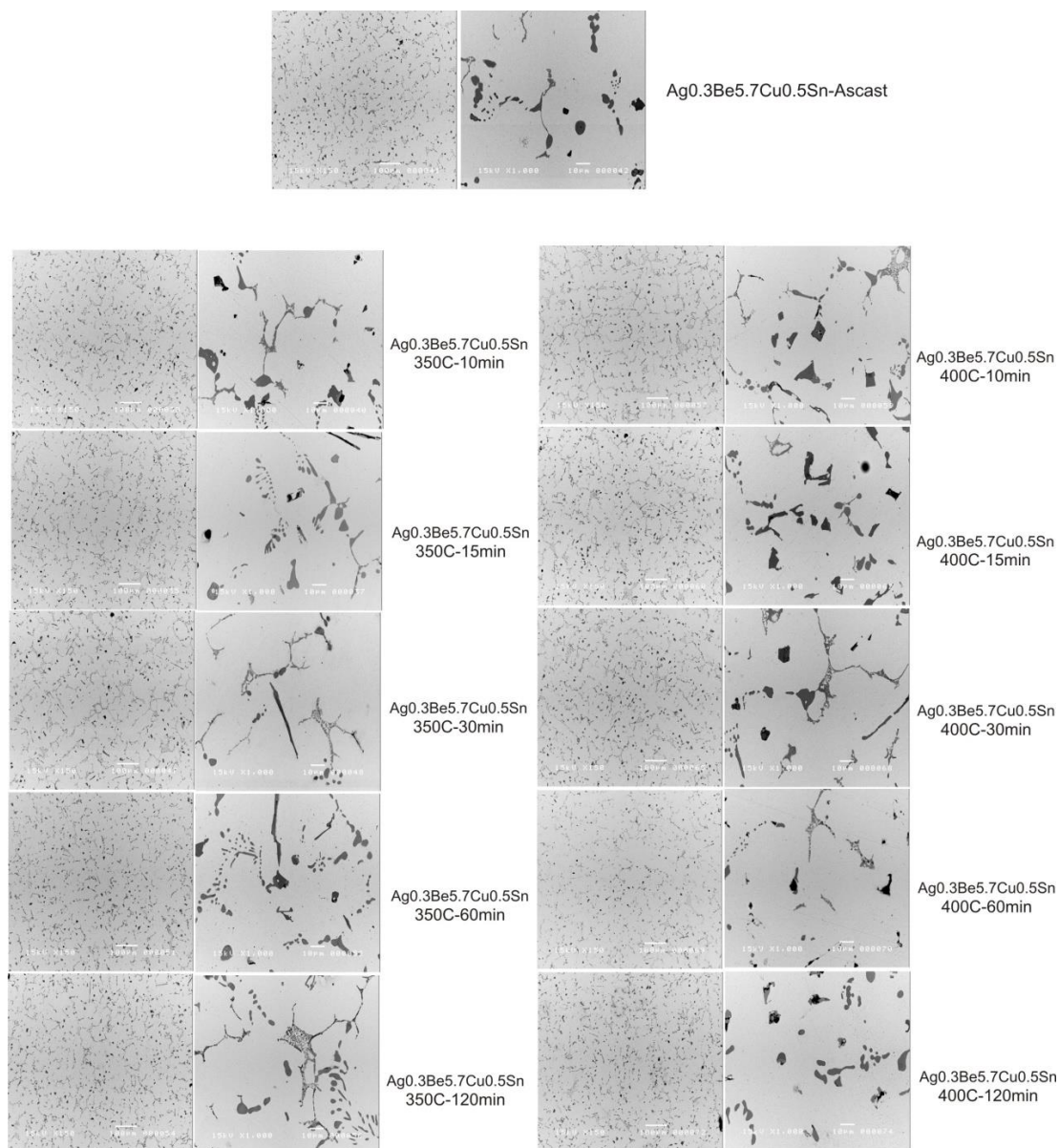
Ag-0.3Be-6.0Cu-0.2Sn

ภาพที่ ค10. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) – ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn : สภาพดั้งหล่อ (As-cast) และหลังจากกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



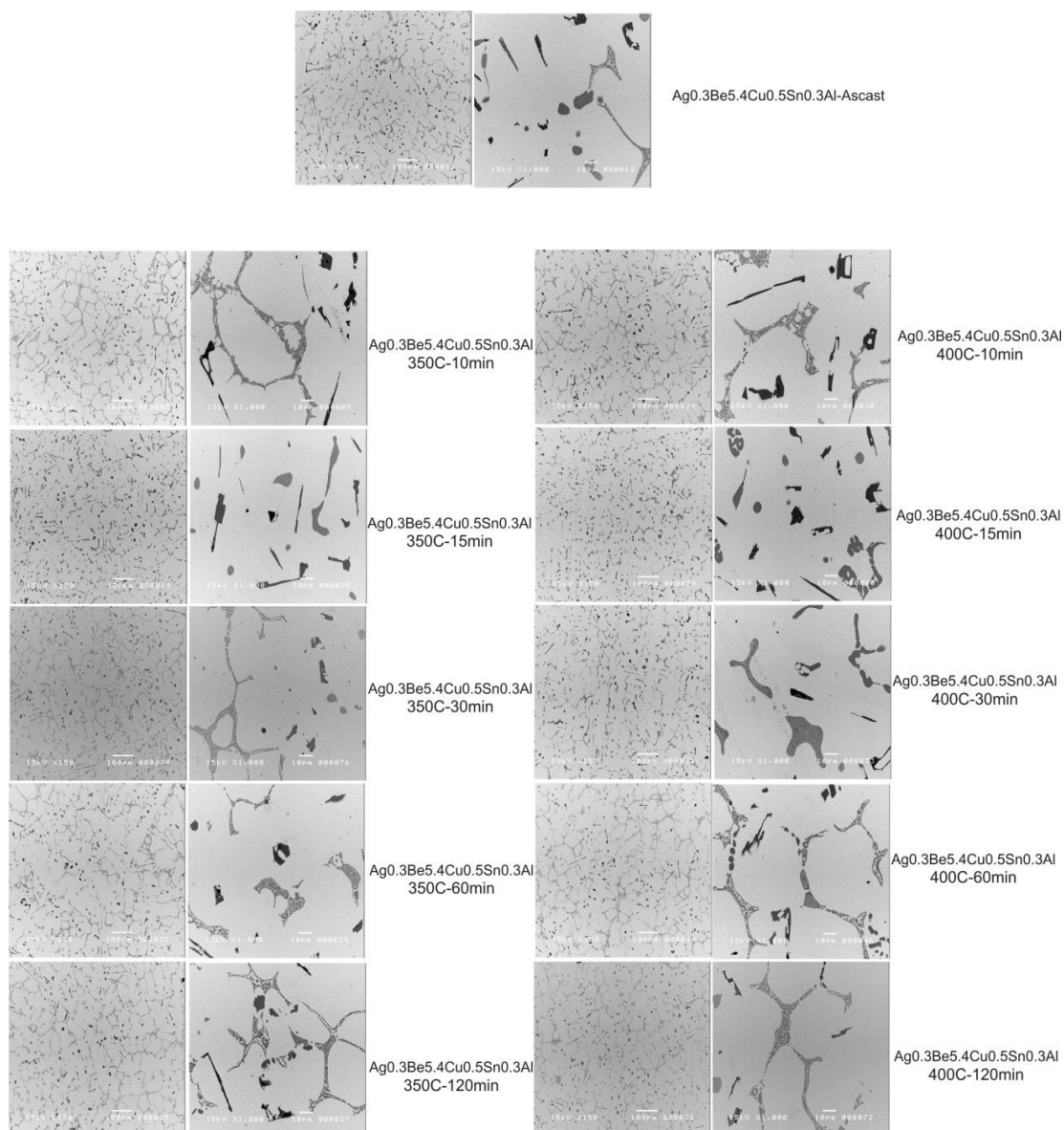
Ag-0.3Be-5.9Cu-0.3Sn

ภาพที่ ค11. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) – ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



Ag-0.3Be-5.7Cu-0.5Sn

ภาพที่ ค12. โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) – ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al : สภาพหลังหล่อ (As-cast) และหลังผ่านกระบวนการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400 °C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้ กำลังขยาย 150 เท่า(ซ้าย), 1000 เท่า(ขวา)



Ag-0.3Be-5.4Cu-0.5Sn-0.3Al

ข้อมูลของปริมาณธาตุบริเวณต่างๆ ที่เกิดในโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด ซึ่งทำการวิเคราะห์จากเทคนิคและเครื่องมือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

ตารางที่ ค1. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|--------------------------|----------------------|-------|----|----|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu - ascast | | | | | |
| Overall | 93.72 | 6.28 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.01 | 5.99 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.82 | 25.18 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu – age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 94.41 | 5.59 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.56 | 5.44 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 88.95 | 11.05 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 6.76 | 93.24 | - | - | - |
| AgCu – age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.54 | 5.46 | - | - | - |
| Matrix (White) | 95.22 | 4.78 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.05 | 25.95 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 9.64 | 90.36 | - | - | - |
| AgCu – age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.72 | 7.28 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.38 | 5.62 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 69.62 | 30.38 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 17.63 | 82.37 | - | - | - |
| AgCu – age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 93.74 | 6.26 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.82 | 5.18 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.89 | 33.11 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 28.60 | 71.40 | - | - | - |
| AgCu – age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 94.01 | 5.99 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.77 | 5.23 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 17.51 | 82.49 | - | - | - |
| AgCu – age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 93.42 | 6.58 | - | - | - |
| Matrix (White) | 93.15 | 6.85 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 71.86 | 28.14 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 10.14 | 89.86 | - | - | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|--------------------------|----------------------|-------|----|----|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu – age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 93.92 | 6.08 | - | - | - |
| Matrix (White) | 94.50 | 5.50 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 68.81 | 31.19 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu – age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 93.94 | 6.06 | - | - | - |
| Matrix (White) | 95.89 | 4.11 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 76.78 | 23.22 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 22.84 | 77.16 | - | - | - |
| AgCu – age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 93.99 | 6.01 | - | - | - |
| Matrix (White) | 95.92 | 4.08 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.56 | 25.44 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 24.78 | 75.22 | - | - | - |
| AgCu – age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 93.50 | 6.50 | - | - | - |
| Matrix (White) | 95.04 | 4.96 | - | - | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.07 | 33.93 | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 19.64 | 80.36 | - | - | - |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu0.3Al

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|----|----|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Al - ascast | | | | | |
| Overall | 93.10 | 6.52 | - | - | 0.37 |
| Matrix (White) | 96.67 | 3.16 | - | - | 0.17 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 8.81 | 86.23 | - | - | 4.96 |
| AgCu0.3Al – age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 93.54 | 6.06 | - | - | 0.40 |
| Matrix (White) | 93.88 | 5.84 | - | - | 0.29 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 75.01 | 23.64 | - | - | 1.34 |
| Beta phase (Black) | 19.86 | 75.70 | - | - | 4.44 |
| AgCu0.3Al – age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.90 | 4.78 | - | - | 0.32 |
| Matrix (White) | 96.48 | 3.38 | - | - | 0.14 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 79.73 | 19.70 | - | - | 0.57 |
| Beta phase (Black) | 12.78 | 86.62 | - | - | 0.60 |
| AgCu0.3Al – age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 94.87 | 4.93 | - | - | 0.20 |
| Matrix (White) | 97.06 | 2.68 | - | - | 0.27 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.87 | 30.70 | - | - | 2.43 |
| Beta phase (Black) | 14.49 | 84.35 | - | - | 1.16 |
| AgCu0.3Al – age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 94.85 | 4.81 | - | - | 0.34 |
| Matrix (White) | 96.25 | 3.59 | - | - | 0.16 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 75.49 | 23.18 | - | - | 1.33 |
| Beta phase (Black) | 32.09 | 64.04 | - | - | 3.87 |
| AgCu0.3Al – age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 93.10 | 6.67 | - | - | 0.24 |
| Matrix (White) | 95.25 | 4.48 | - | - | 0.27 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | - | - | - |
| Beta phase (Black) | 8.44 | 86.53 | - | - | 5.03 |
| AgCu0.3Al – age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 94.51 | 5.20 | - | - | 0.29 |
| Matrix (White) | 96.59 | 3.15 | - | - | 0.26 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 70.79 | 27.88 | - | - | 1.33 |
| Beta phase (Black) | 22.77 | 76.32 | - | - | 0.91 |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|----|----|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Al – age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.31 | 5.40 | - | - | 0.29 |
| Matrix (White) | 96.16 | 3.70 | - | - | 0.14 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 69.58 | 28.72 | - | - | 1.69 |
| Beta phase (Black) | 14.72 | 80.40 | - | - | 4.88 |
| AgCu0.3Al – age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 95.09 | 4.65 | - | - | 0.26 |
| Matrix (White) | 97.21 | 2.63 | - | - | 0.16 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.19 | 24.47 | - | - | 1.34 |
| Beta phase (Black) | 18.05 | 77.24 | - | - | 4.71 |
| AgCu0.3Al – age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 94.44 | 5.23 | - | - | 0.32 |
| Matrix (White) | 96.28 | 3.52 | - | - | 0.20 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.12 | 24.49 | - | - | 1.39 |
| Beta phase (Black) | 43.46 | 54.53 | - | - | 2.01 |
| AgCu0.3Al – age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 94.70 | 5.00 | - | - | 0.30 |
| Matrix (White) | 96.25 | 3.60 | - | - | 0.15 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 79.45 | 19.85 | - | - | 0.70 |
| Beta phase (Black) | 14.54 | 80.47 | - | - | 4.99 |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค3. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|-----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Sn - ascast | | | | | |
| Overall | 94.72 | 4.77 | - | 0.51 | - |
| Matrix (White) | 95.47 | 3.86 | - | 0.67 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 78.55 | 21.45 | N/A | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 5.28 | 94.15 | - | 0.57 | - |
| AgCu0.3Sn – age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 94.11 | 5.77 | - | 0.13 | - |
| Matrix (White) | 94.12 | 5.56 | - | 0.32 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 71.65 | 28.10 | - | 0.25 | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu0.3Sn – age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 93.93 | 5.71 | - | 0.36 | - |
| Matrix (White) | 95.00 | 5.00 | - | N/A | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 53.13 | 46.84 | - | 0.03 | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu0.3Sn – age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 94.77 | 5.15 | - | 0.08 | - |
| Matrix (White) | 94.77 | 5.23 | - | N/A | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 83.34 | 16.30 | - | 0.37 | - |
| Beta phase (Black) | 17.49 | 82.46 | - | 0.05 | - |
| AgCu0.3Sn – age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 93.81 | 6.19 | - | N/A | - |
| Matrix (White) | 95.27 | 4.73 | - | N/A | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 62.75 | 36.64 | - | 0.61 | - |
| Beta phase (Black) | - | - | - | - | - |
| AgCu0.3Sn – age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 94.42 | 5.11 | - | 0.47 | - |
| Matrix (White) | 94.43 | 5.40 | - | 0.16 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 81.98 | 17.60 | - | 0.42 | - |
| Beta phase (Black) | 8.66 | 90.99 | - | 0.35 | - |
| AgCu0.3Sn – age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 95.11 | 4.52 | - | 0.36 | - |
| Matrix (White) | 94.86 | 4.53 | - | 0.61 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 80.34 | 19.56 | - | 0.10 | - |
| Beta phase (Black) | 4.59 | 95.06 | - | 4.59 | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Sn – age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.24 | 5.76 | - | N/A | - |
| Matrix (White) | 93.96 | 5.69 | - | 0.35 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 73.69 | 25.86 | - | 0.44 | - |
| Beta phase (Black) | 44.92 | 55.02 | - | 0.06 | - |
| AgCu0.3Sn – age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 93.98 | 5.27 | - | 0.75 | - |
| Matrix (White) | 95.16 | 4.36 | - | 0.48 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 86.01 | 13.59 | - | 0.39 | - |
| Beta phase (Black) | 18.11 | 81.38 | - | 0.51 | - |
| AgCu0.3Sn – age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 94.23 | 5.43 | - | 0.34 | - |
| Matrix (White) | 94.11 | 5.45 | - | 0.44 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 84.77 | 15.12 | - | 0.41 | - |
| Beta phase (Black) | 15.30 | 84.18 | - | 0.52 | - |
| AgCu0.3Sn – age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 95.23 | 4.25 | - | 0.52 | - |
| Matrix (White) | 95.05 | 4.45 | - | 0.50 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 78.90 | 20.59 | - | 0.51 | - |
| Beta phase (Black) | 9.15 | 90.30 | - | 0.55 | - |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค4.ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.2Sn

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.2Sn – ascast | | | | | |
| Overall | 93.59 | 5.87 | ND | 0.54 | - |
| Matrix (White) | 96.20 | 3.51 | ND | 0.29 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 36.27 | 63.73 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 3.07 | 96.93 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn – age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 94.61 | 5.07 | ND | 0.32 | - |
| Matrix (White) | 97.08 | 2.62 | ND | 0.30 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 75.22 | 24.78 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 20.09 | 79.91 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 0.97 | 99.03 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn – age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 92.36 | 7.08 | ND | 0.56 | - |
| Matrix (White) | 95.09 | 4.34 | ND | 0.57 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 4.01 | 95.99 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.49 | 98.51 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn – age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.77 | 6.65 | ND | 0.58 | - |
| Matrix (White) | 96.47 | 2.87 | ND | 0.66 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 59.37 | 40.63 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 4.16 | 95.84 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.58 | 98.42 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn – age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.85 | 6.67 | ND | 0.48 | - |
| Matrix (White) | 94.07 | 5.30 | ND | 0.63 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 63.46 | 35.73 | ND | 0.81 | - |
| Beta phase (Black) | 4.16 | 95.84 | ND | N/A | - |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn – age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.18 | 6.87 | ND | 0.95 | - |
| Matrix (White) | 96.74 | 2.66 | ND | 0.60 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 4.77 | 95.19 | ND | - | - |
| Grey phase | 2.13 | 97.87 | ND | N/A | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.2Sn- age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 94.65 | 4.96 | ND | 0.39 | - |
| Matrix (White) | 95.37 | 4.06 | ND | 0.57 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 5.44 | 94.56 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.07 | 98.93 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn- age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.68 | 4.67 | ND | 0.65 | - |
| Matrix (White) | 93.98 | 5.47 | ND | 0.55 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 9.12 | 90.88 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 3.85 | 96.15 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn- age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.07 | 7.23 | ND | 0.70 | - |
| Matrix (White) | 91.06 | 8.29 | ND | 0.65 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 3.65 | 96.33 | ND | 0.02 | - |
| Grey phase | 1.54 | 98.46 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn - age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.93 | 6.80 | ND | 0.27 | - |
| Matrix (White) | 95.07 | 4.47 | ND | 0.46 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 81.94 | 17.90 | ND | 0.16 | - |
| Beta phase (Black) | 18.90 | 81.08 | ND | 0.02 | - |
| Grey phase | 3.29 | 96.71 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.2Sn- age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.48 | 7.52 | ND | N/A | - |
| Matrix (White) | 95.25 | 4.66 | ND | 0.09 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 73.17 | 26.72 | ND | 0.11 | - |
| Beta phase (Black) | 1.88 | 98.02 | ND | 0.10 | - |
| Grey phase | 1.80 | 98.20 | ND | N/A | - |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจสอบไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค5.ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.3Sn

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.3Sn – ascast | | | | | |
| Overall | 92.34 | 7.32 | ND | 0.34 | - |
| Matrix (White) | 95.68 | 3.94 | ND | 0.38 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 86.72 | 13.28 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 8.54 | 91.46 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 2.04 | 97.82 | ND | 0.14 | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn– age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 92.57 | 7.19 | ND | 0.24 | - |
| Matrix (White) | 92.75 | 7.25 | ND | N/A | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 80.76 | 18.93 | ND | 0.31 | - |
| Beta phase (Black) | 77.03 | 20.68 | ND | 2.29 | - |
| Grey phase | 2.00 | 98.00 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn– age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 92.53 | 7.09 | ND | 0.38 | - |
| Matrix (White) | 95.85 | 3.66 | ND | 0.49 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 4.07 | 95.93 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 19.44 | 80.56 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn– age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 93.59 | 6.26 | ND | 0.15 | - |
| Matrix (White) | 95.28 | 4.20 | ND | 0.52 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 6.77 | 93.23 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.94 | 98.06 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn– age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.48 | 7.09 | ND | 0.34 | - |
| Matrix (White) | 93.82 | 5.68 | ND | 0.50 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 82.87 | 17.13 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 3.96 | 96.04 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 2.34 | 97.66 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn– age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 93.57 | 6.43 | ND | N/A | - |
| Matrix (White) | 96.05 | 3.03 | ND | 0.82 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 42.13 | 57.87 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 5.46 | 94.50 | ND | 0.04 | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.3Sn- age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 92.34 | 7.02 | ND | 0.55 | - |
| Matrix (White) | 93.20 | 6.80 | ND | N/A | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 54.00 | 45.93 | ND | 0.07 | - |
| Beta phase (Black) | 35.69 | 64.31 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 34.59 | 62.80 | ND | 2.61 | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn- age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 93.92 | 5.86 | ND | 0.22 | - |
| Matrix (White) | 95.89 | 3.90 | ND | 0.21 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 72.62 | 26.71 | ND | 0.67 | - |
| Beta phase (Black) | 13.89 | 85.89 | ND | 0.22 | - |
| Grey phase | 1.54 | 98.22 | ND | 0.24 | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn- age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 93.23 | 6.05 | ND | 0.72 | - |
| Matrix (White) | 96.37 | 3.57 | ND | 0.06 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 83.57 | 16.43 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 6.20 | 93.80 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 6.39 | 93.61 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn- age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 93.77 | 6.18 | ND | 0.05 | - |
| Matrix (White) | 96.32 | 3.48 | ND | 0.20 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 77.87 | 22.08 | ND | 0.05 | - |
| Beta phase (Black) | 2.36 | 97.64 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 2.17 | 97.83 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn- age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.70 | 7.08 | ND | 0.22 | - |
| Matrix (White) | 92.72 | 6.79 | ND | 0.49 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 81.23 | 18.77 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 3.90 | 96.10 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.85 | 98.15 | ND | N/A | - |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค6.ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.5Sn– ascast | | | | | |
| Overall | 92.68 | 6.87 | ND | 0.45 | - |
| Matrix (White) | 96.13 | 3.29 | ND | 0.58 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 2.96 | 96.79 | ND | 0.25 | - |
| Grey phase | 1.79 | 98.21 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn– age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 92.68 | 6.83 | ND | 0.49 | - |
| Matrix (White) | 94.35 | 5.51 | ND | 0.14 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 56.56 | 43.44 | ND | N/A | - |
| Beta phase (Black) | 2.72 | 97.22 | ND | 0.06 | - |
| Grey phase | 2.72 | 97.22 | ND | 0.06 | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn– age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 94.07 | 4.67 | ND | 1.26 | - |
| Matrix (White) | 95.94 | 3.59 | ND | 0.47 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 78.86 | 20.86 | ND | 0.28 | - |
| Beta phase (Black) | 1.46 | 98.54 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.40 | 98.60 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn– age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.16 | 6.58 | ND | 1.17 | - |
| Matrix (White) | 94.30 | 5.22 | ND | 0.48 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 86.34 | 11.58 | ND | 2.08 | - |
| Beta phase (Black) | 3.91 | 96.09 | ND | N/A | - |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn– age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.81 | 6.84 | ND | 0.35 | - |
| Matrix (White) | 96.40 | 3.31 | ND | 0.29 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 3.51 | 96.49 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.59 | 98.19 | ND | 0.22 | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn– age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 91.87 | 7.86 | ND | 0.27 | - |
| Matrix (White) | 94.88 | 5.03 | ND | 0.09 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 3.47 | 96.25 | ND | 0.28 | - |
| Grey phase | 1.19 | 98.81 | ND | N/A | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------|----|------|----|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.5Sn – age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 93.41 | 6.41 | ND | 0.18 | - |
| Matrix (White) | 96.21 | 3.16 | ND | 0.63 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 83.49 | 16.41 | ND | 0.10 | - |
| Beta phase (Black) | 5.94 | 94.06 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 5.94 | 94.06 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn – age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 93.28 | 6.46 | ND | 0.26 | - |
| Matrix (White) | 96.73 | 2.82 | ND | 0.45 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 7.47 | 92.36 | ND | 0.17 | - |
| Grey phase | 2.63 | 97.30 | ND | 0.07 | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn – age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.85 | 6.47 | ND | 0.68 | - |
| Matrix (White) | 95.92 | 3.61 | ND | 0.47 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 86.22 | 13.60 | ND | 0.18 | - |
| Beta phase (Black) | 1.86 | 98.14 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.85 | 98.15 | ND | N/A | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn – age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 93.99 | 5.69 | ND | 0.32 | - |
| Matrix (White) | 94.36 | 5.63 | ND | 0.01 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 4.78 | 95.22 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 9.81 | 90.04 | ND | 0.15 | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn – age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.47 | 7.05 | ND | 0.48 | - |
| Matrix (White) | 95.19 | 4.30 | ND | 0.51 | - |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 76.90 | 22.46 | ND | 0.64 | - |
| Beta phase (Black) | 1.00 | 99.00 | ND | N/A | - |
| Grey phase | 1.04 | 98.96 | ND | N/A | - |

หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ตารางที่ ค7. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคของชุดโลหะผสม

AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|---|----------------------|-------|----|------|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – ascast | | | | | |
| Overall | 93.20 | 6.05 | ND | 0.51 | 0.24 |
| Matrix (White) | 95.78 | 3.64 | ND | 0.33 | 0.25 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.13 | 29.41 | ND | 1.19 | 3.27 |
| Beta phase (Black) | 7.08 | 92.08 | ND | 0.22 | 0.62 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 350°C/10 min | | | | | |
| Overall | 93.22 | 6.34 | ND | 0.03 | 0.41 |
| Matrix (White) | 97.64 | 2.13 | ND | N/A | 0.23 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 51.13 | 43.03 | ND | 2.57 | 3.27 |
| Beta phase (Black) | 10.52 | 89.09 | ND | N/A | 0.39 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 350°C/15 min | | | | | |
| Overall | 90.26 | 8.40 | ND | 1.09 | 0.25 |
| Matrix (White) | 96.09 | 3.55 | ND | 0.24 | 0.11 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | - | - | ND | - | - |
| Beta phase (Black) | 42.22 | 57.65 | ND | N/A | 0.13 |
| Grey phase | 14.67 | 83.46 | ND | 0.25 | 1.62 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 350°C/30 min | | | | | |
| Overall | 91.39 | 7.70 | ND | 0.61 | 0.30 |
| Matrix (White) | 96.89 | 2.63 | ND | 0.24 | 0.24 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 77.68 | 19.13 | ND | 0.35 | 2.84 |
| Beta phase (Black) | 6.54 | 93.20 | ND | N/A | 0.26 |
| Grey phase | | | | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 350°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.37 | 6.68 | ND | 0.60 | 0.35 |
| Matrix (White) | 90.60 | 8.14 | ND | 0.95 | 0.31 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 54.47 | 40.55 | ND | 3.19 | 1.79 |
| Beta phase (Black) | 26.09 | 73.72 | ND | N/A | 0.19 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 350°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.45 | 5.99 | ND | 1.17 | 0.39 |
| Matrix (White) | 93.96 | 5.03 | ND | 0.77 | 0.25 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 58.39 | 36.95 | ND | 1.55 | 3.10 |
| Beta phase (Black) | 16.69 | 83.11 | ND | N/A | 0.20 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |

| Alloy & Area detect | ส่วนผสมทางเคมี (%wt) | | | | |
|---|----------------------|-------|----|------|------|
| | Ag | Cu | Be | Sn | Al |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 400°C/10 min | | | | | |
| Overall | 91.99 | 7.11 | ND | 0.59 | 0.31 |
| Matrix (White) | 96.94 | 2.76 | ND | 0.14 | 0.16 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 65.12 | 30.51 | ND | 1.19 | 3.19 |
| Beta phase (Black) | 3.55 | 94.76 | ND | 0.53 | 1.16 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 400°C/15 min | | | | | |
| Overall | 92.51 | 6.26 | ND | 0.94 | 0.30 |
| Matrix (White) | 96.22 | 3.24 | ND | 0.17 | 0.36 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 74.22 | 25.42 | ND | N/A | 0.36 |
| Beta phase (Black) | 29.31 | 66.23 | ND | 1.11 | 3.36 |
| Grey phase | 29.31 | 66.22 | ND | 1.11 | 3.36 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 400°C/30 min | | | | | |
| Overall | 92.90 | 6.02 | ND | 0.72 | 0.37 |
| Matrix (White) | 96.37 | 2.39 | ND | 0.95 | 0.29 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 53.13 | 42.60 | ND | 2.32 | 1.95 |
| Beta phase (Black) | 4.59 | 95.19 | ND | 0.13 | 0.09 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 400°C/60 min | | | | | |
| Overall | 92.22 | 7.11 | ND | 0.38 | 0.28 |
| Matrix (White) | 96.91 | 2.66 | ND | 0.33 | 0.11 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 66.40 | 28.18 | ND | 1.13 | 4.29 |
| Beta phase (Black) | 4.60 | 95.29 | ND | N/A | 0.11 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al – age 400°C/120 min | | | | | |
| Overall | 92.69 | 6.52 | ND | 0.40 | 0.38 |
| Matrix (White) | 96.96 | 2.52 | ND | 0.30 | 0.22 |
| Eutectic (Alpha+Beta) | 67.29 | 26.88 | ND | 3.08 | 2.75 |
| Beta phase (Black) | 8.61 | 91.08 | ND | N/A | 0.32 |
| Grey phase | - | - | ND | - | - |

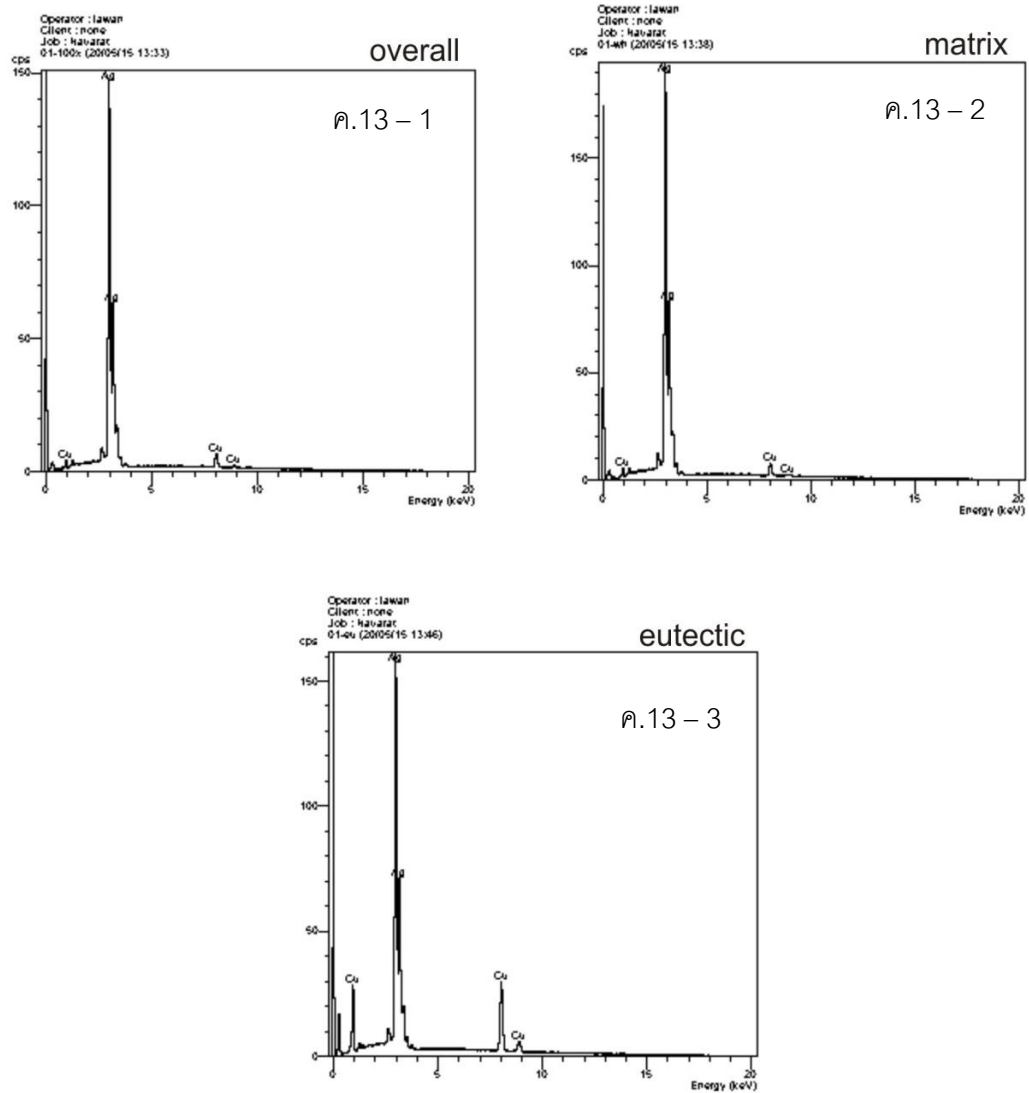
หมายเหตุ

*ND (Not Detect) หมายถึง อาจเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดได้

**N/A (Not Applicable) หมายถึง ตรวจไม่พบธาตุดังกล่าว

ผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมที่ได้เป็นกราฟ จาก EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงและ ของแต่ละชุดรวมทั้งหมด 7 ชุด ได้แก่

1. ชุดโลหะผสม AgCu



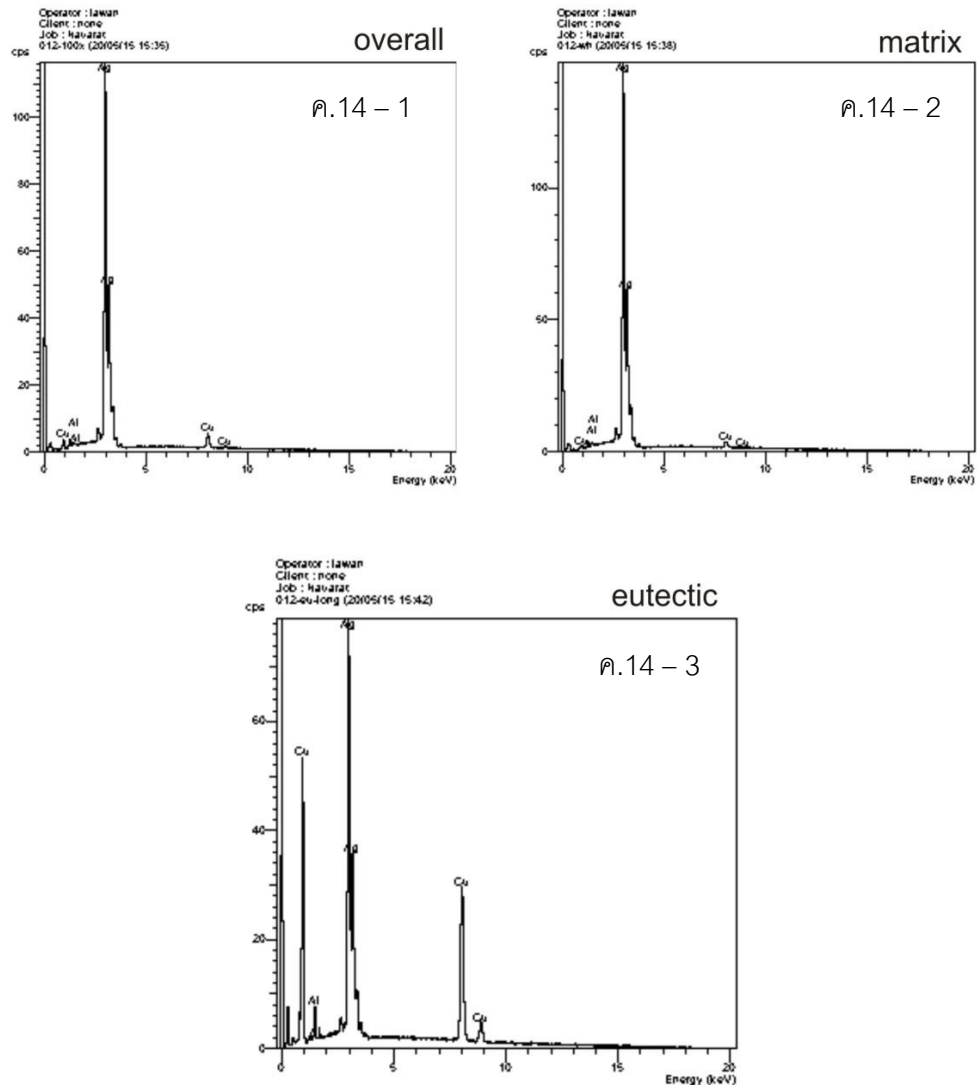
ภาพที่ ค13. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu :

ค.13 – 1 Overall : ยิงที่บริเวณของชิ้นงาน 100X

ค.13 – 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค

ค.13 – 3 Eutectic : บริเวณโครงสร้างยูเทคติก

2. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Al



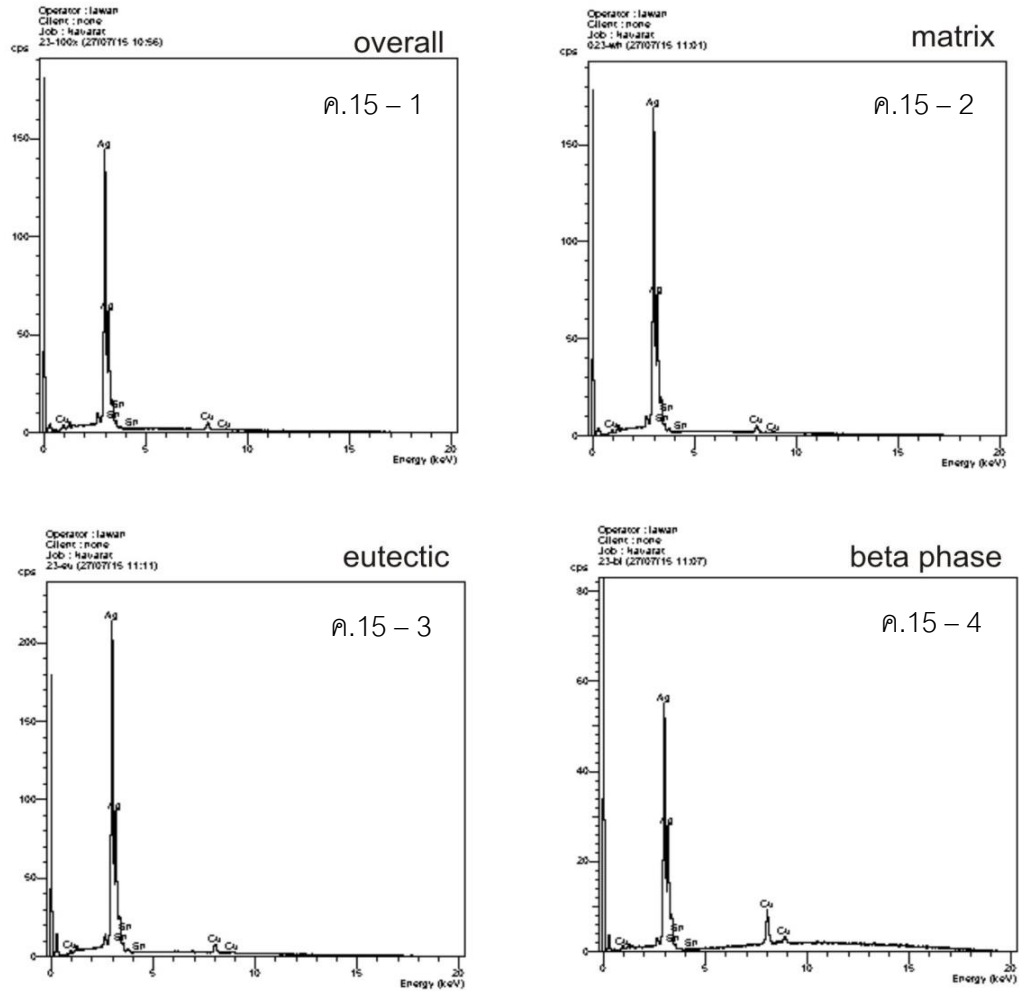
ภาพที่ ค.14. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu_{0.3}Al :

ค.14-1 Overall : ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X,

ค.14-2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค,

ค.14-3 Eutectic : บริเวณโครงสร้างยูเทคติก

3. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Sn



ภาพที่ ค15. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu_{0.3}Sn :

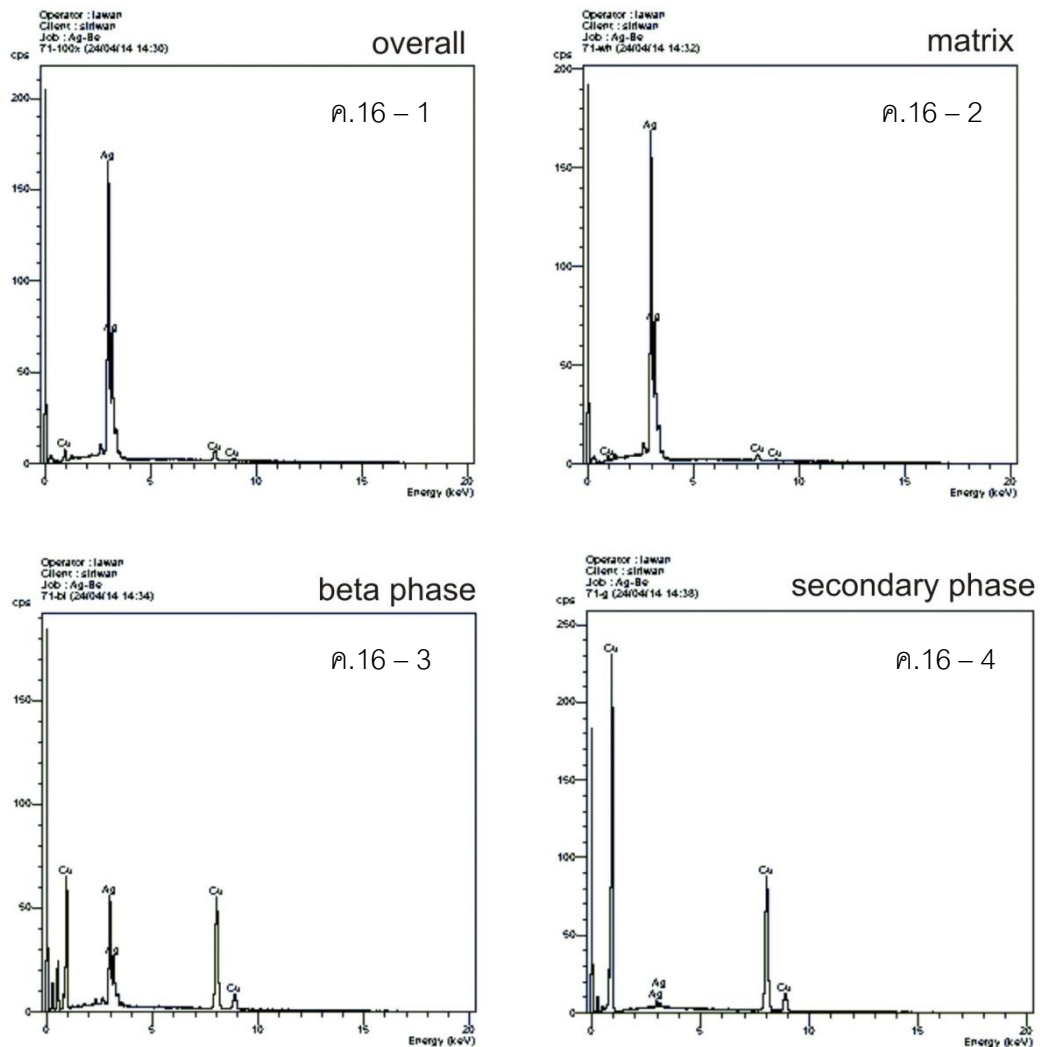
ค.15 – 1 Overall : ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X

ค.15 – 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค

ค.15 – 3 Eutectic : บริเวณโครงสร้างยูเทคติก

ค.15 – 4 Beta phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสของเบตา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุของทองแดง (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีดำ)

4. ชุดโลหะผสม AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn



ภาพที่ ค.16. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu_{0.3}Be_{0.2}Sn :

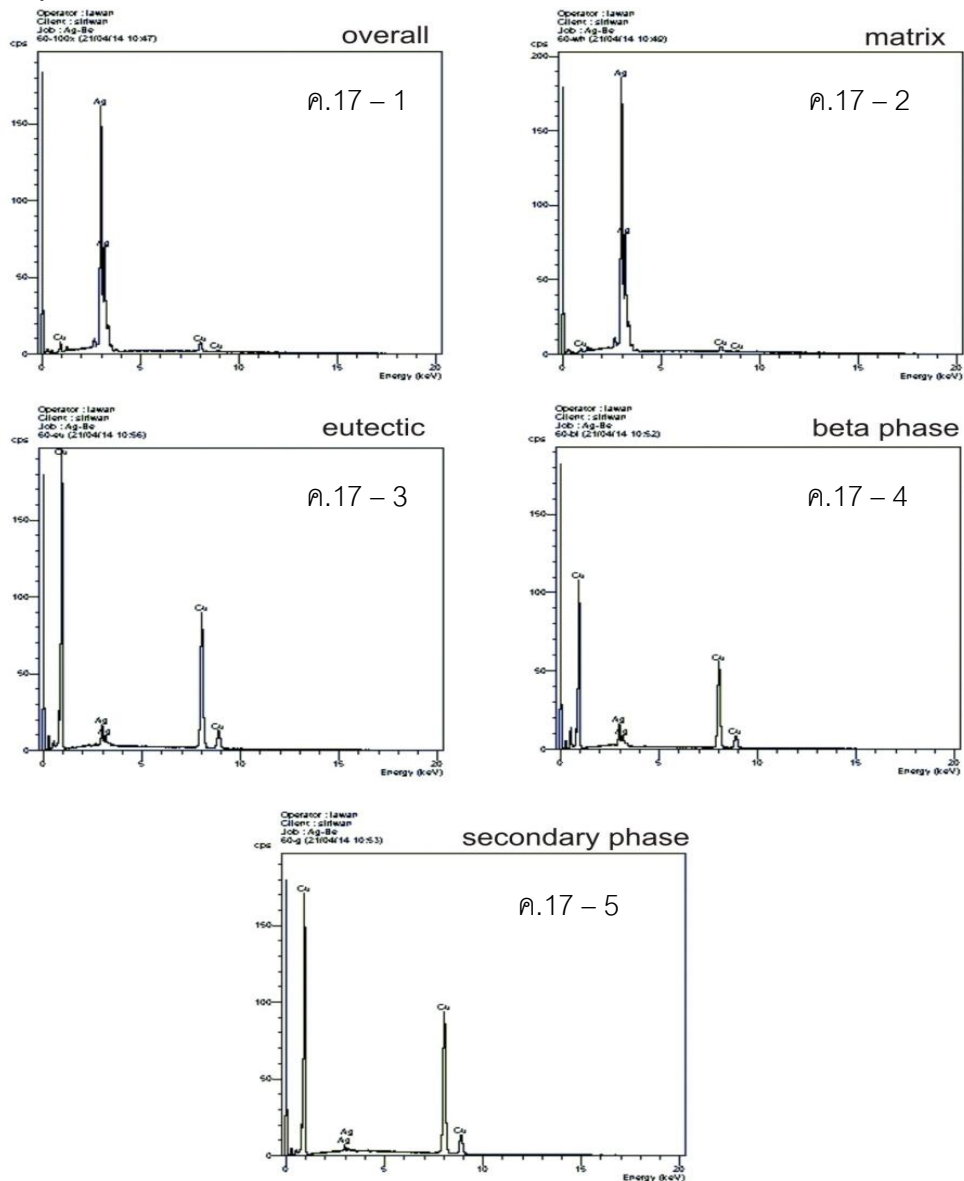
ค.16 – 1 Overall : ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X

ค.16 – 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค

ค.16 – 3 Beta phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสของเบตา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุของทองแดง (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีดำ)

ค.16 – 4 Secondary Phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่ เรียกว่า Secondary Phase เป็นโครงสร้างที่เกิดจากทองแดงแยกตัวออกมาเกิดเป็นเฟสใหม่ (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีเทา/สีเทาอ่อน)

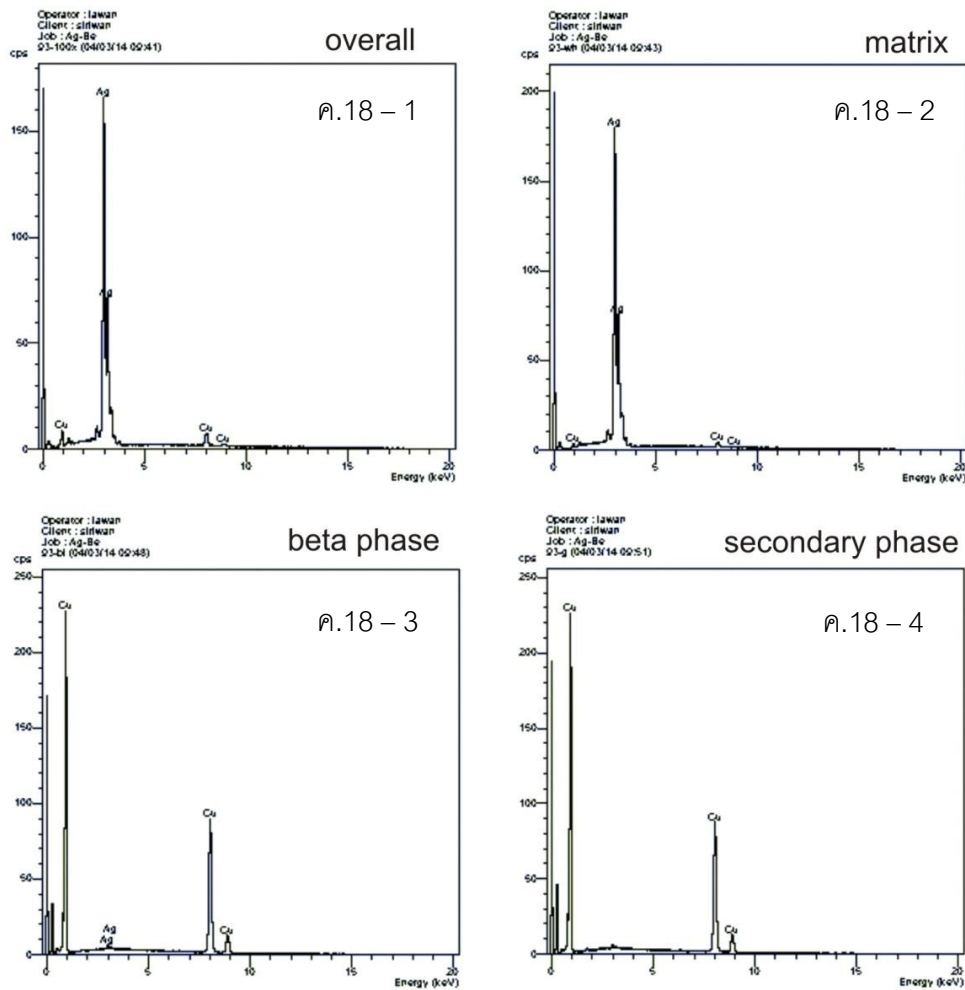
5. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be.3Sn



ภาพที่ ค.17. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.3Sn :

ค.17 - 1 Overall : ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X ค.17 - 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค ค.17 - 3 Eutectic : บริเวณโครงสร้างยูเทคติก ค.17 - 4 Beta phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสของเบตา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุของทองแดง (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีดำ) ค.17 - 5 Secondary Phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่ เรียกว่า Secondary Phase เป็นโครงสร้างที่เกิดจากทองแดงแยกตัวออกมาเกิดเป็นเฟสใหม่ (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีเทา/สีเทาอ่อน)

6. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn



ภาพที่ ค.18. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn :

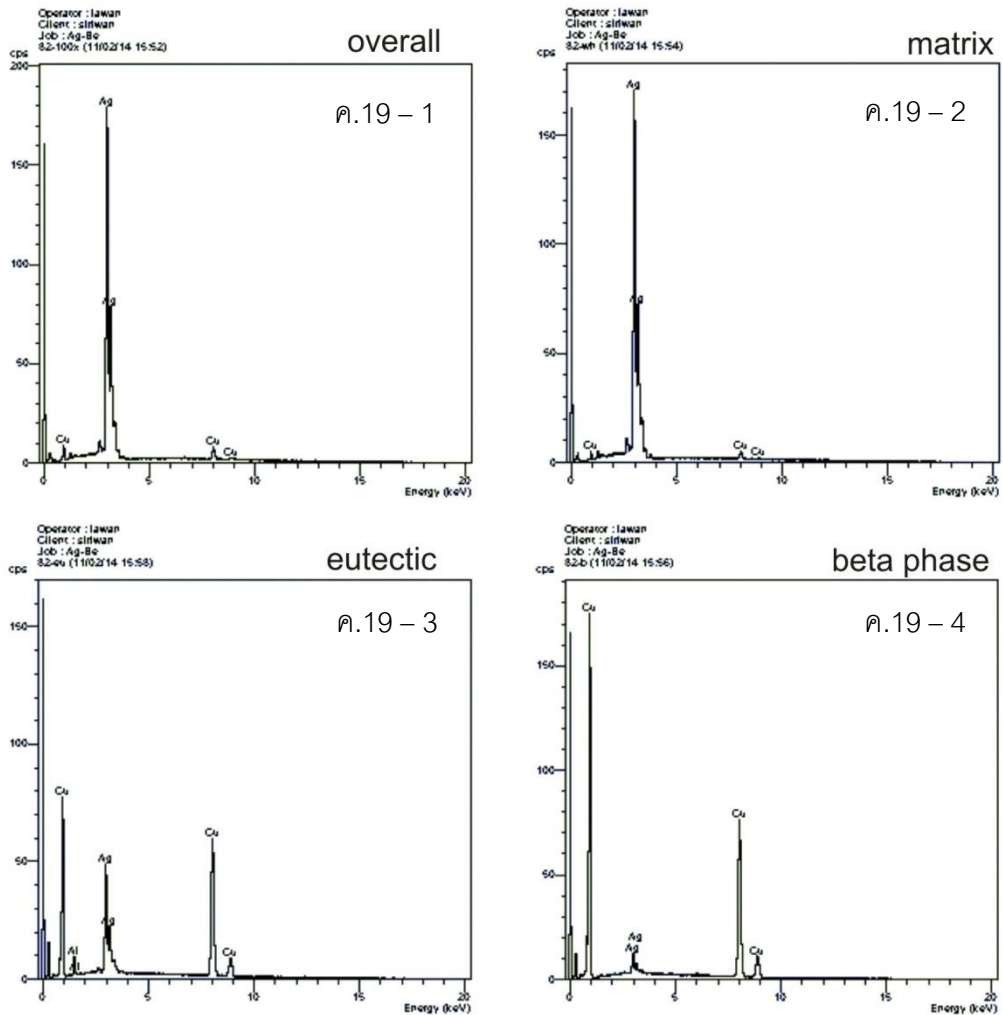
ค.18 – 1 Overall ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X

ค.18 – 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค

ค.18 – 3 Beta phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสของเบต้า ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุของทองแดง (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีดำ)

ค.18 – 4 Secondary Phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่ เรียกว่า Secondary Phase เป็นโครงสร้างที่เกิดจากทองแดงแยกตัวออกมาเกิดเป็นเฟสใหม่ (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีเทา/สีเทาอ่อน)

7. ชุดโลหะผสม AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al



ภาพที่ ค.19. กราฟ EDX ของแต่ละบริเวณที่ยิงเพื่อหาปริมาณธาตุผสม ของแต่ละจุดภายในโครงสร้างจุลภาค ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu_{0.3}Be_{0.5}Sn_{0.3}Al :

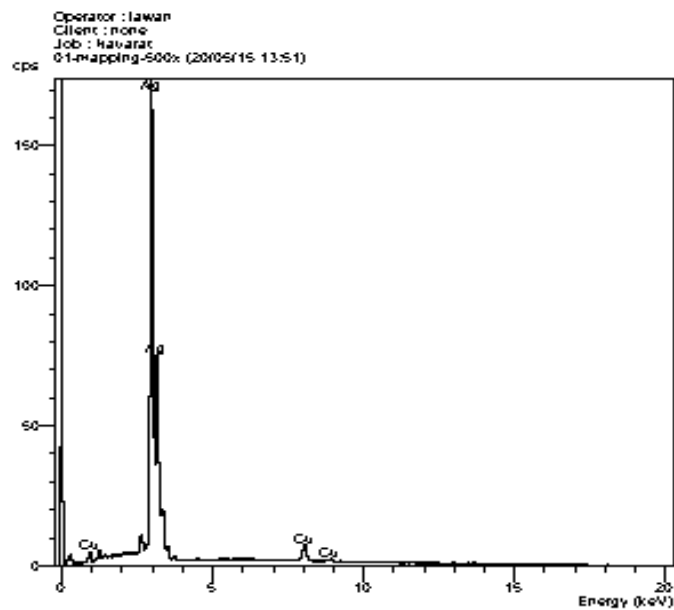
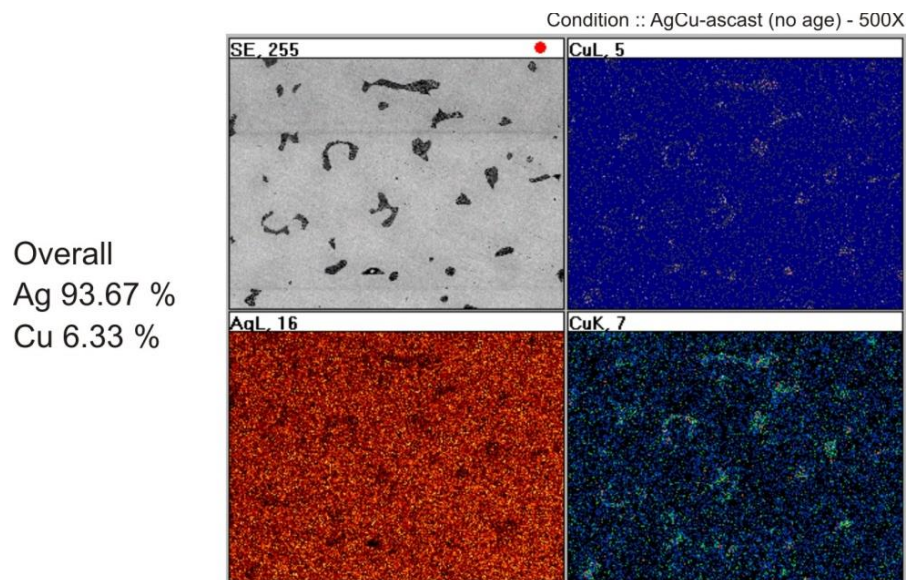
ค.19 – 1 Overall ยิงทั่วบริเวณของชิ้นงาน 100X

ค.19 – 2 Matrix : บริเวณเนื้อพื้นของโครงสร้างจุลภาค

ค.19 – 3 Eutectic : บริเวณโครงสร้างยูเทคติก

ค.19 – 4 Beta phase : บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสของเบต้า ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุของทองแดง (ถ้าดูในรูป SEM คือส่วนที่เป็นสีดำ)

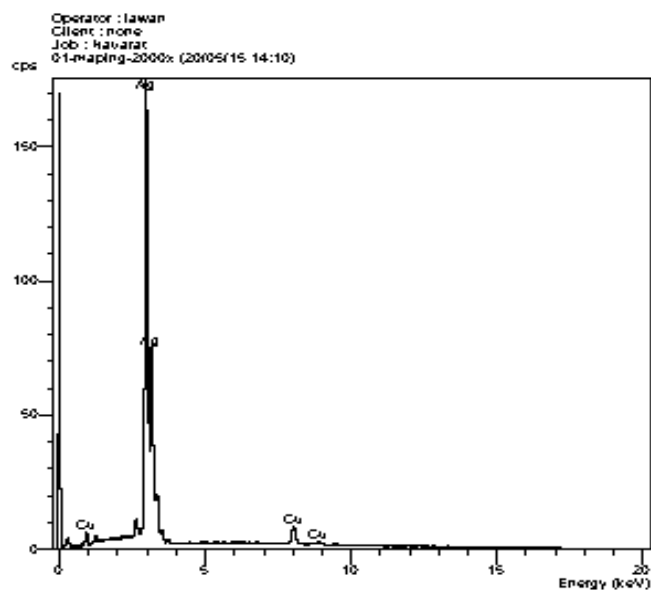
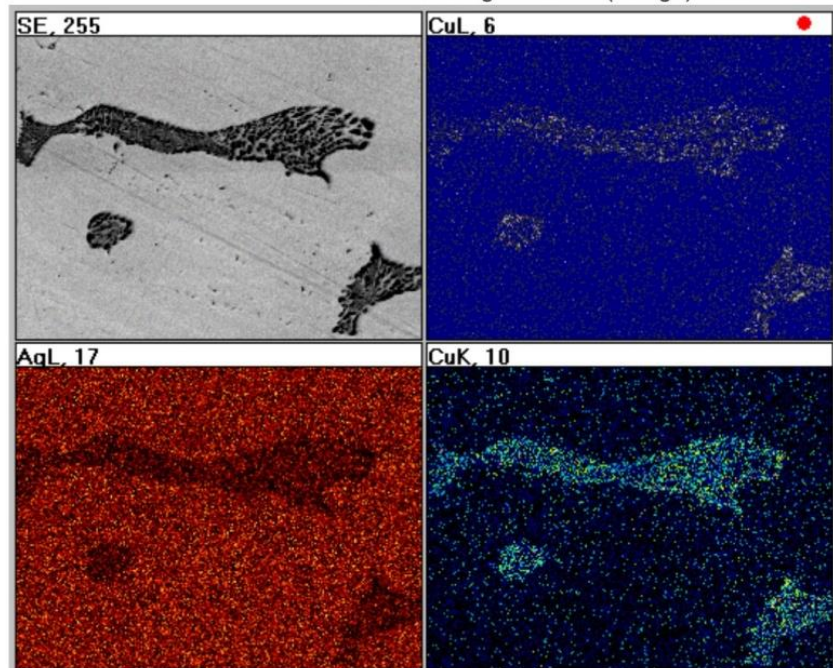
ผลของการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัว และหาตำแหน่งของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping รวมทั้งผลจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโครงสร้างจุลภาคแต่ละบริเวณด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 ทั้ง 7 ชุด ดังนี้



ภาพที่ ค20. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า

Condition :: AgCu-ascast (no age) - 2000X No.1

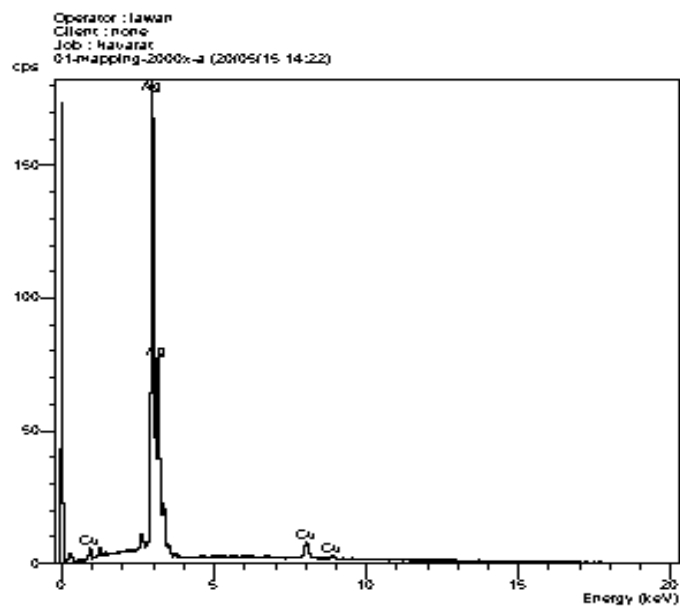
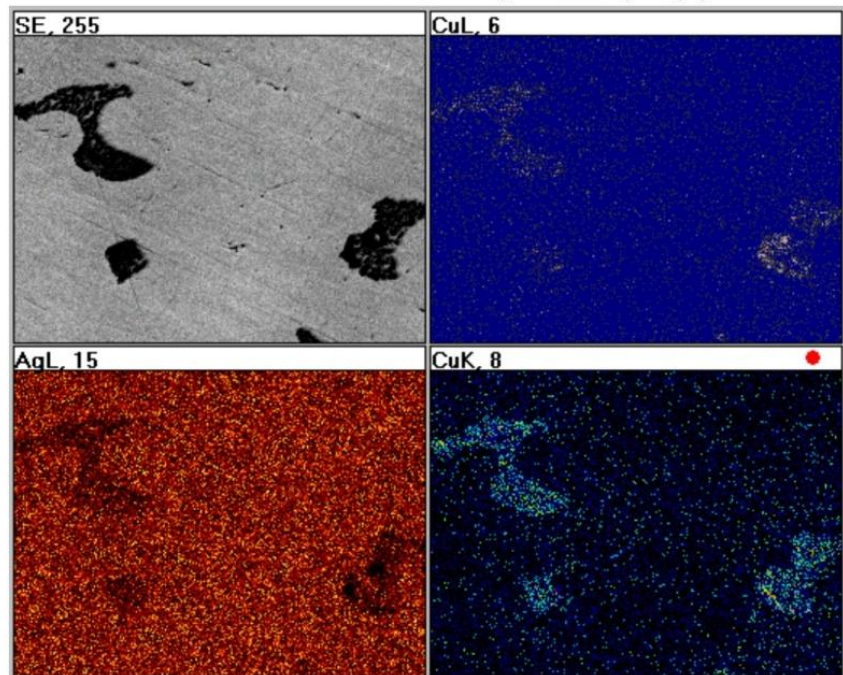
Overall
Ag 92.56 %
Cu 7.44 %



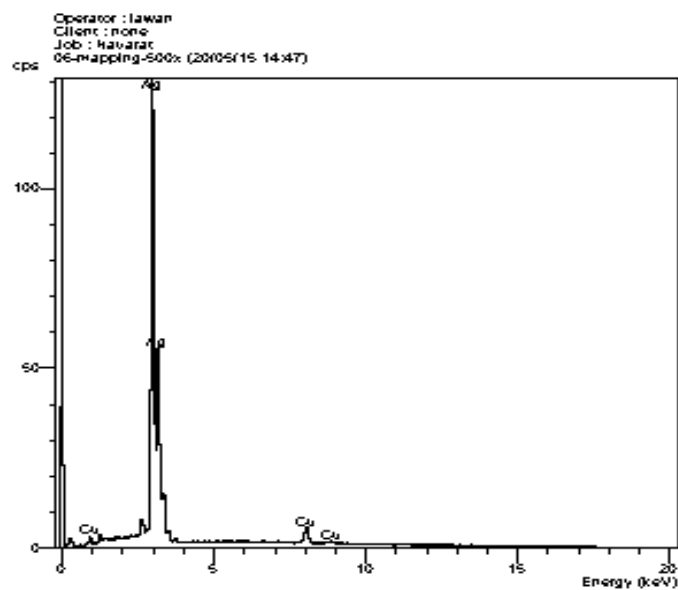
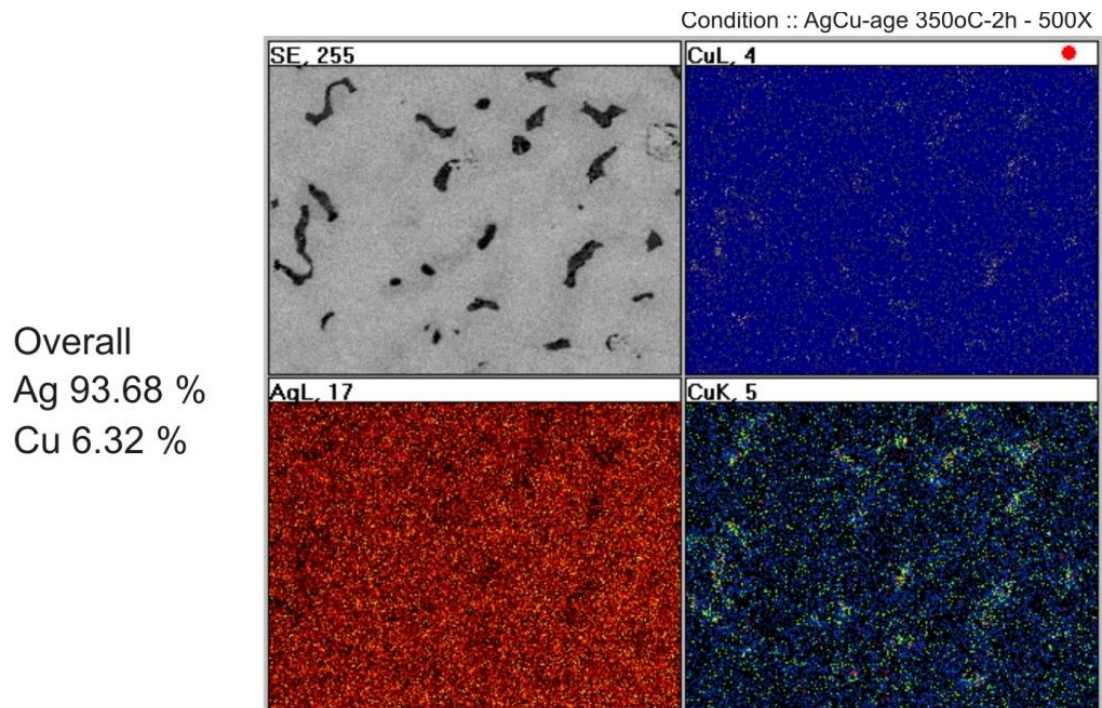
ภาพที่ ค21. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า

Condition :: AgCu-ascast (no age) - 2000X No.2

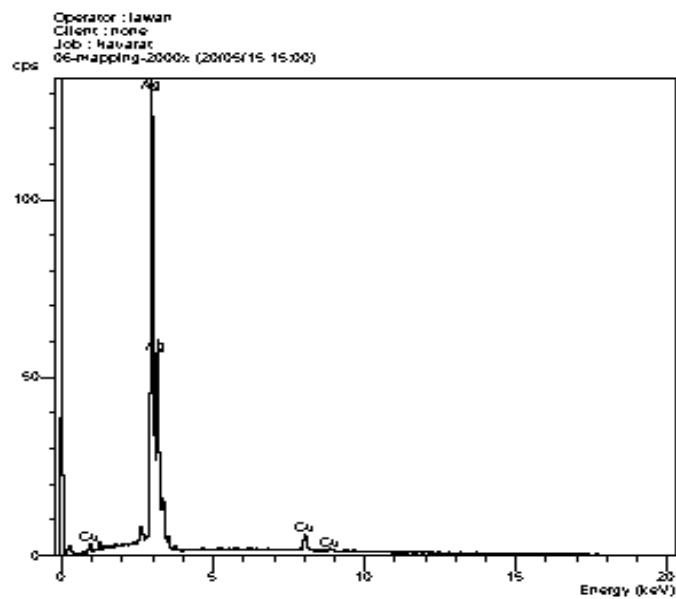
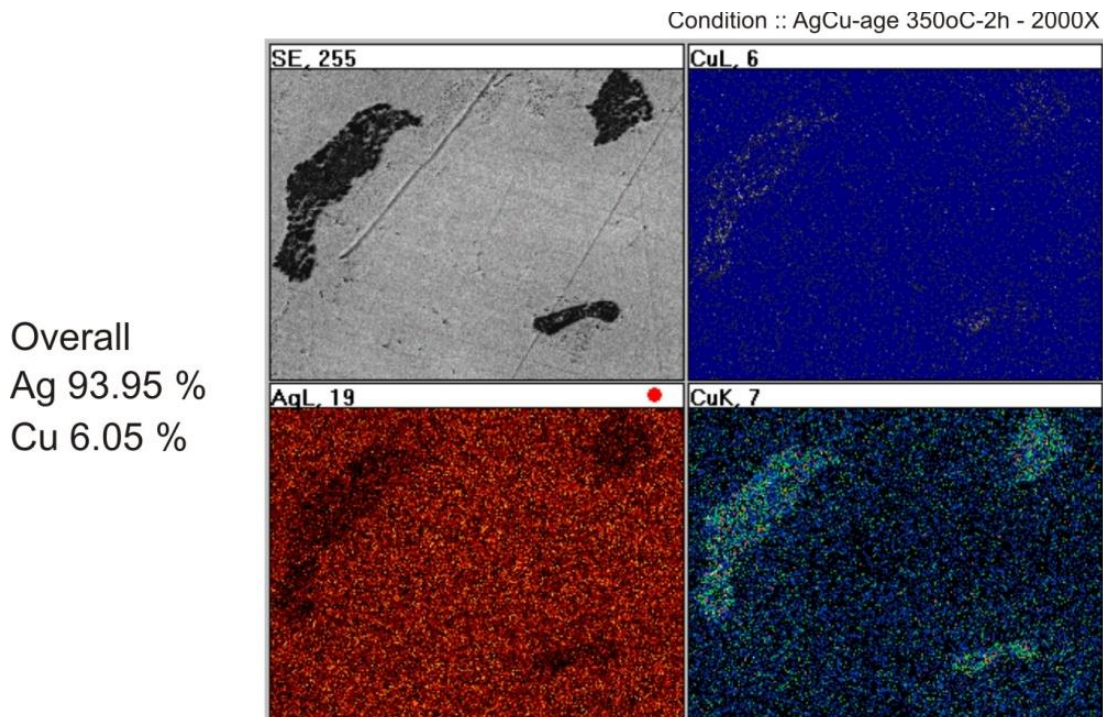
Overall
Ag 93.56 %
Cu 6.44 %



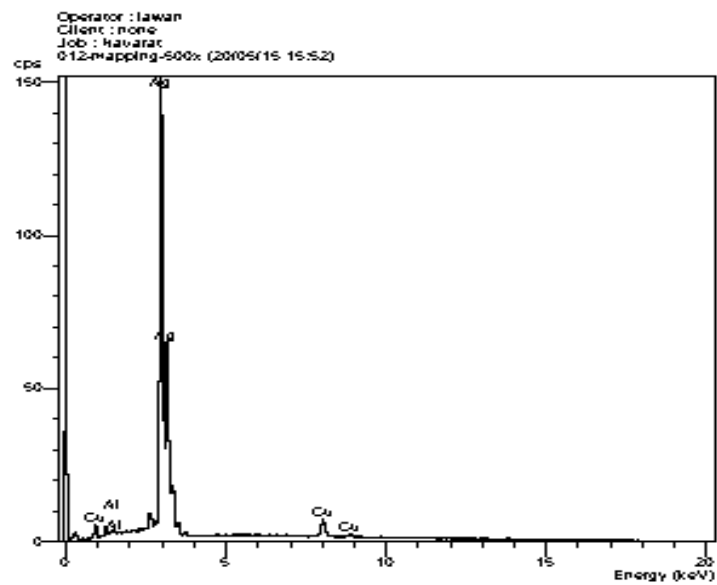
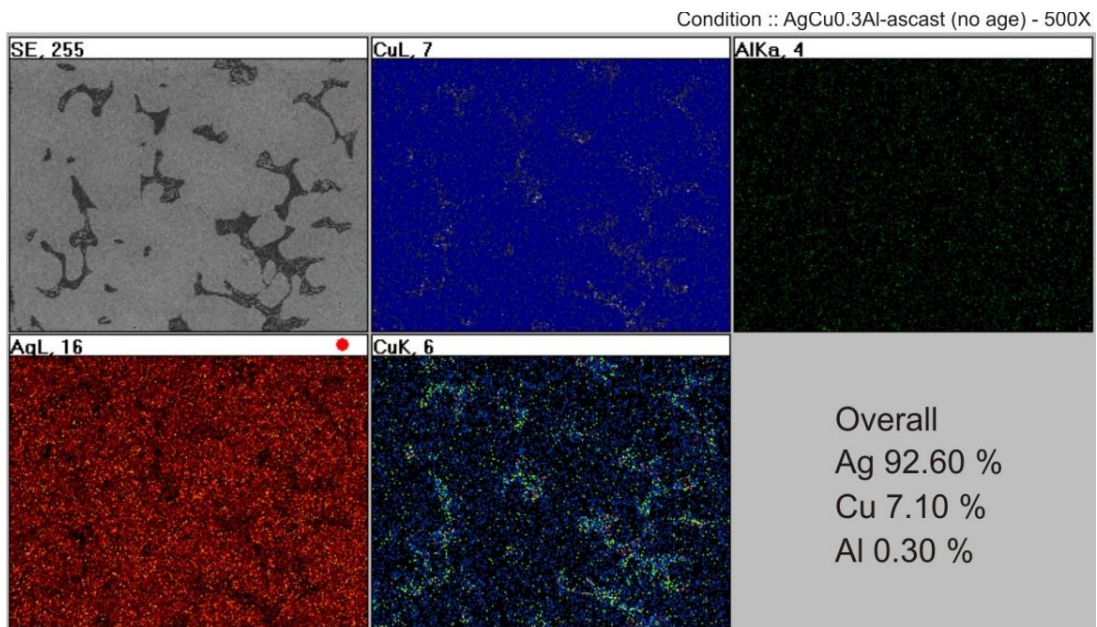
ภาพที่ ค22. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า



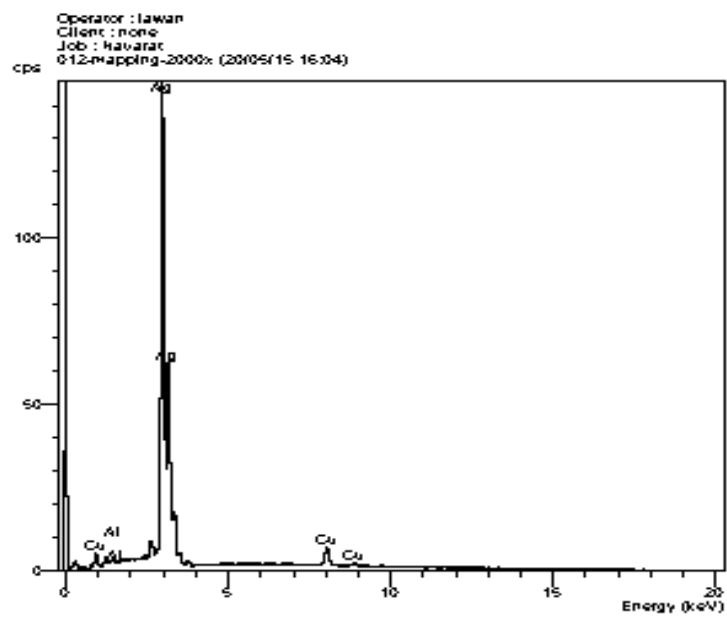
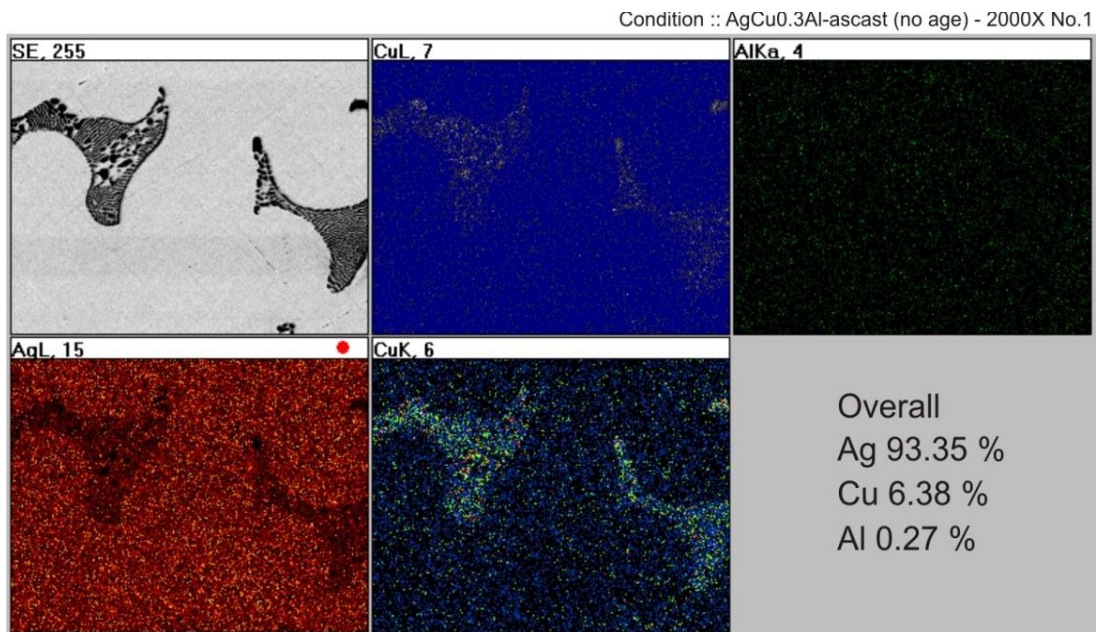
ภาพที่ ค23. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า



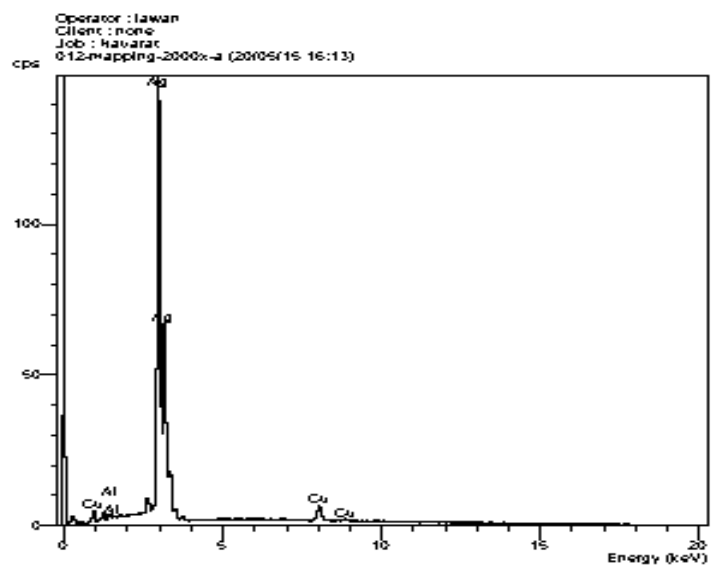
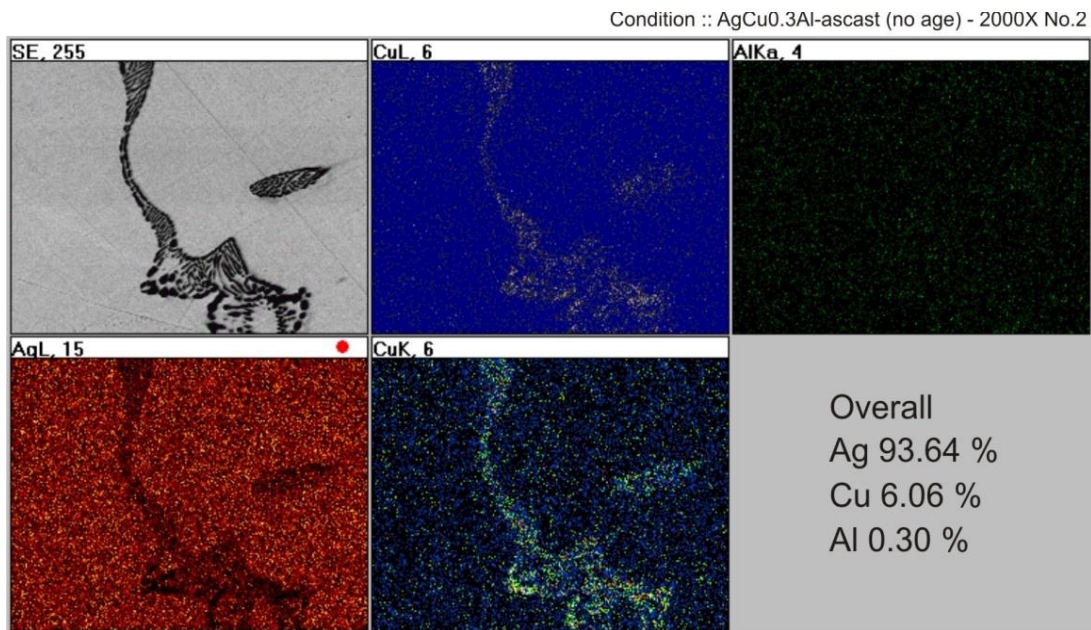
ภาพที่ ค24. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม(Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า



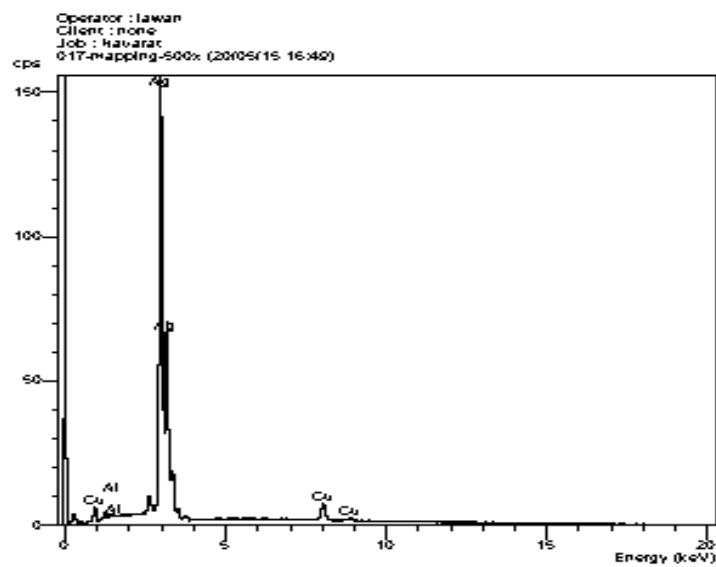
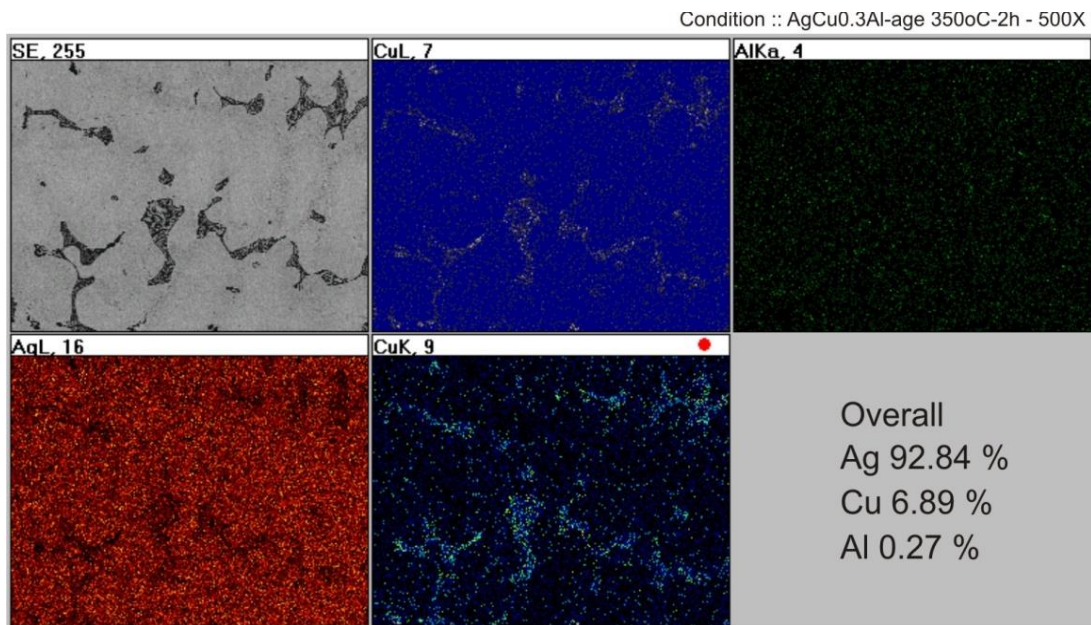
ภาพที่ ค25. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า



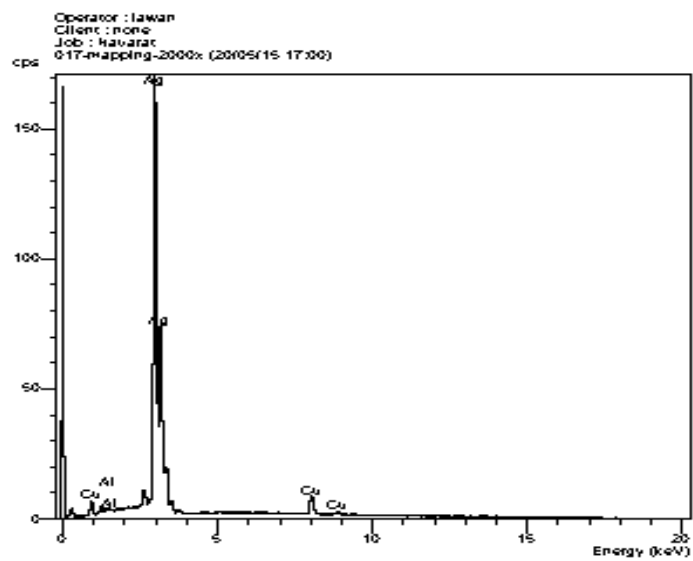
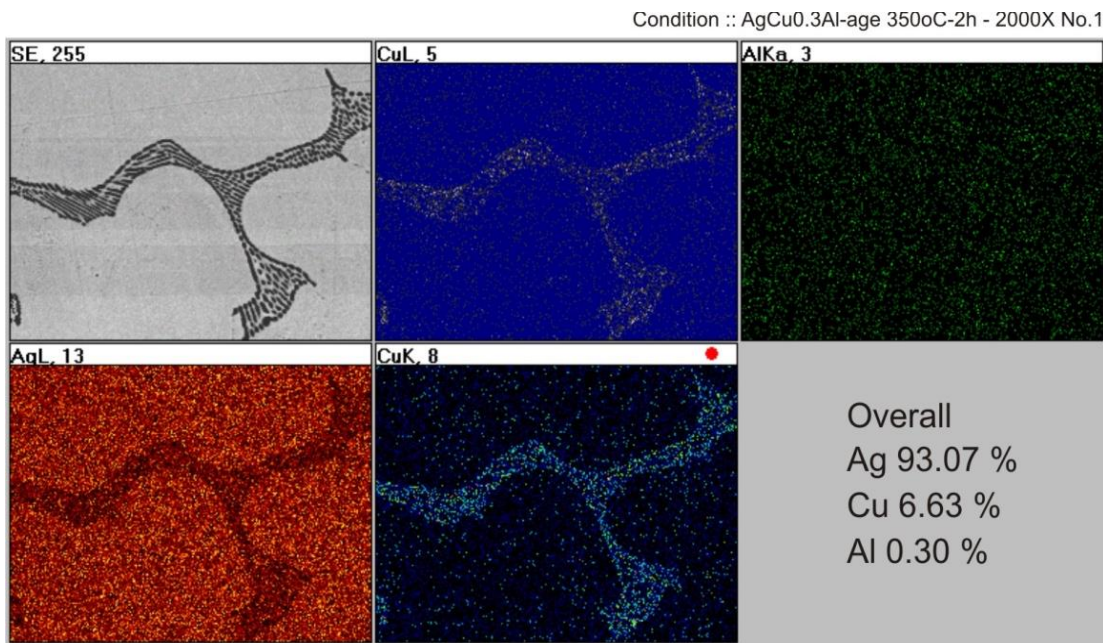
ภาพที่ ค26. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า



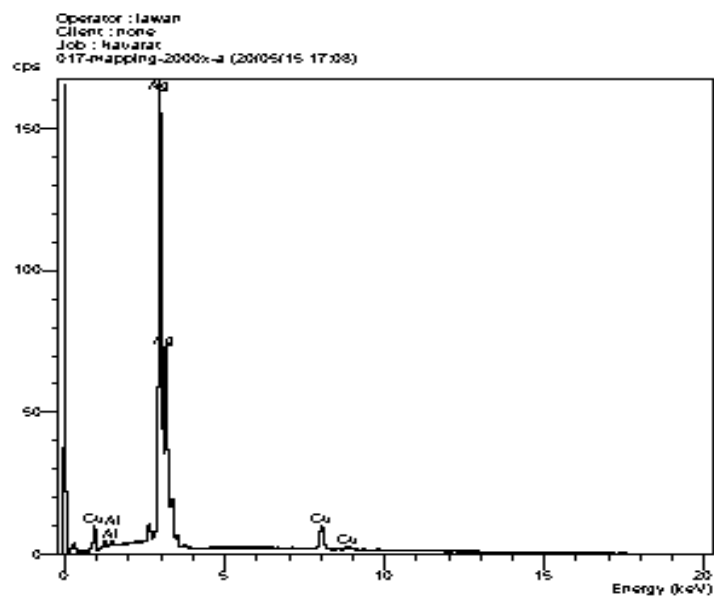
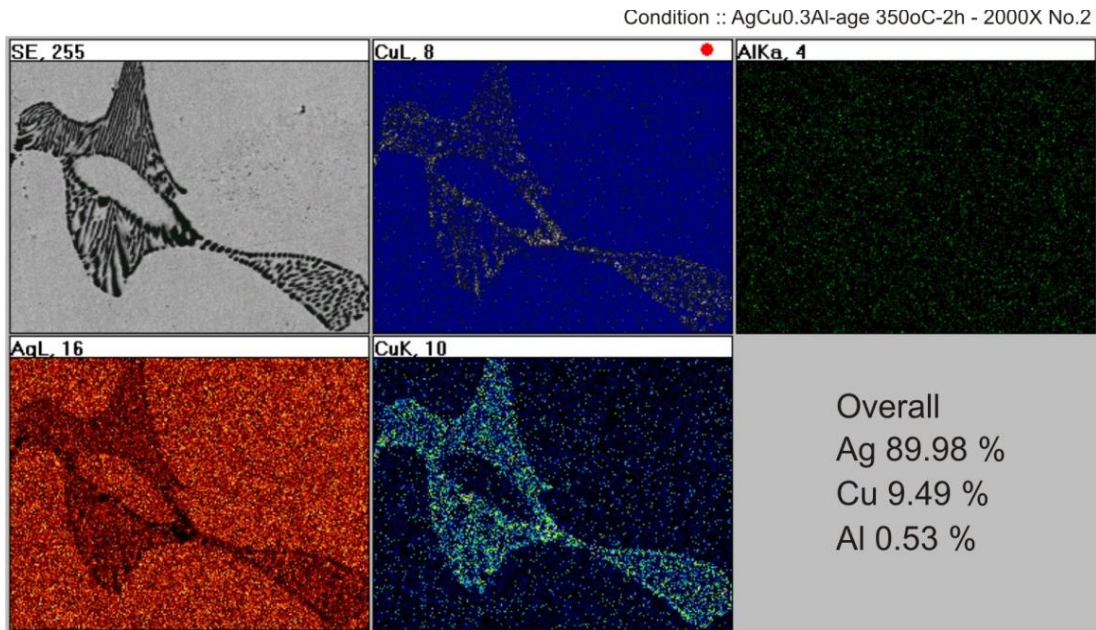
ภาพที่ ค27. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาพหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า



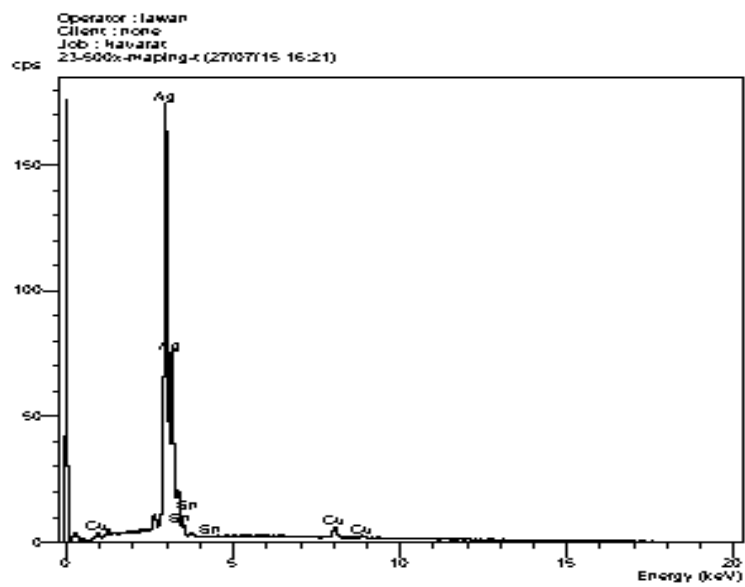
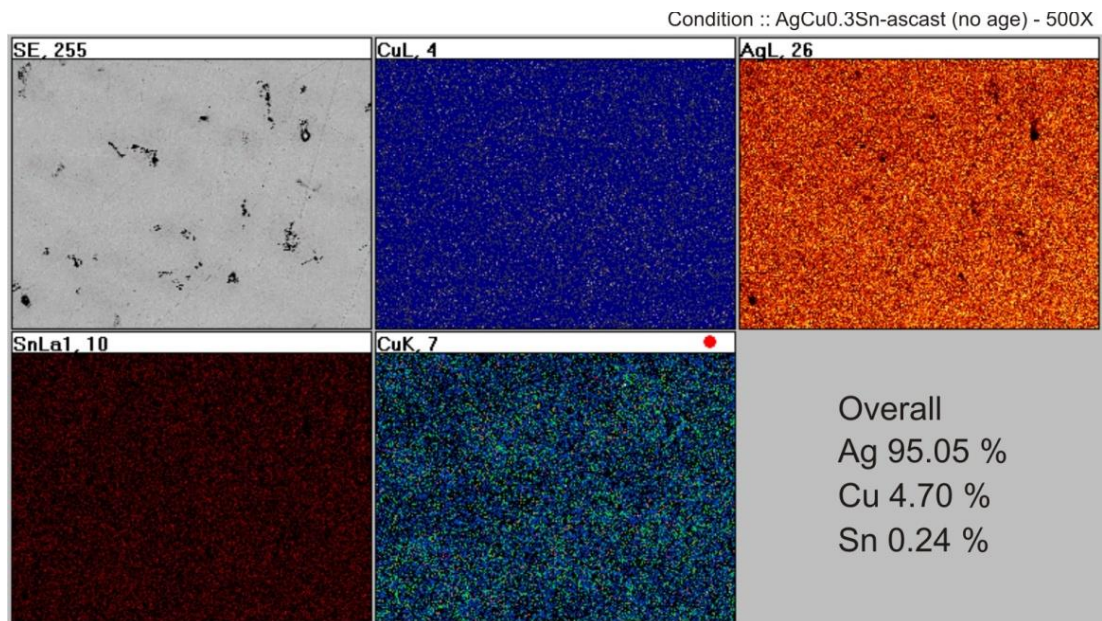
ภาพที่ ค28. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า



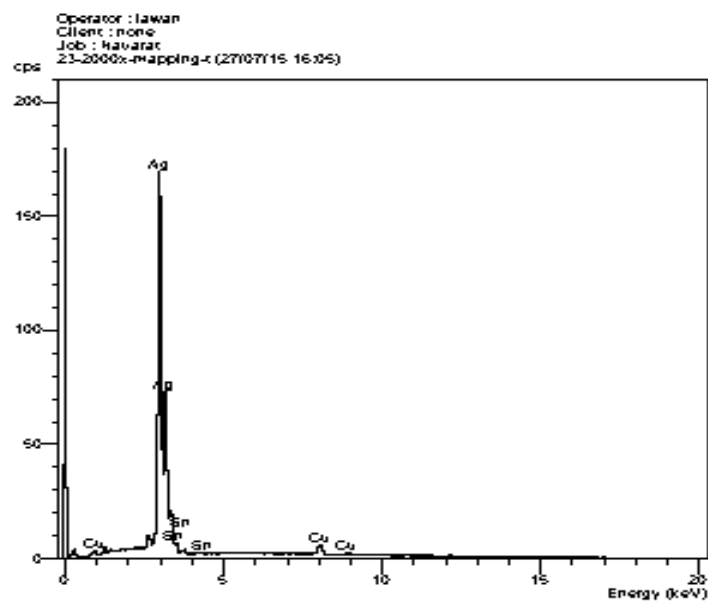
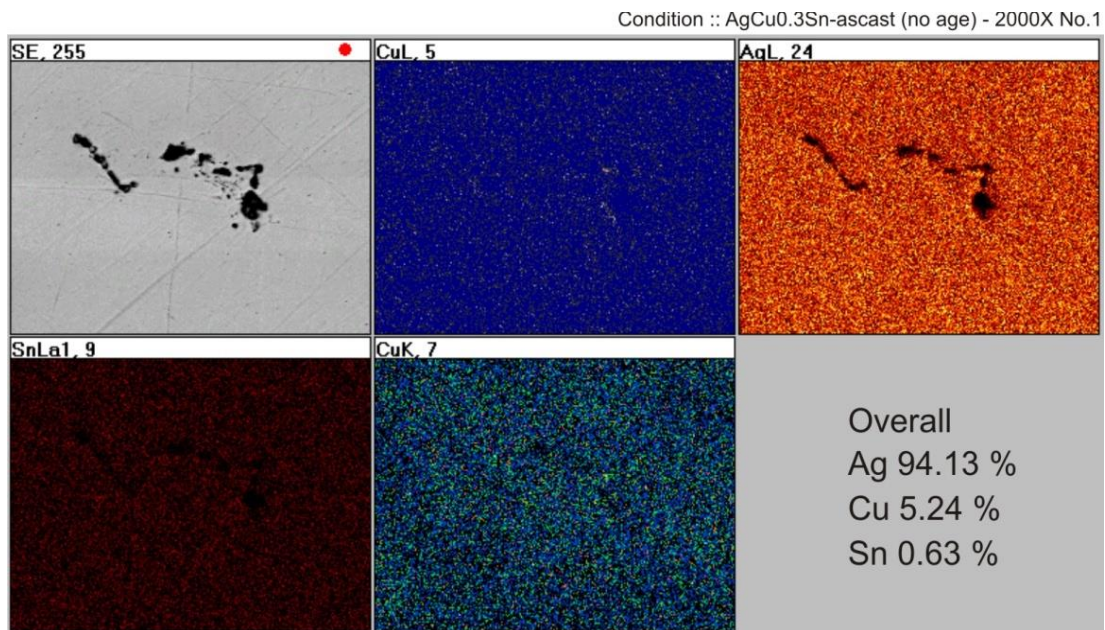
ภาพที่ ค29. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า



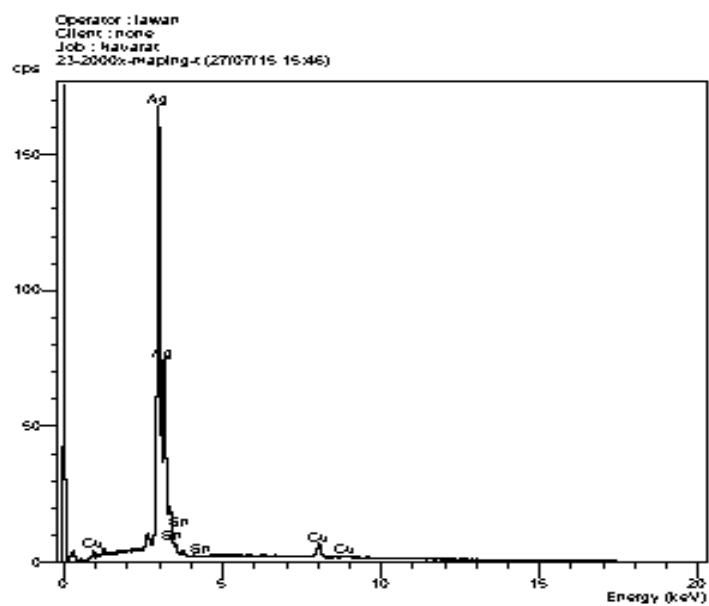
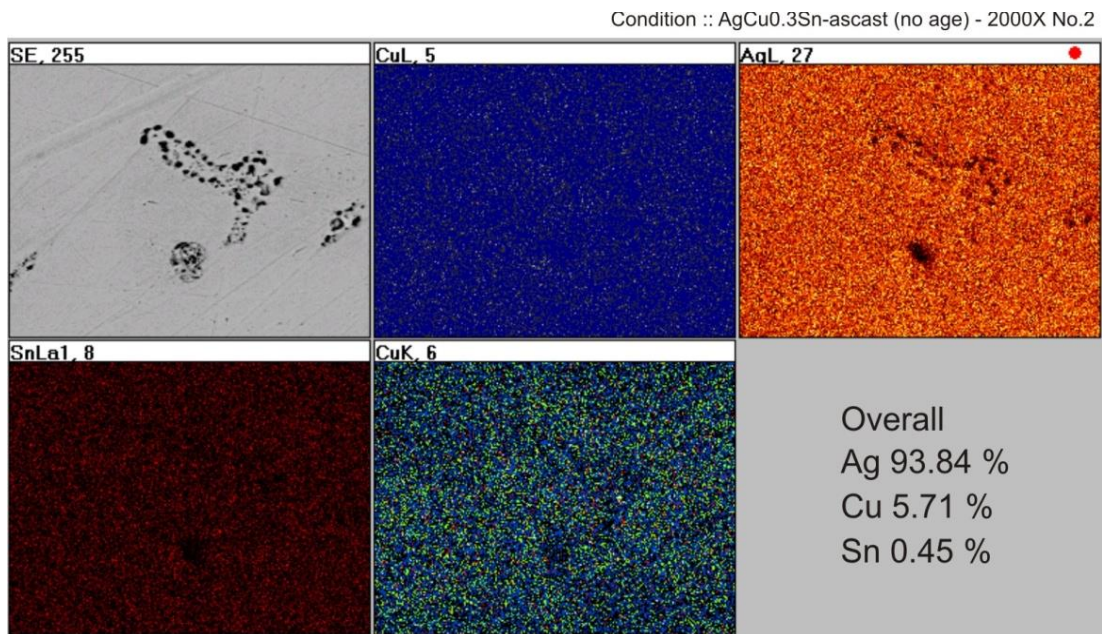
ภาพที่ ค30. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า



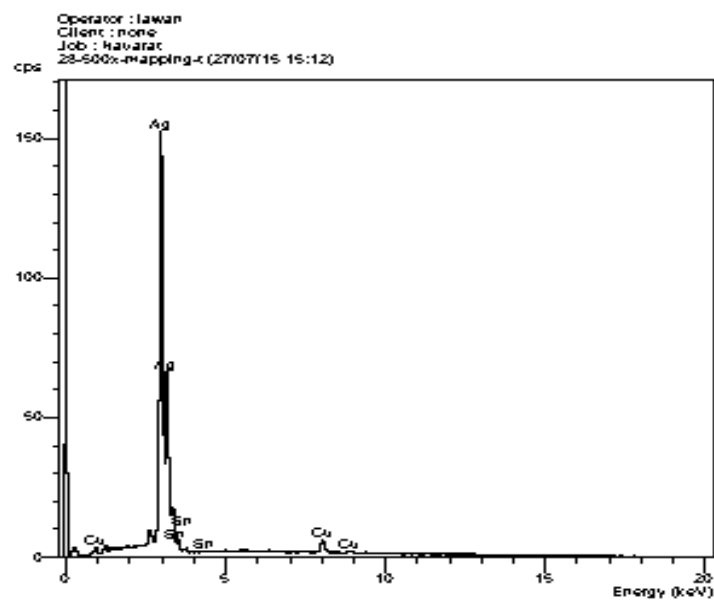
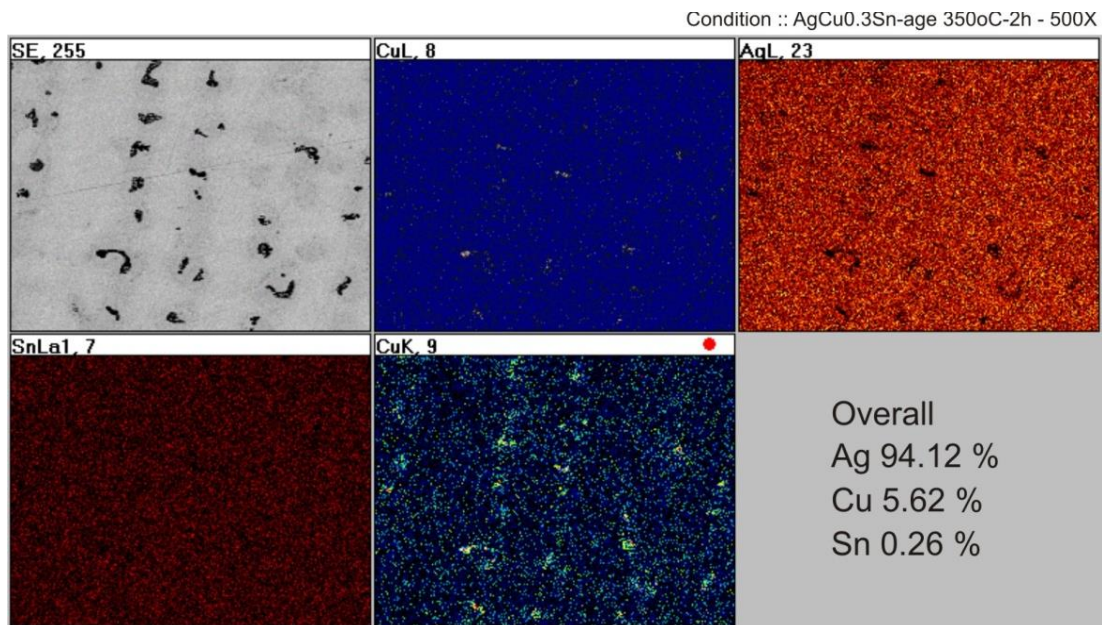
ภาพที่ ค31. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า



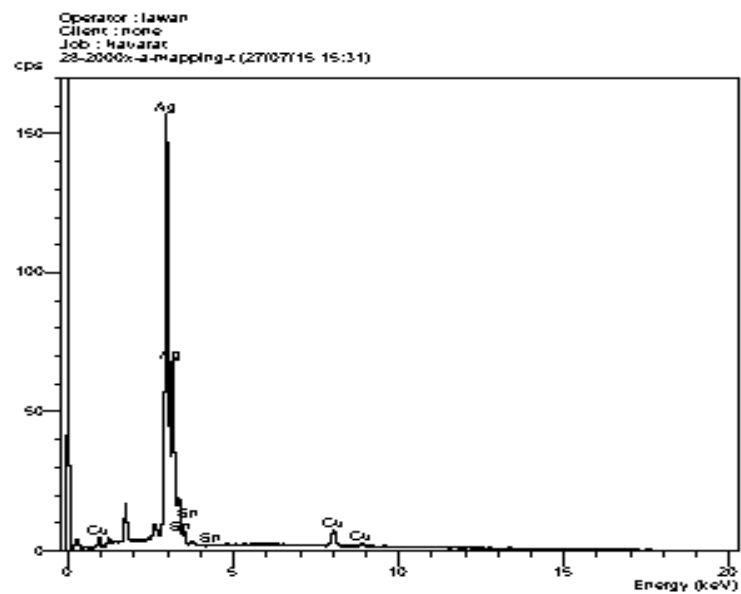
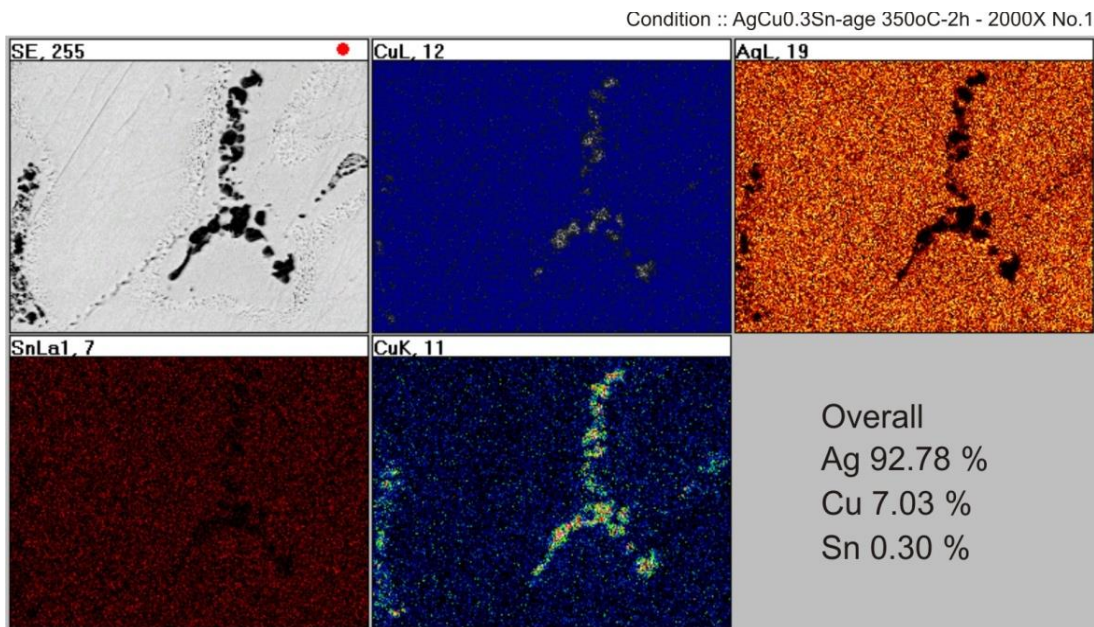
ภาพที่ ค32. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า



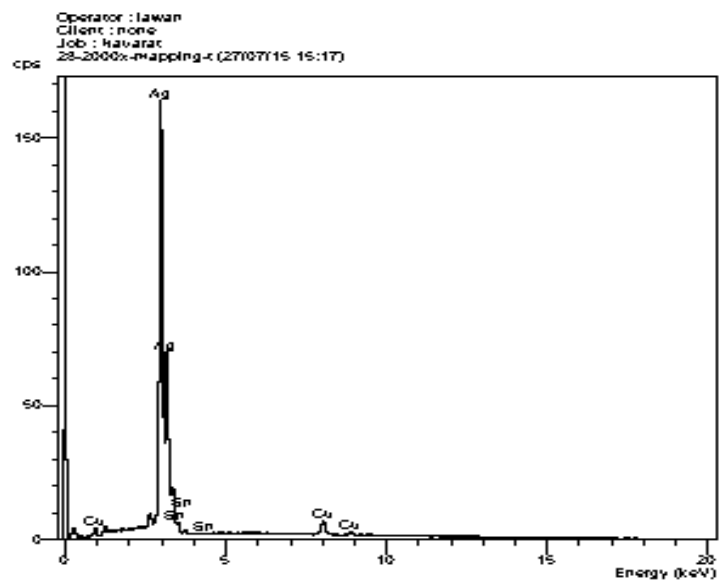
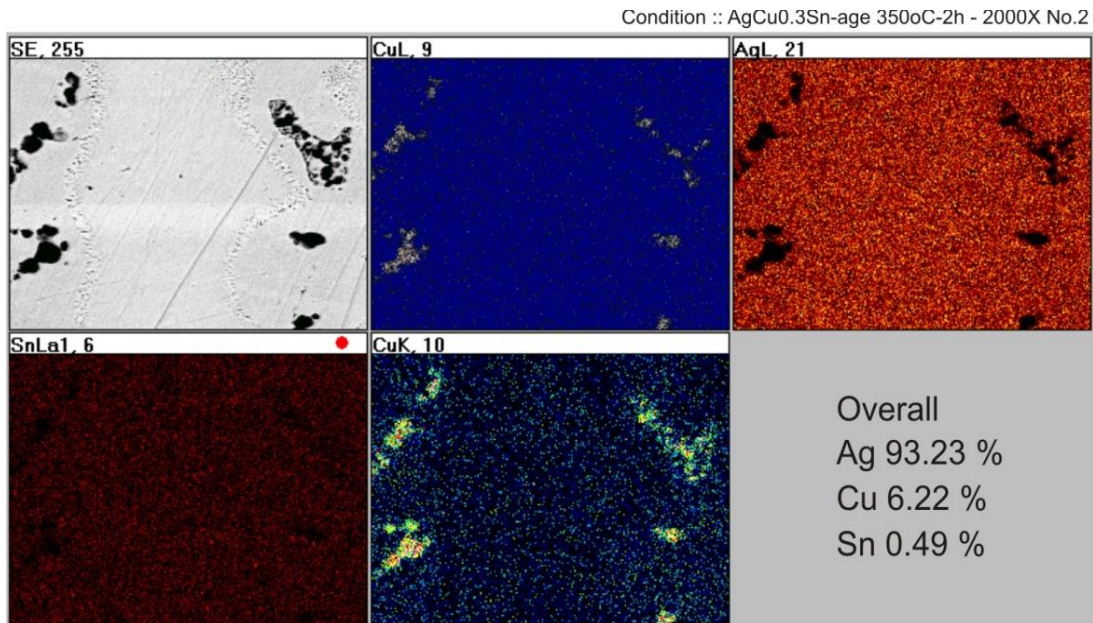
ภาพที่ ค33. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2000 เท่า



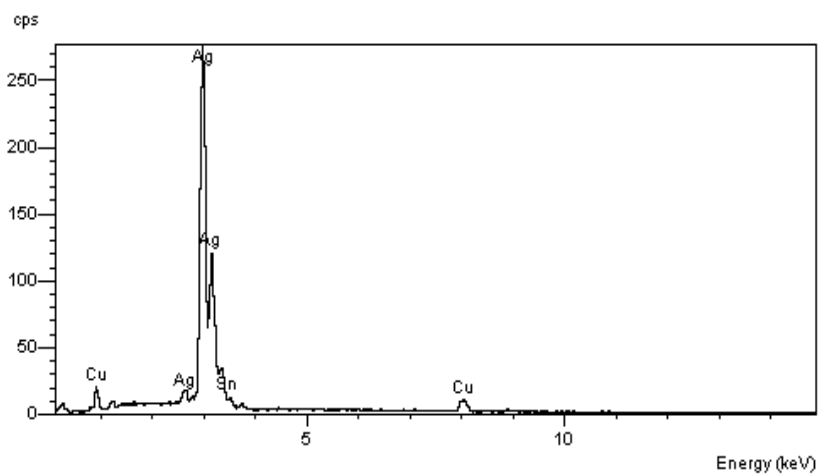
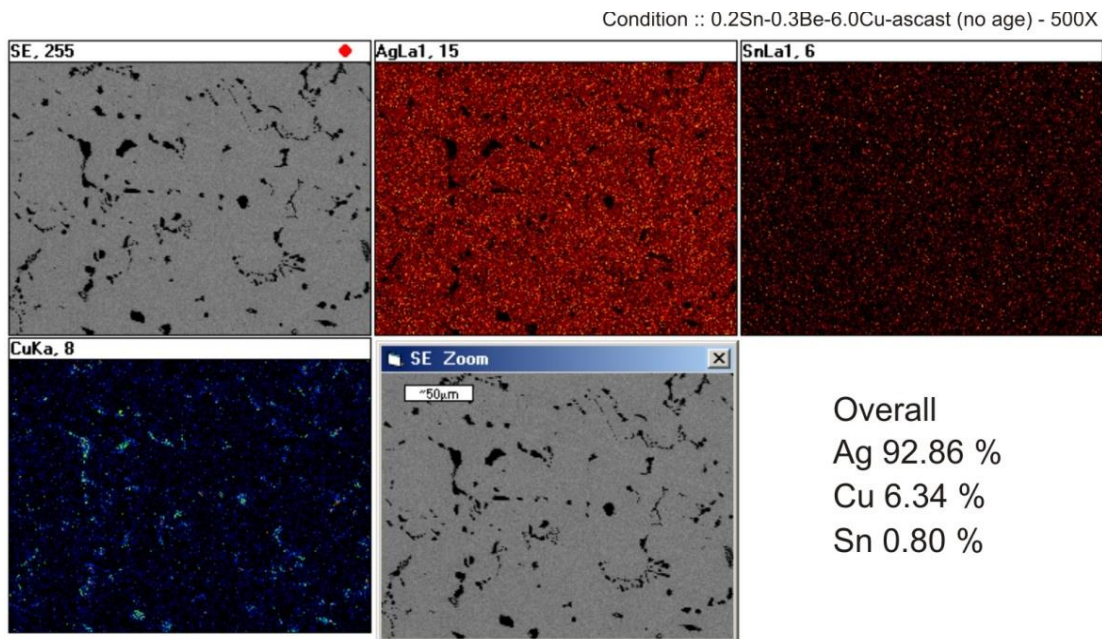
ภาพที่ ค34. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า



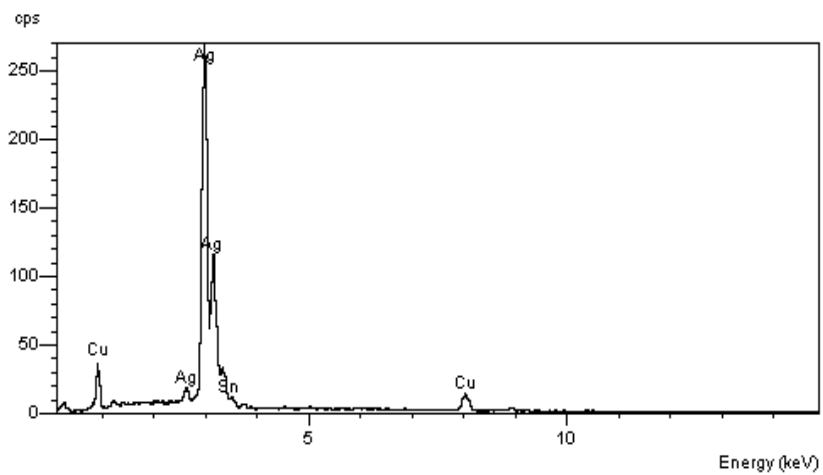
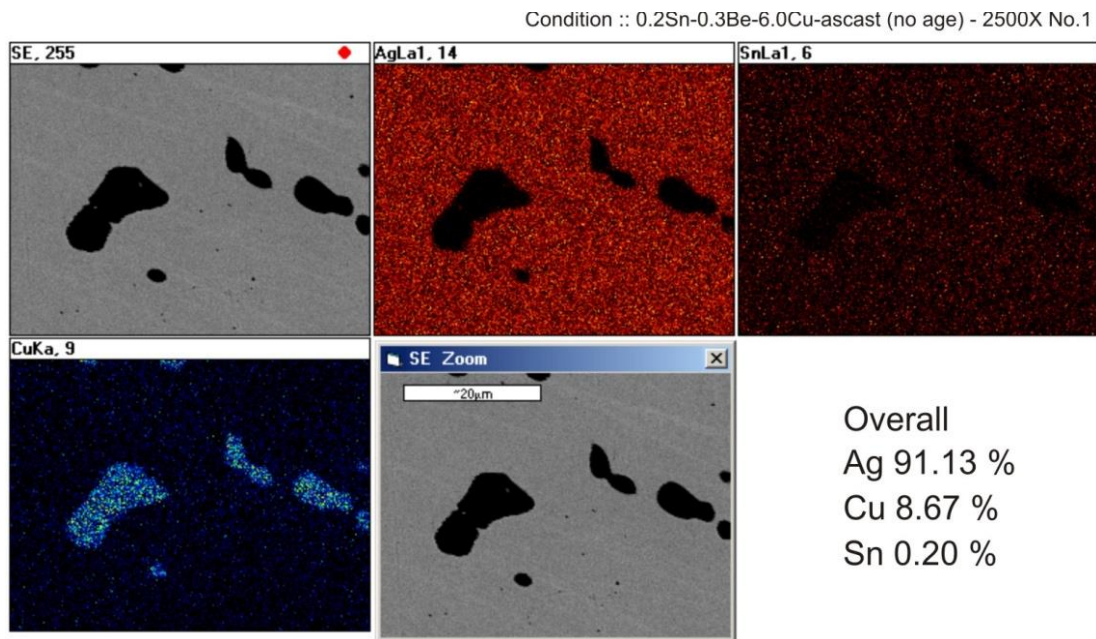
ภาพที่ ค35. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า



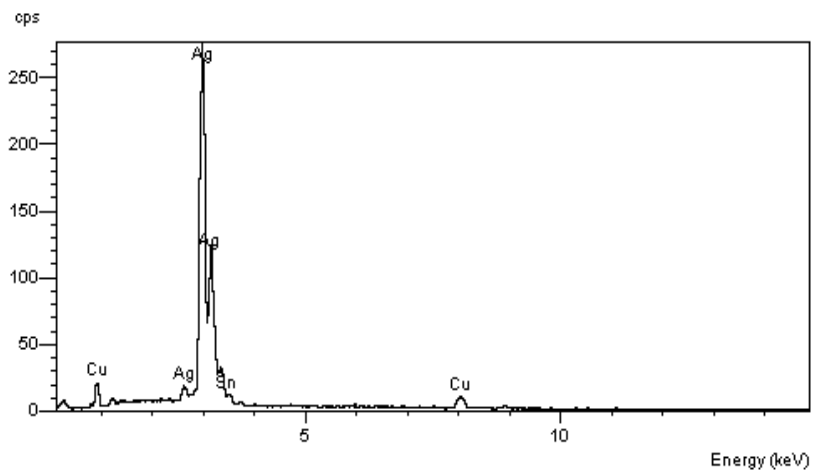
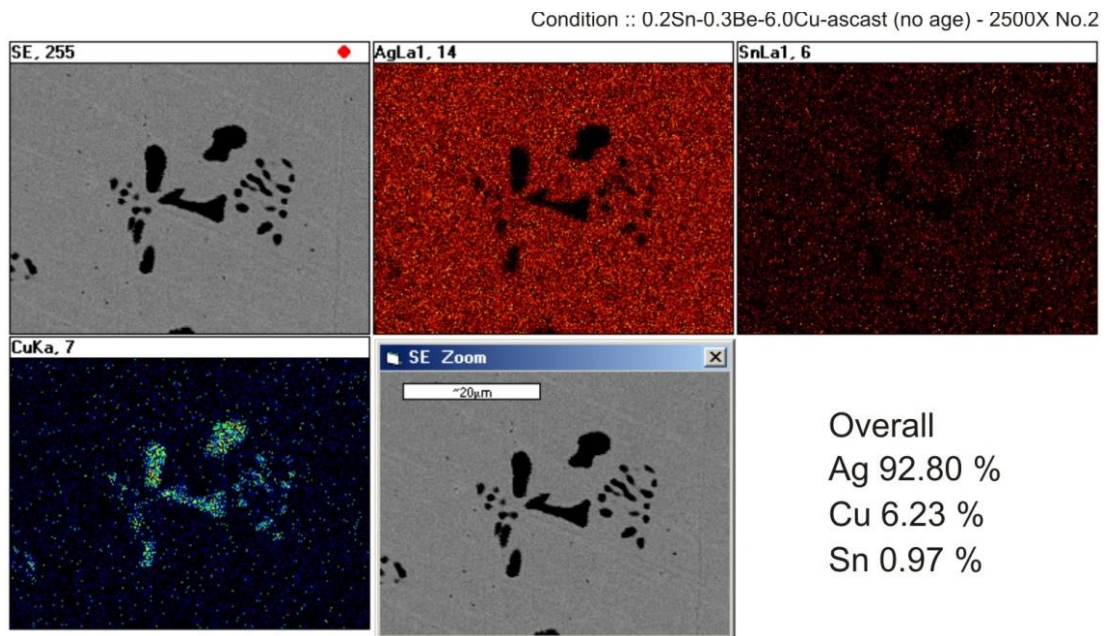
ภาพที่ ค36. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2000 เท่า



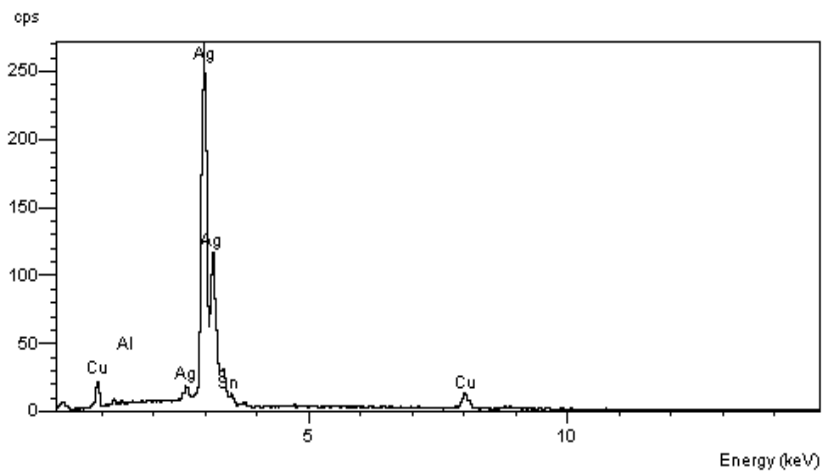
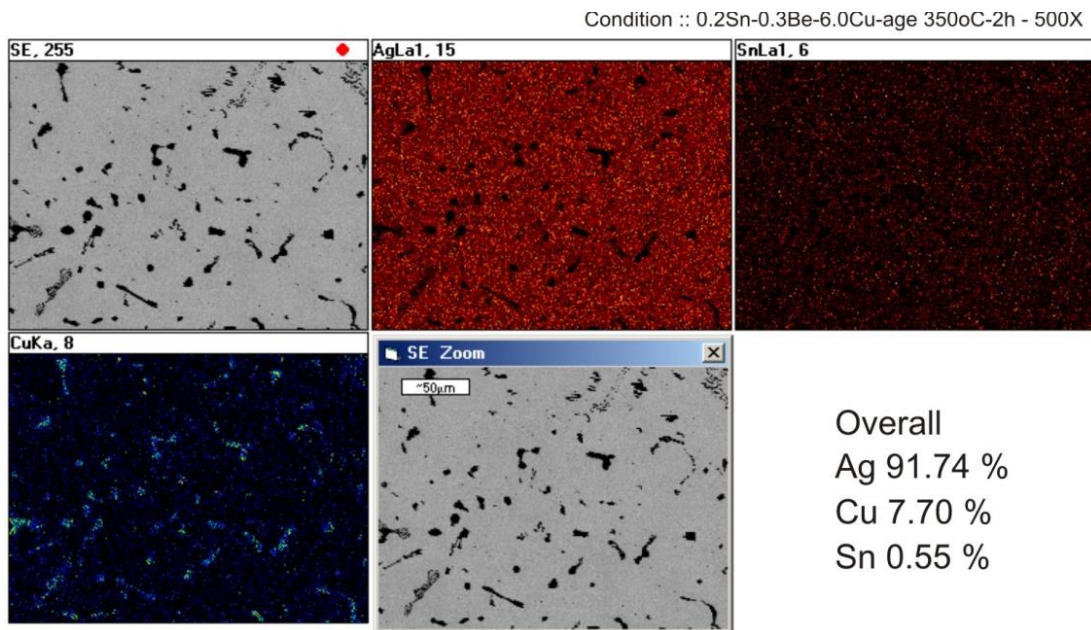
ภาพที่ ค37. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า



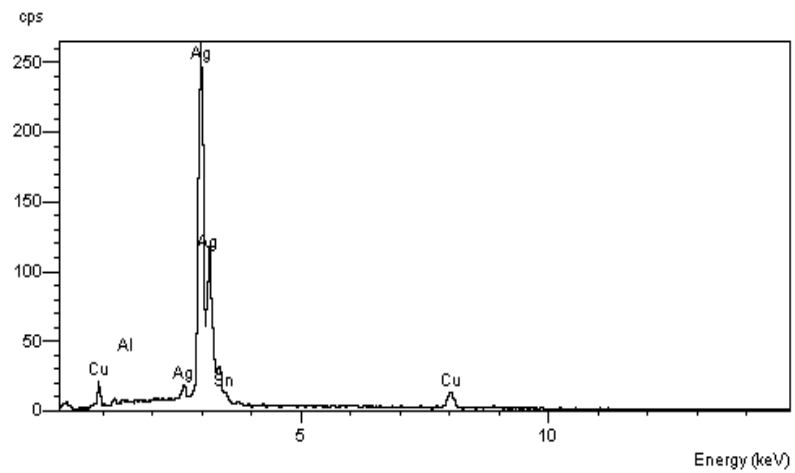
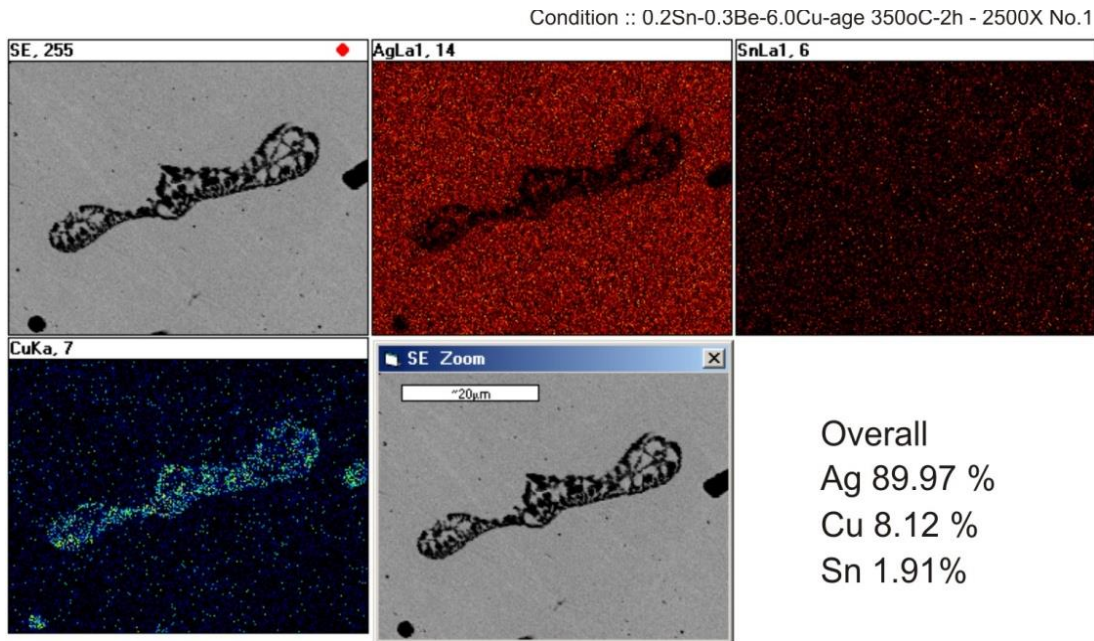
ภาพที่ ค38. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอริลิ่ง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.2}\text{Sn}$ สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า



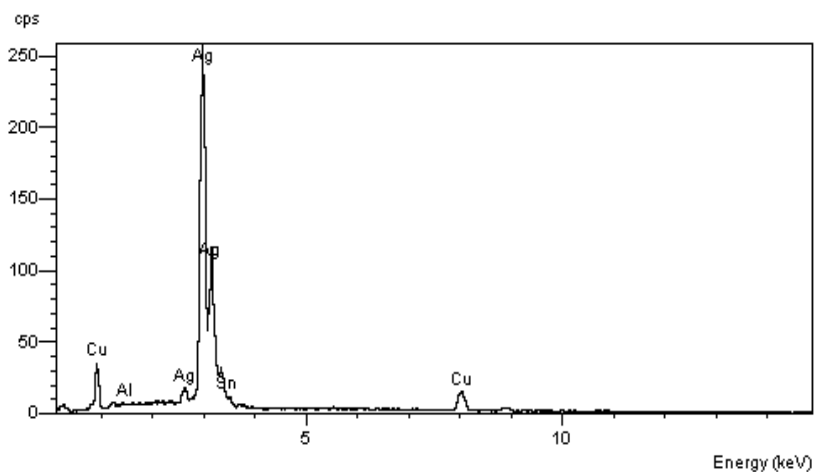
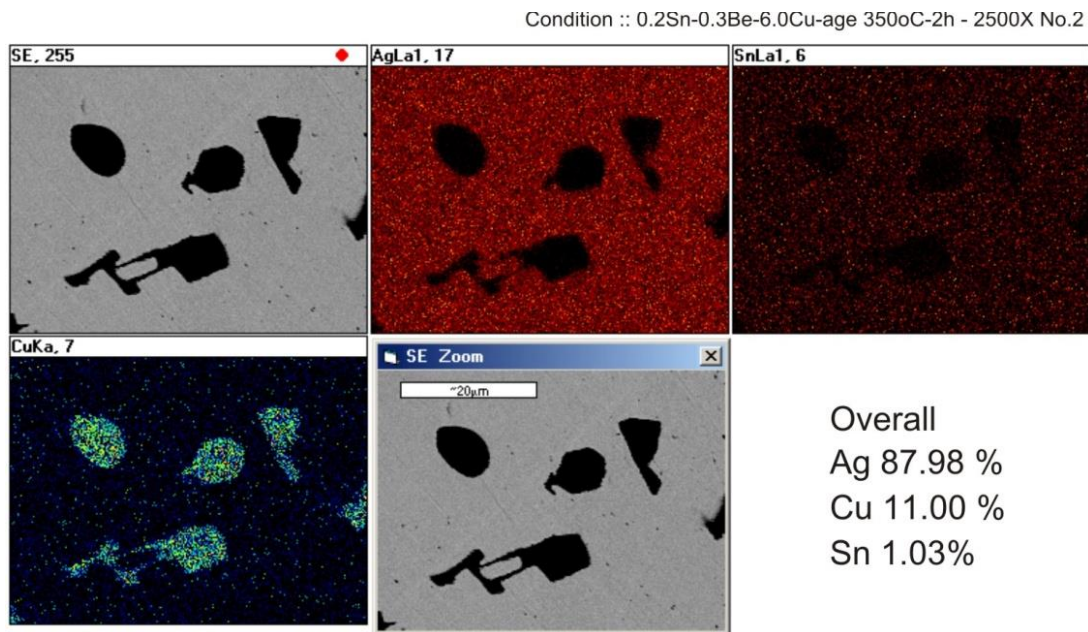
ภาพที่ ค39. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.2}\text{Sn}$ สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ ค40. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบป่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า

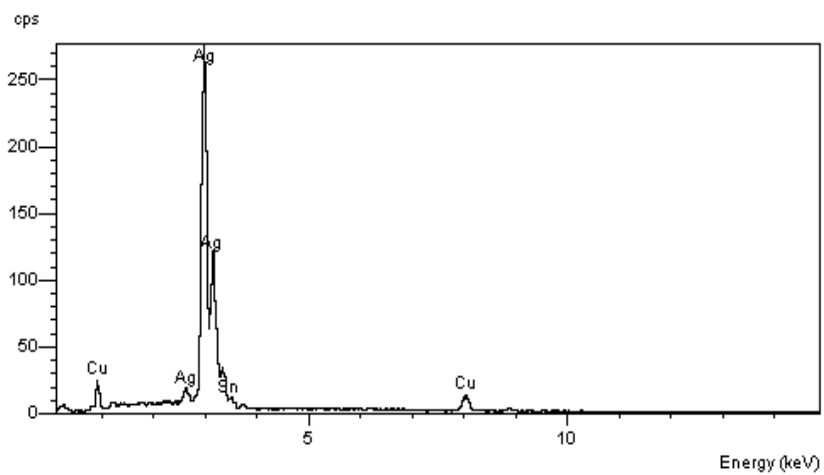
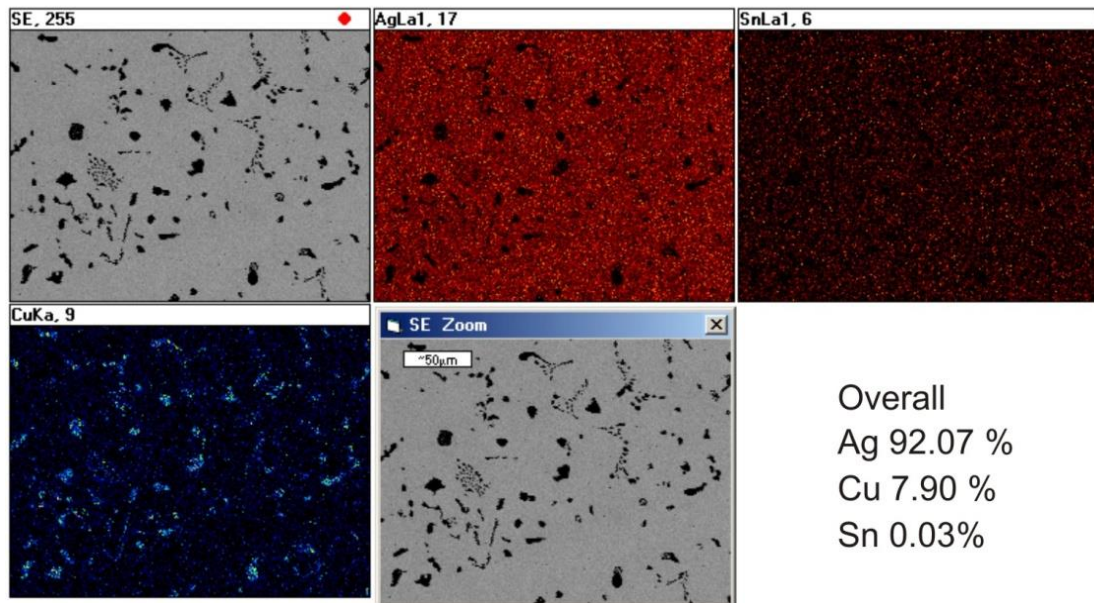


ภาพที่ ค41. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

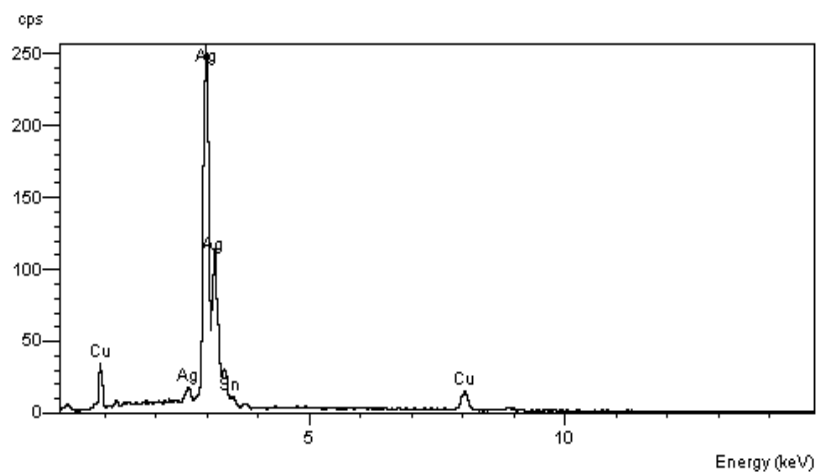
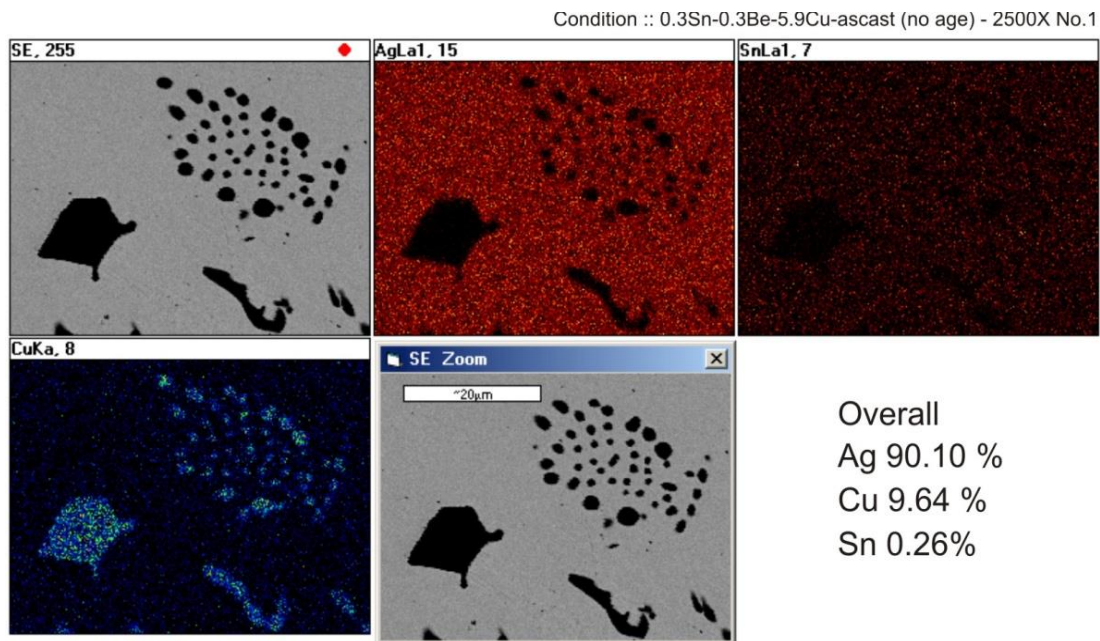


ภาพที่ ค42. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.2Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

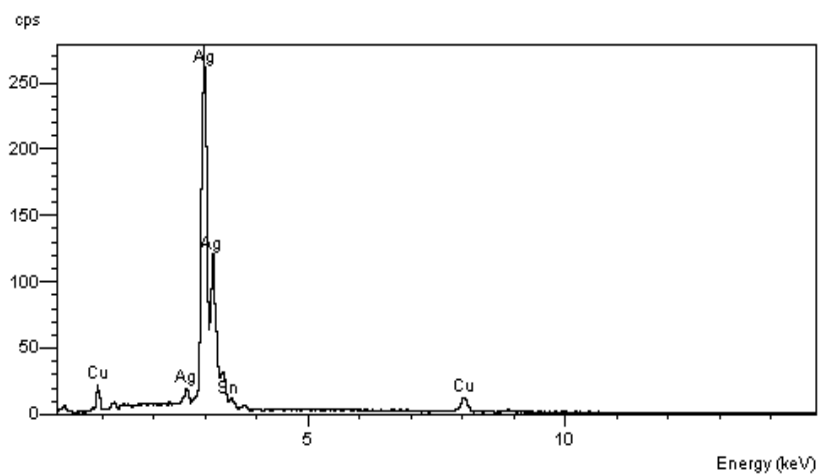
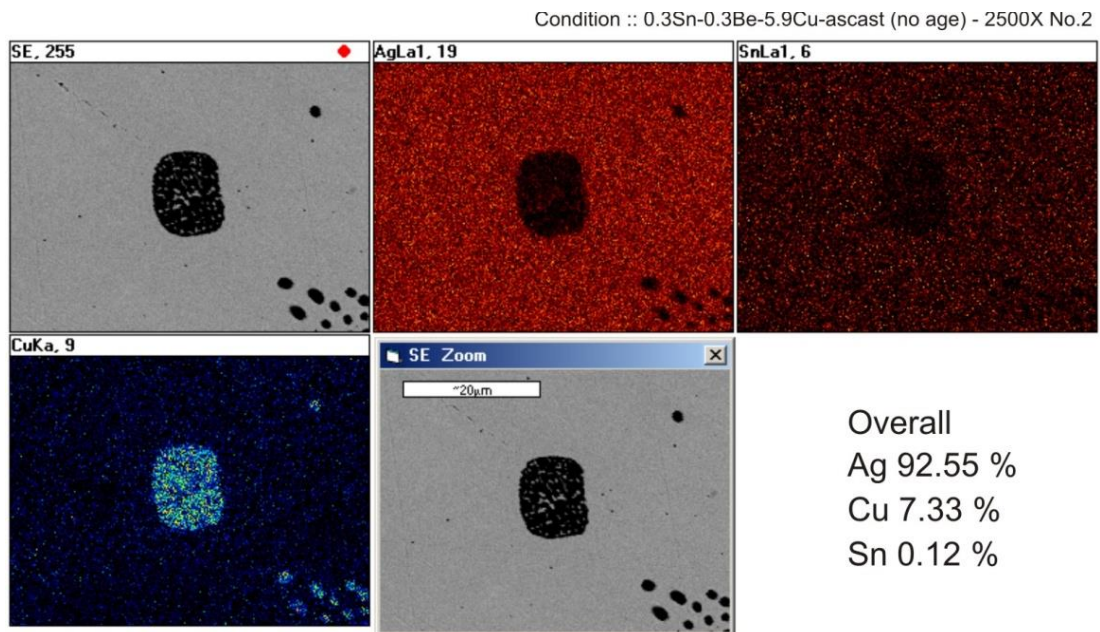
Condition :: 0.3Sn-0.3Be-5.9Cu-ascast (no age) - 500X



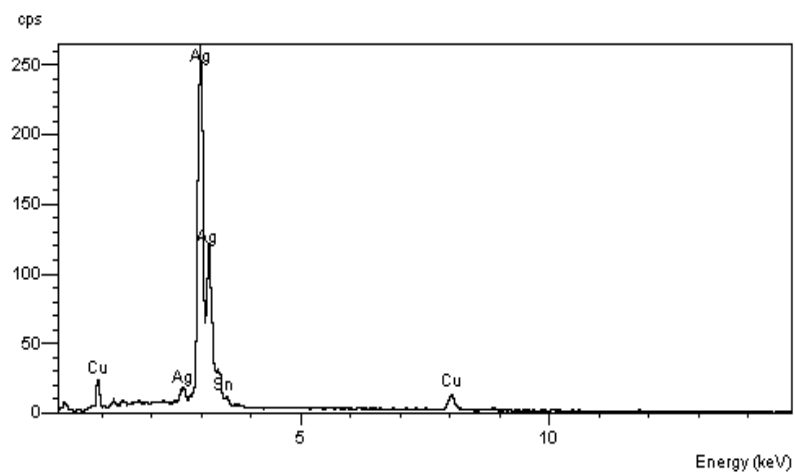
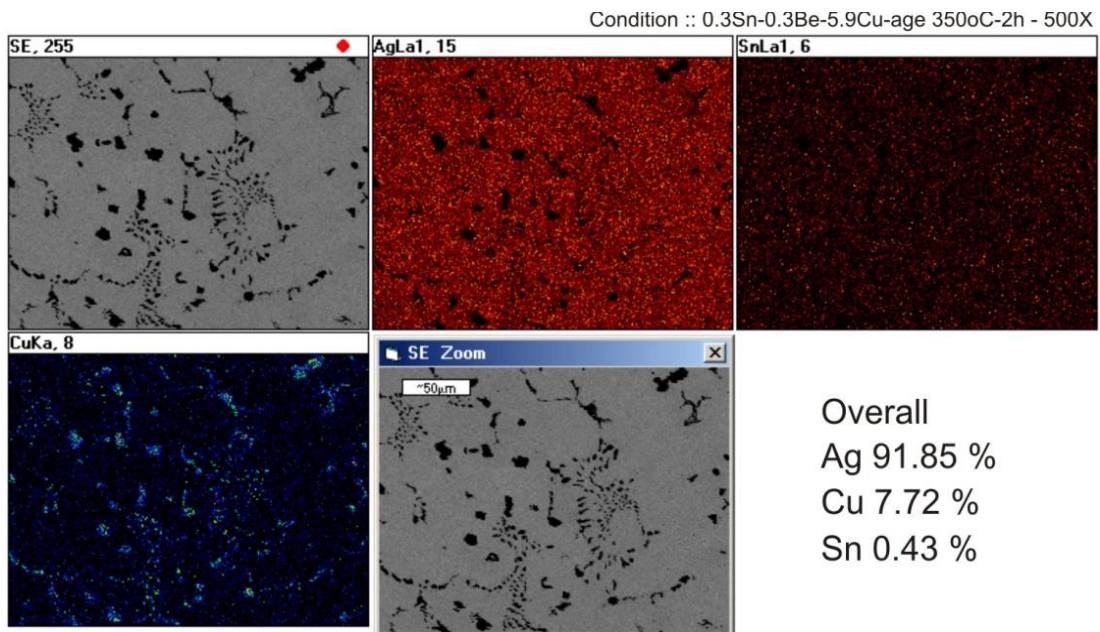
ภาพที่ ค43. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า



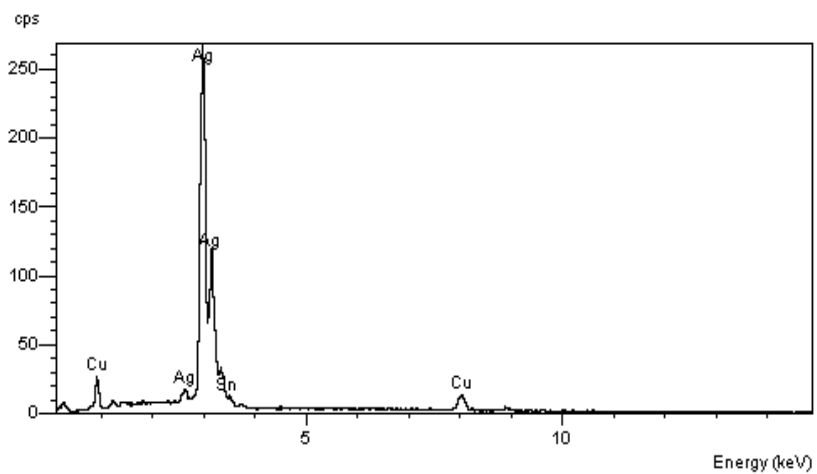
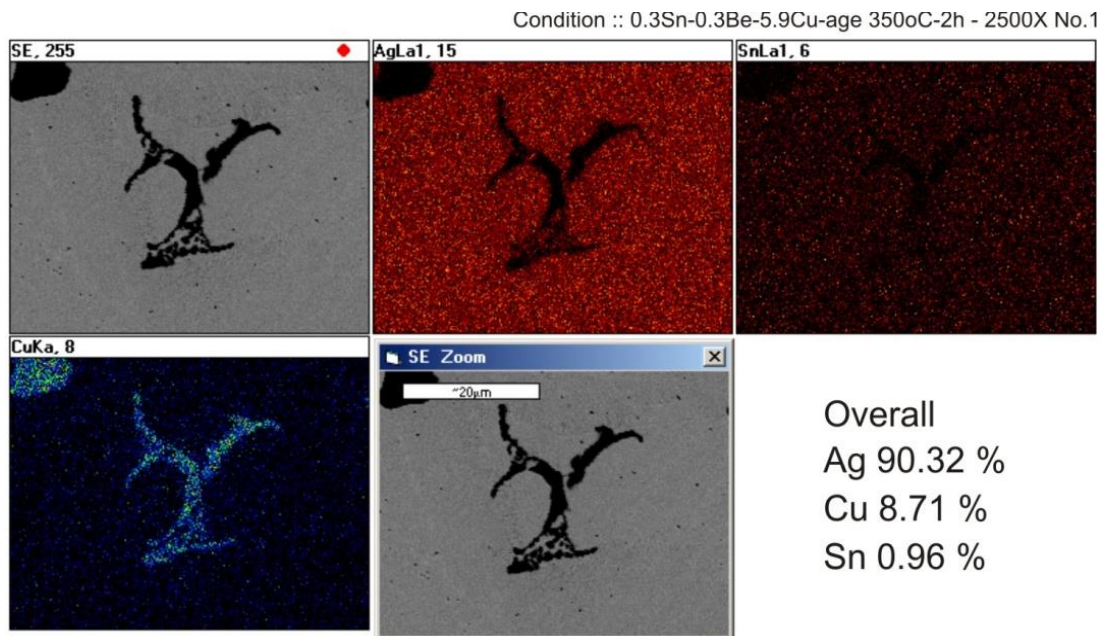
ภาพที่ ค44. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.3Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ ค45. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอริลิ่ง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.3}\text{Sn}$ สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า

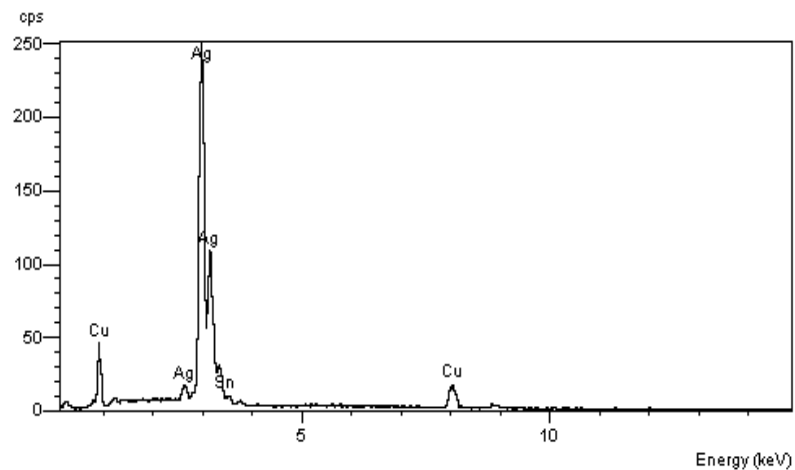
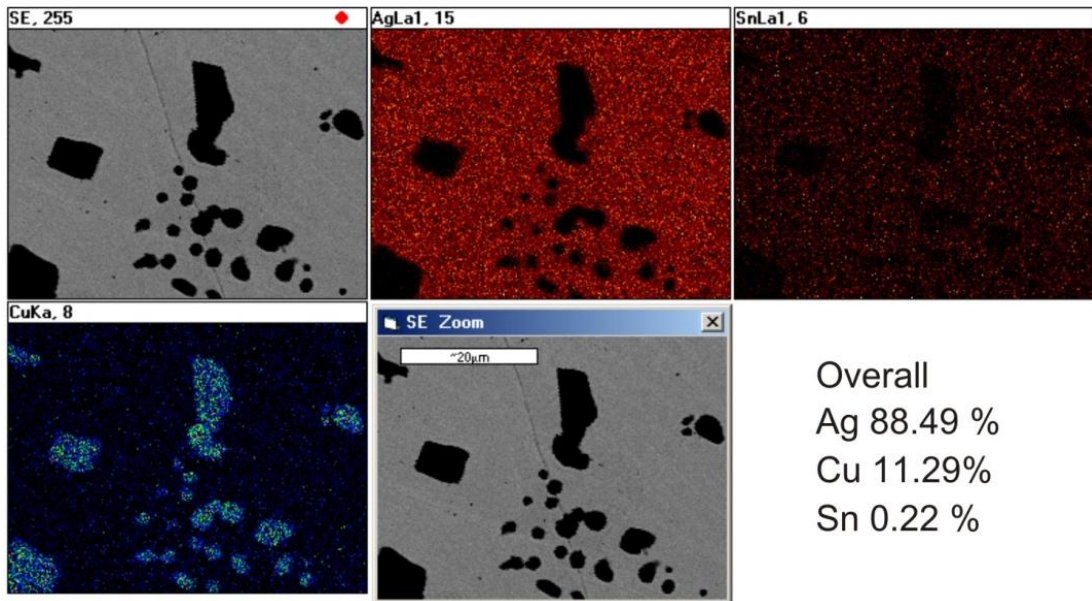


ภาพที่ ค46. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า



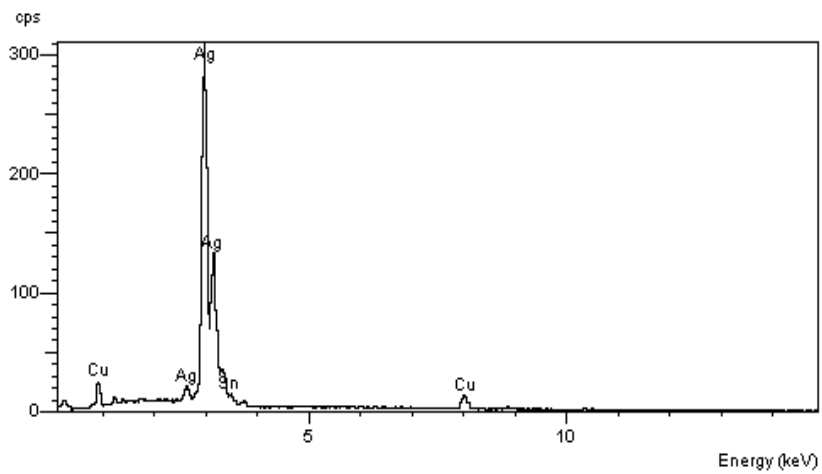
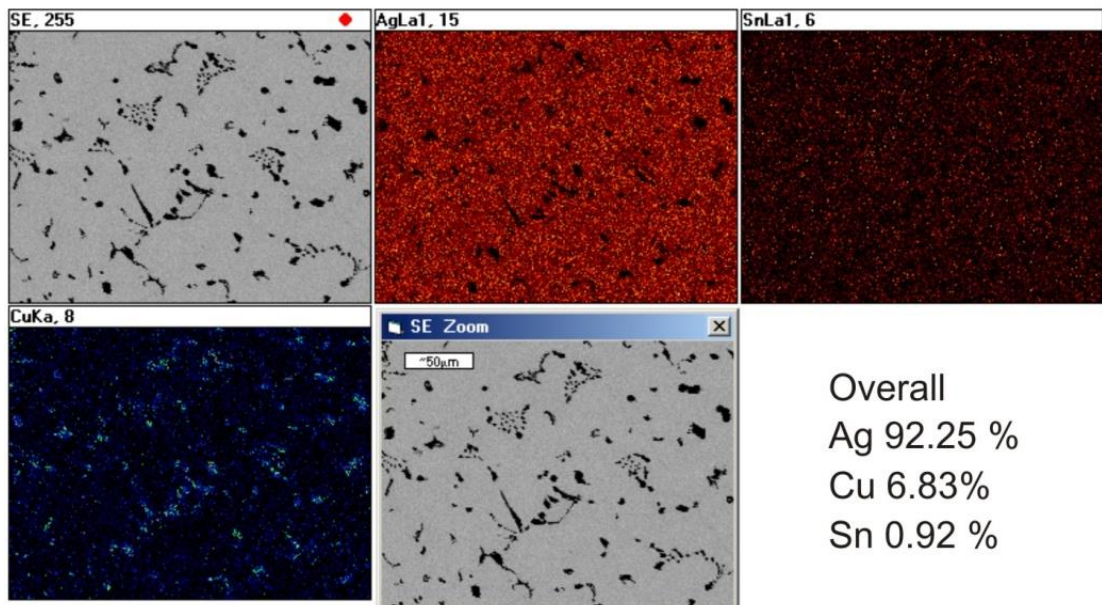
ภาพที่ ค47. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.3Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

Condition :: 0.3Sn-0.3Be-5.9Cu-age 350oC-2h - 2500X No.2

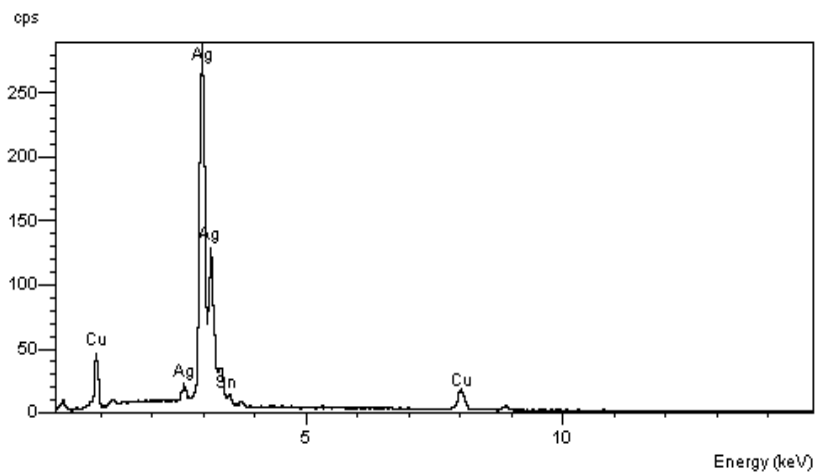
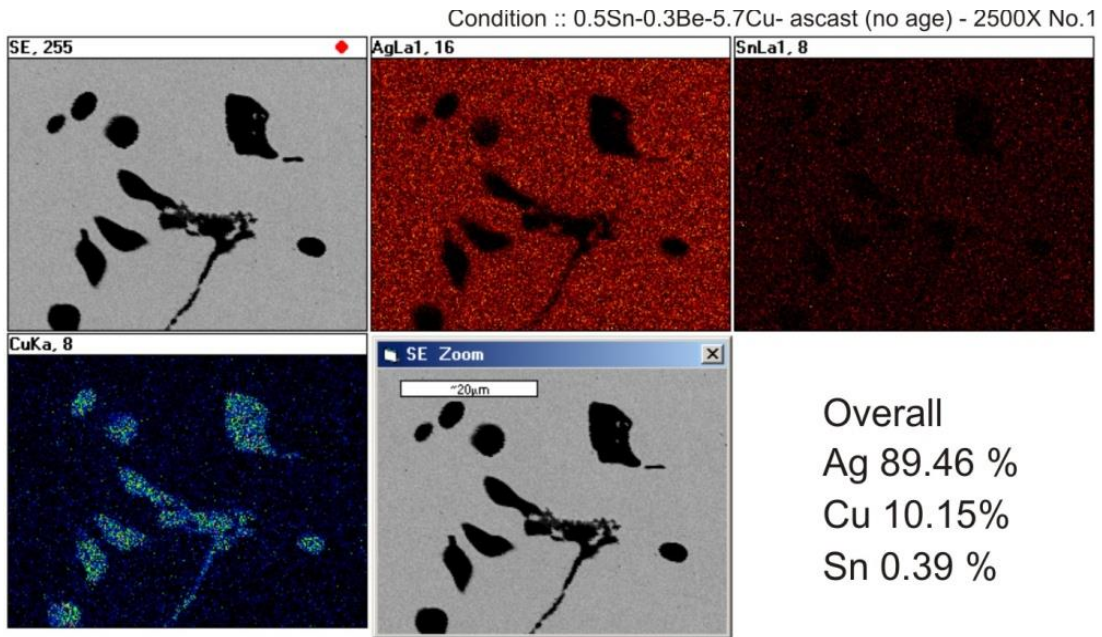


ภาพที่ ค48. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.3}\text{Sn}$ สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

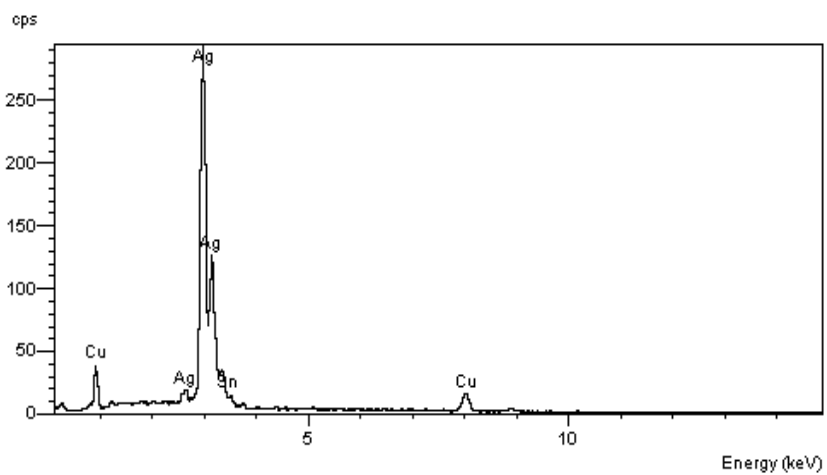
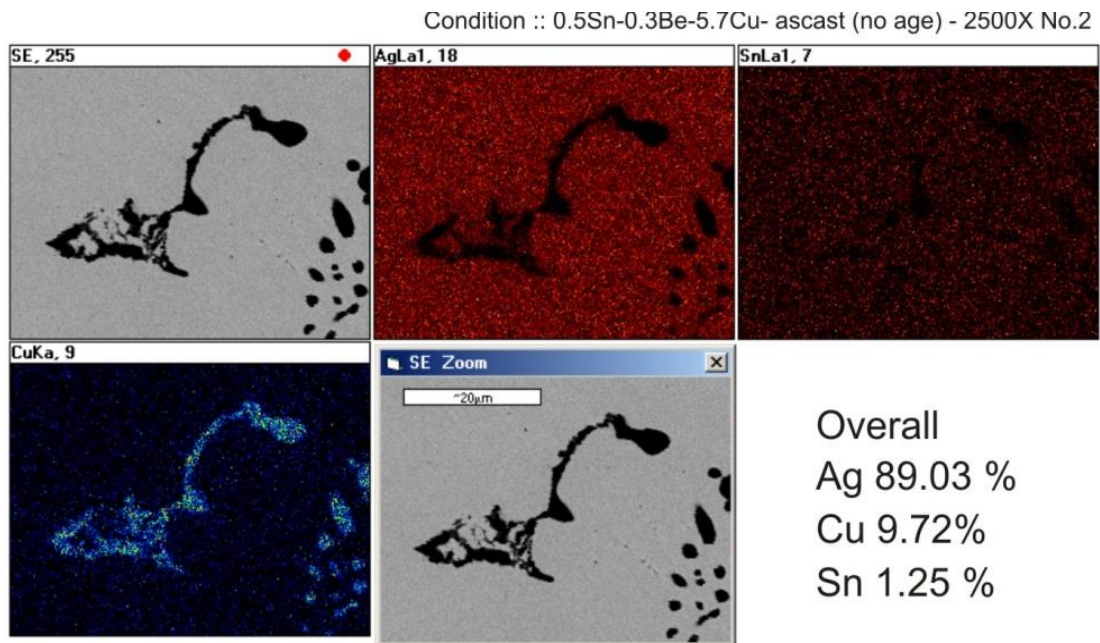
Condition :: 0.5Sn-0.3Be-5.7Cu- ascast (no age) - 500X



ภาพที่ ค49. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า

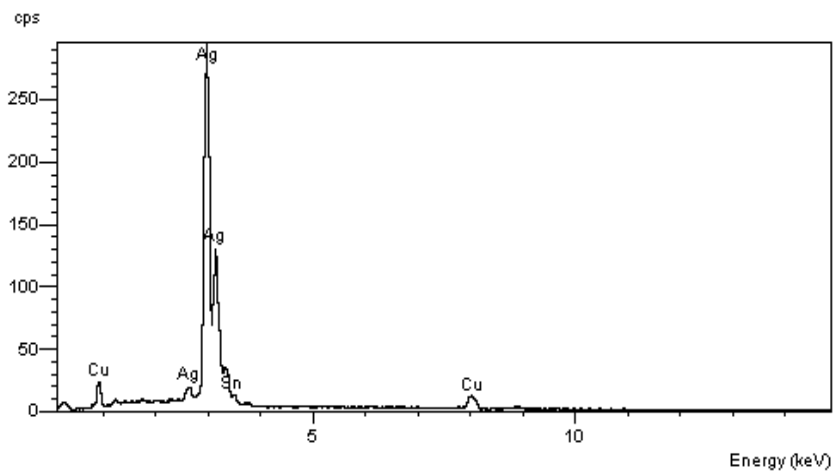
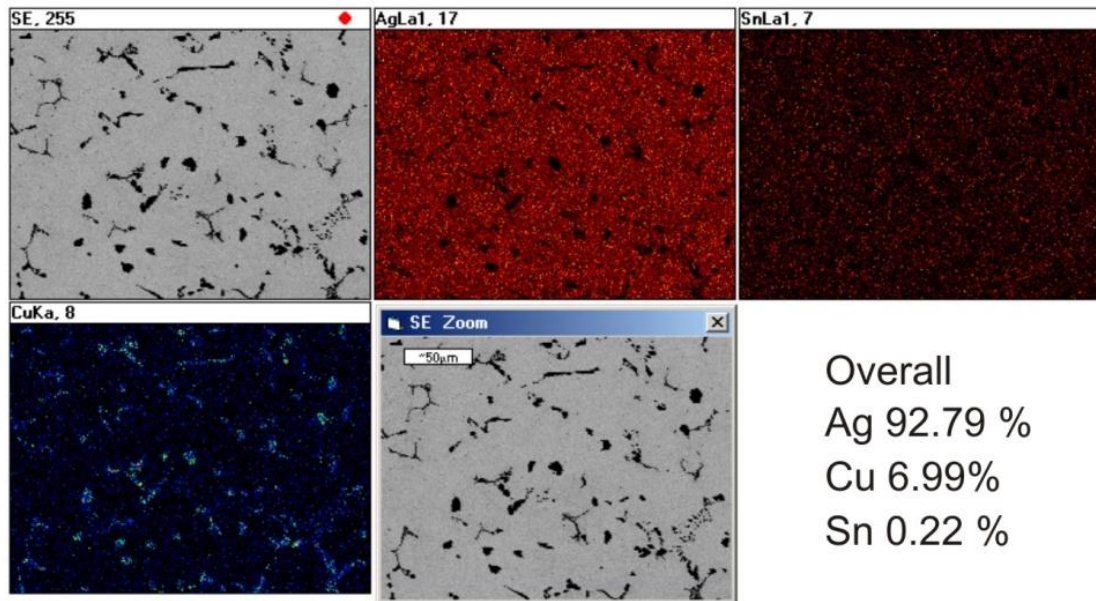


ภาพที่ ค50. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอริลิ่ง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}$ สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า

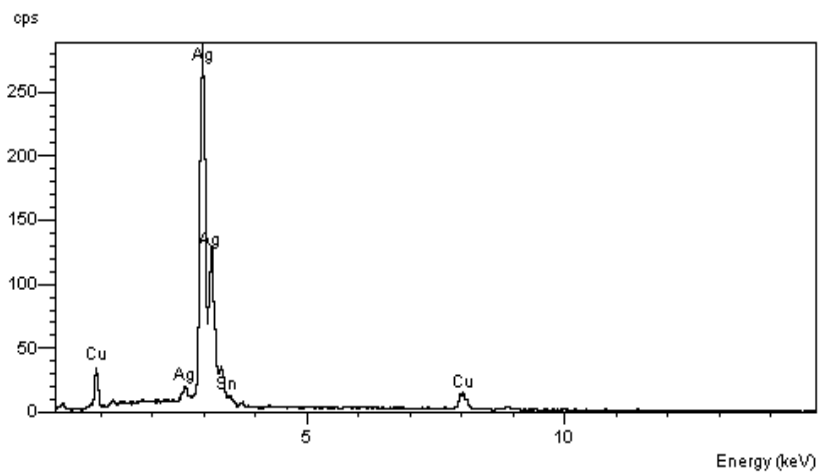
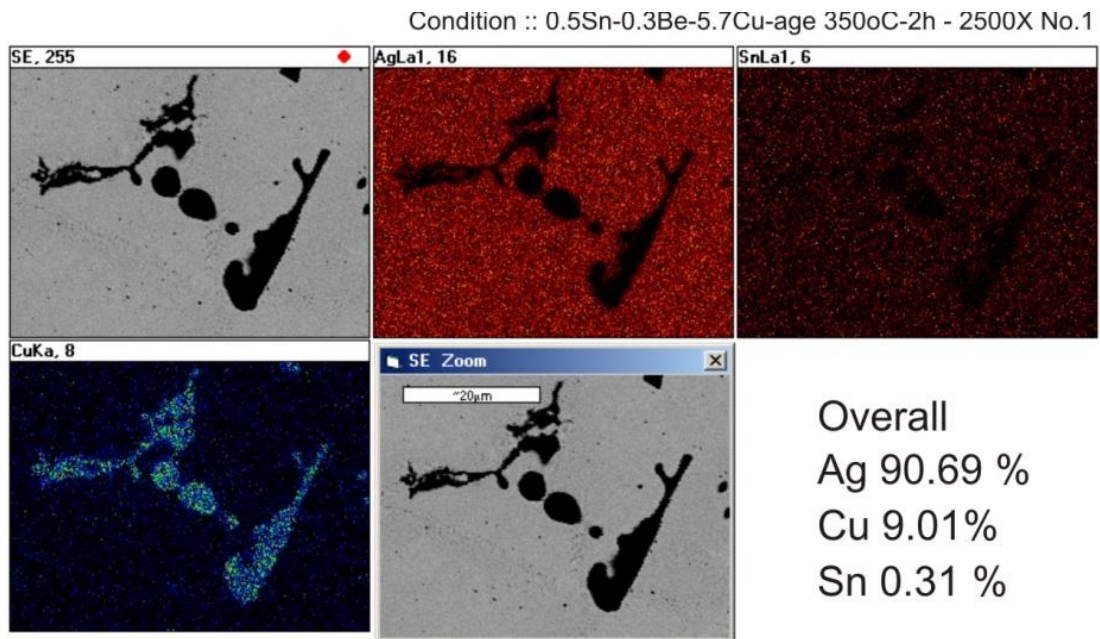


ภาพที่ ค51. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า

Condition :: 0.5Sn-0.3Be-5.7Cu-age 350oC-2h - 500X

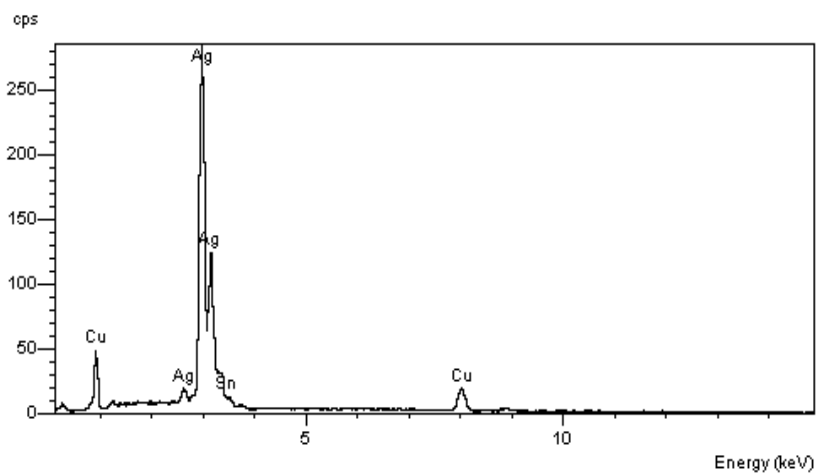
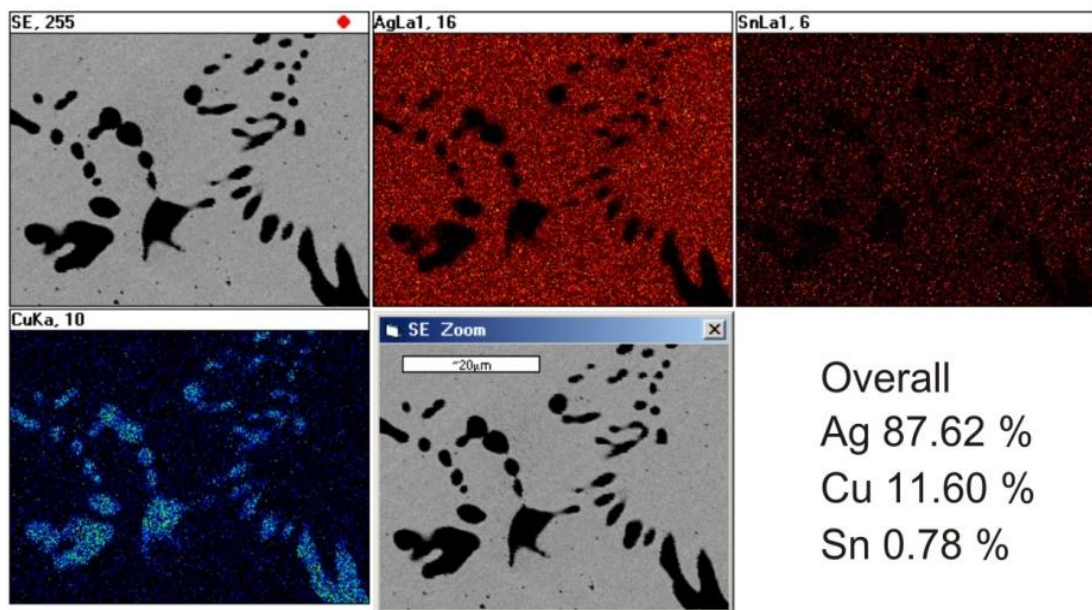


ภาพที่ ค52. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า

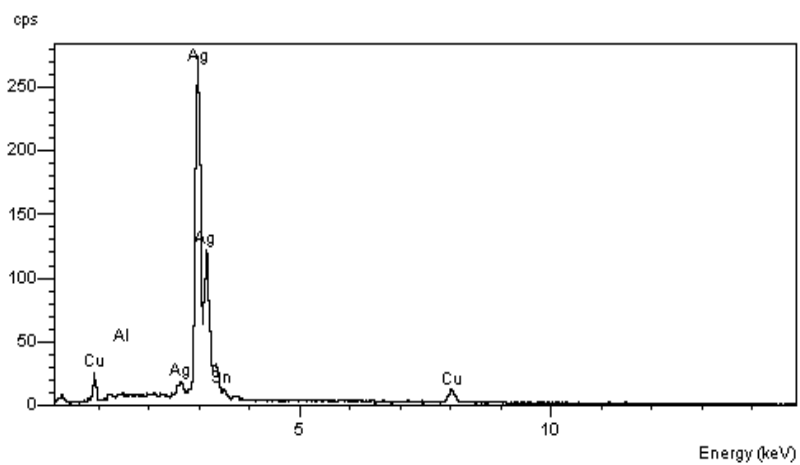
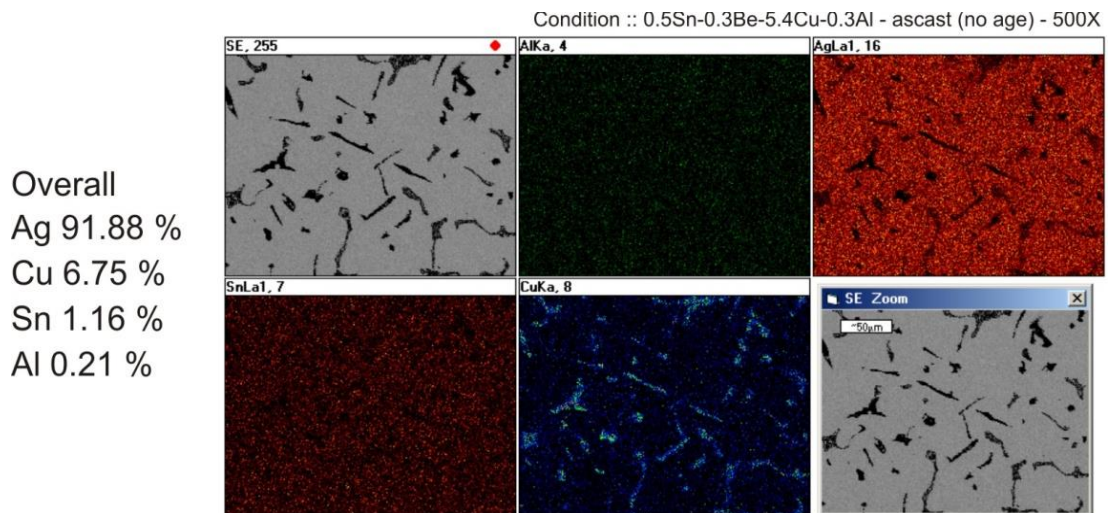


ภาพที่ ค53. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

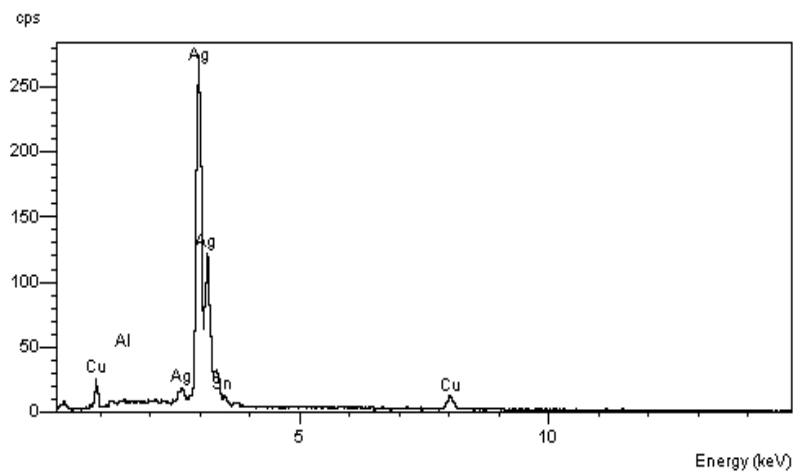
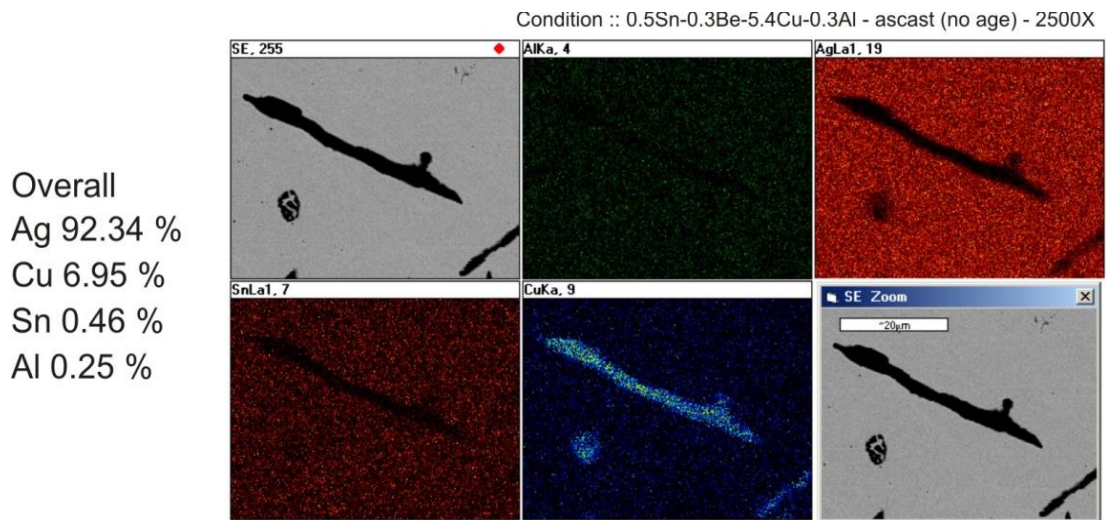
Condition :: 0.5Sn-0.3Be-5.7Cu-age 350oC-2h - 2500X No.2



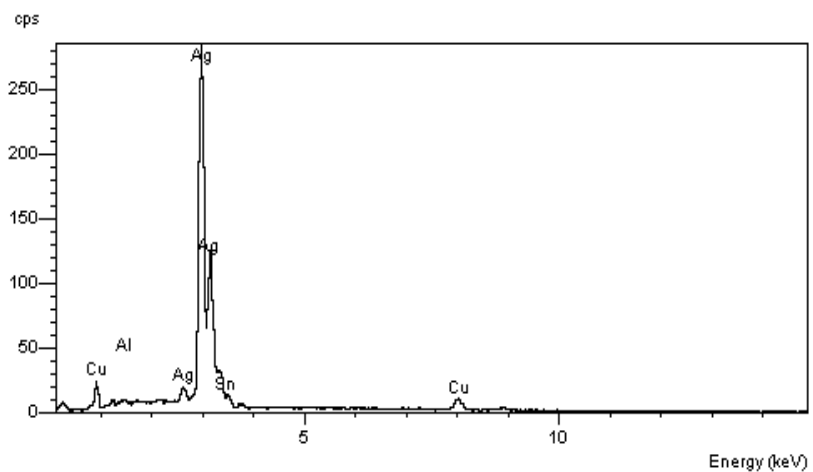
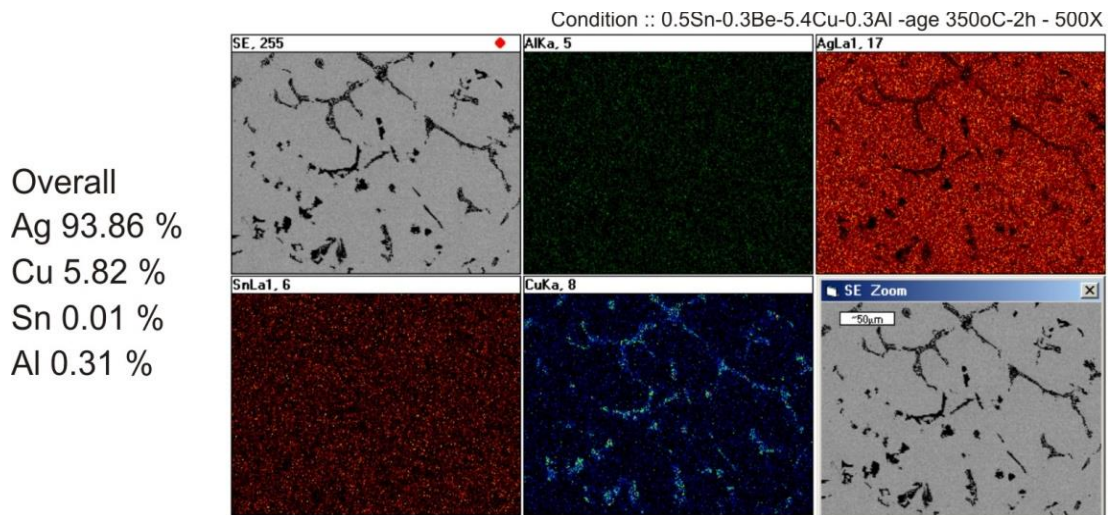
ภาพที่ ค54. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า



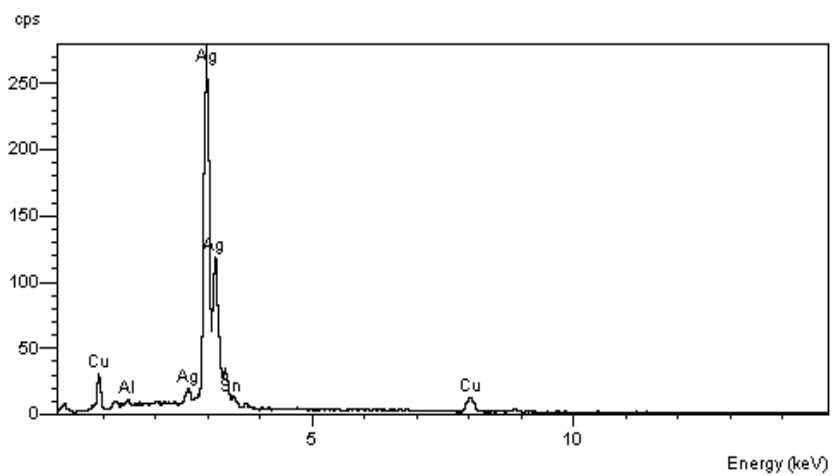
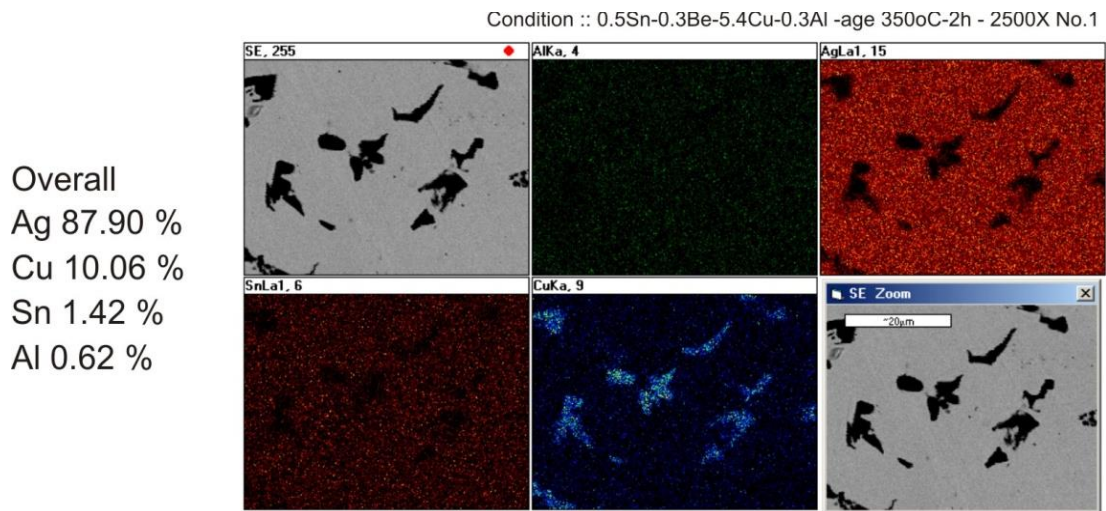
ภาพที่ ค55. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 500 เท่า



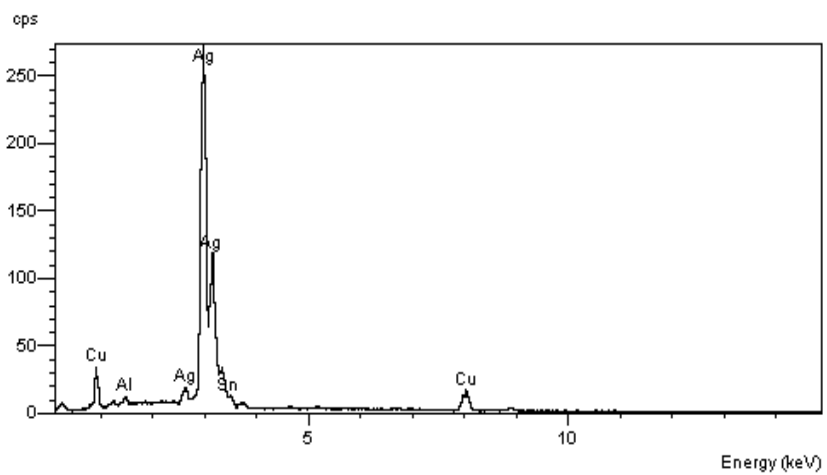
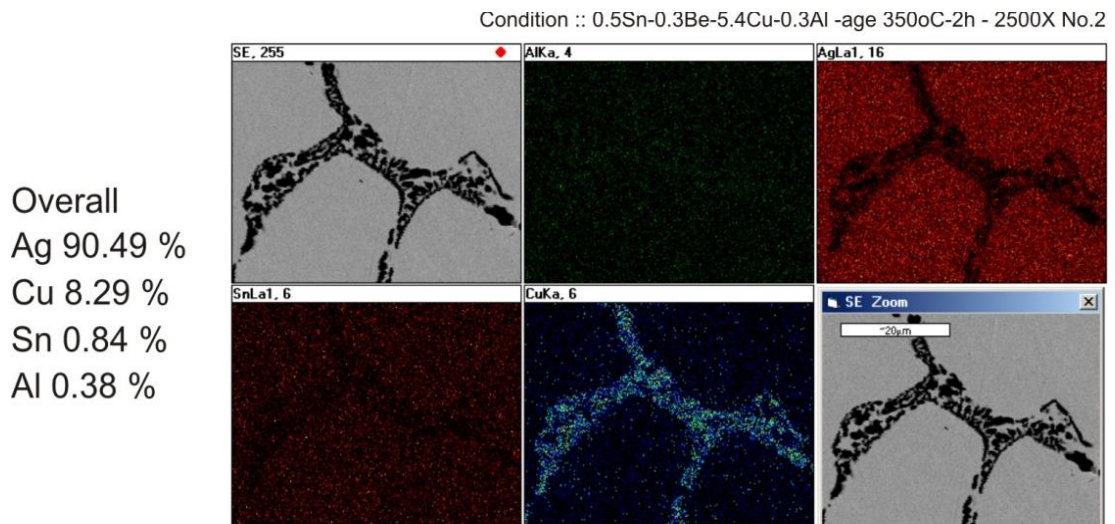
ภาพที่ ค56. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาพหลังหล่อ (As-cast) กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ ค57. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ ค58. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า



ภาพที่ ค59. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค X-ray Mapping และกราฟ EDX เพื่อดูปริมาณธาตุผสม ของชุดโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al}$ สภาวะหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 120 นาที กำลังขยาย 2500 เท่า

ภาพที่ ค60. ขนาดเกรนของชิ้นงานสภาพหลังหล่อที่ได้หลังการกัดกรดและถ่ายด้วยกล้องธรรมดา

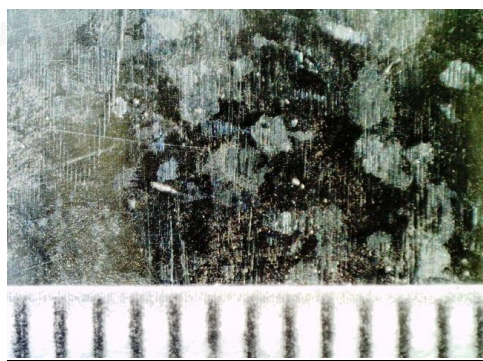


ค60 – 1. $\text{AgCu}_{0.3}\text{Sn-Ascast}$

ค60 – 2. $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al-Ascast}$



ภาพที่ ค61. ขนาดเกรนของชิ้นงานสภาพหลังหล่อหลังการกัดกรดและถ่ายภาพด้วยกล้อง LCD



ค61 – 1. $\text{AgCu}_{0.3}\text{Sn-Ascast}$

ค61 – 2. $\text{AgCu}_{0.3}\text{Be}_{0.5}\text{Sn}_{0.3}\text{Al-Ascast}$




































*** หมายเหตุ : 1 ช่องเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ง.




































การทดสอบสมบัติการต้านทานการหมองแสดงสีและความหมอง
ก่อน – หลังการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
















































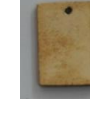








ตารางที่ 1. ชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง (เปิดเงาแล้วสภาพหลังหล่อ/หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม) - ชุดที่ 1

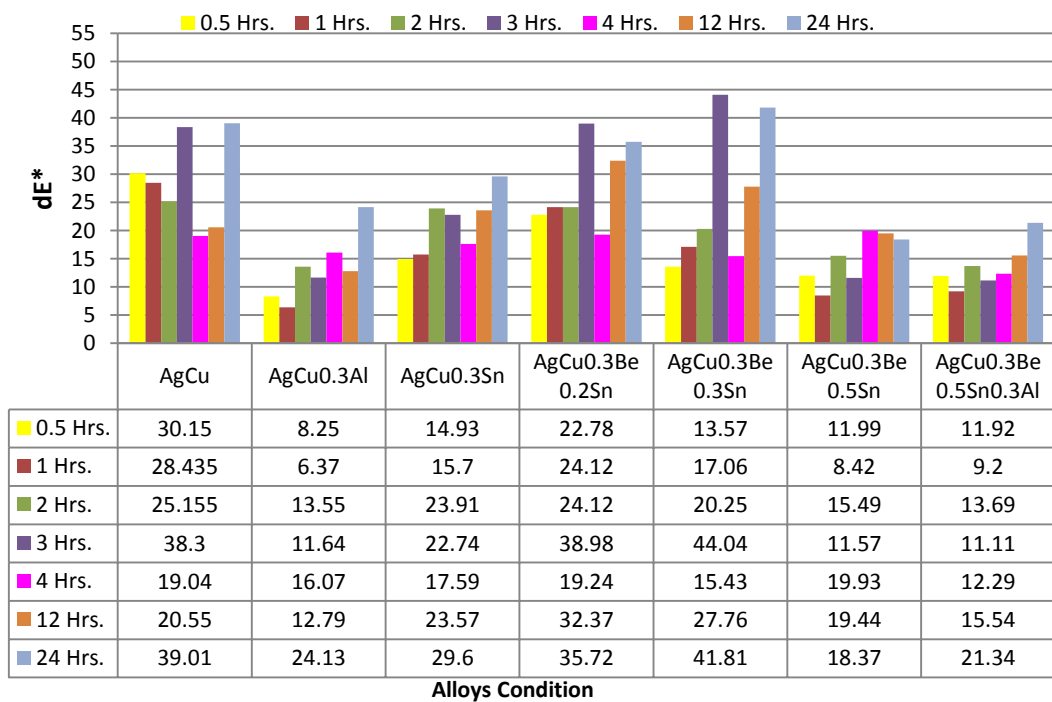
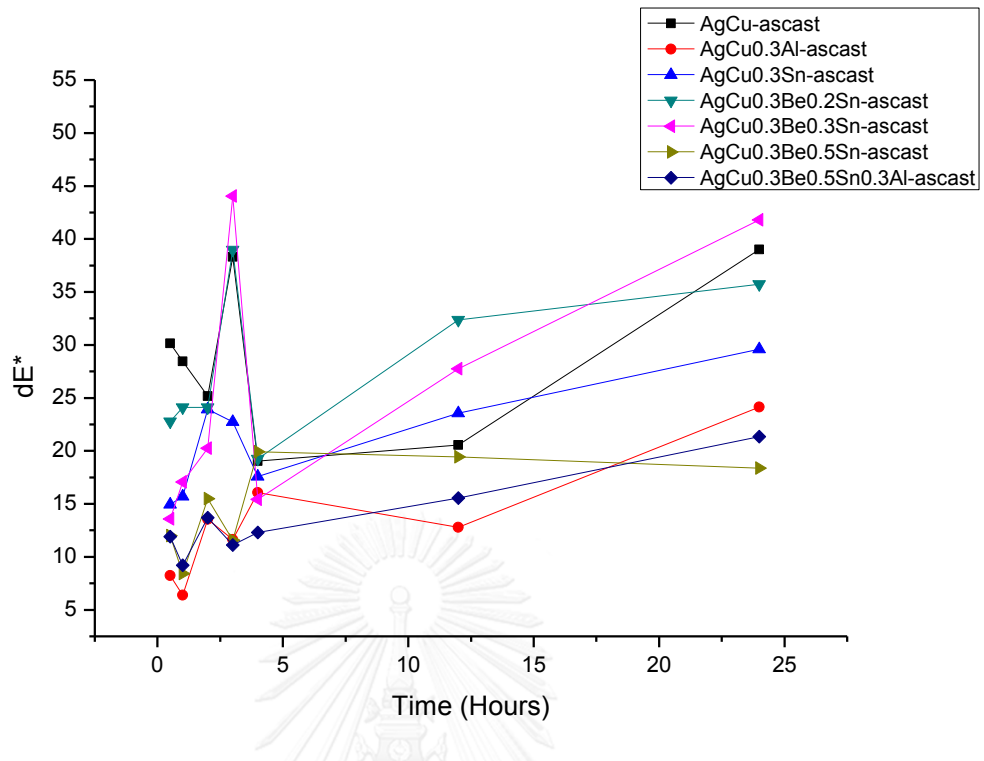
| As-cast | Age 350°C 30m | Age 350°C 60m | Age 400°C 30m | Age 400°C 60m | Condition Composition |
|---|---|---|---|--|--------------------------|
|  |  |  |  |  | AgCu |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Al |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.2Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.3Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.5Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.5Sn 0.3Al |

ตารางที่ ๒. ชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง (เปิดเงาแล้วสภาพหลังหล่อ/หลังผ่านกระบวนการอบบ่ม) - ชุดที่ 2

| As-cast | Age 350°C 30m | Age 350°C 60m | Age 400°C 30m | Age 400°C 60m | Condition Composition |
|---|---|---|---|--|--------------------------|
|  |  |  |  |  | AgCu |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Al |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.2Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.3Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.5Sn |
|  |  |  |  |  | AgCu0.3Be0.5Sn 0.3Al |































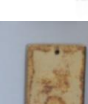
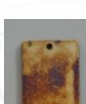
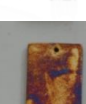























ตารางที่ 3. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง (สภาพหลังหล่อ) โดยการทดสอบใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

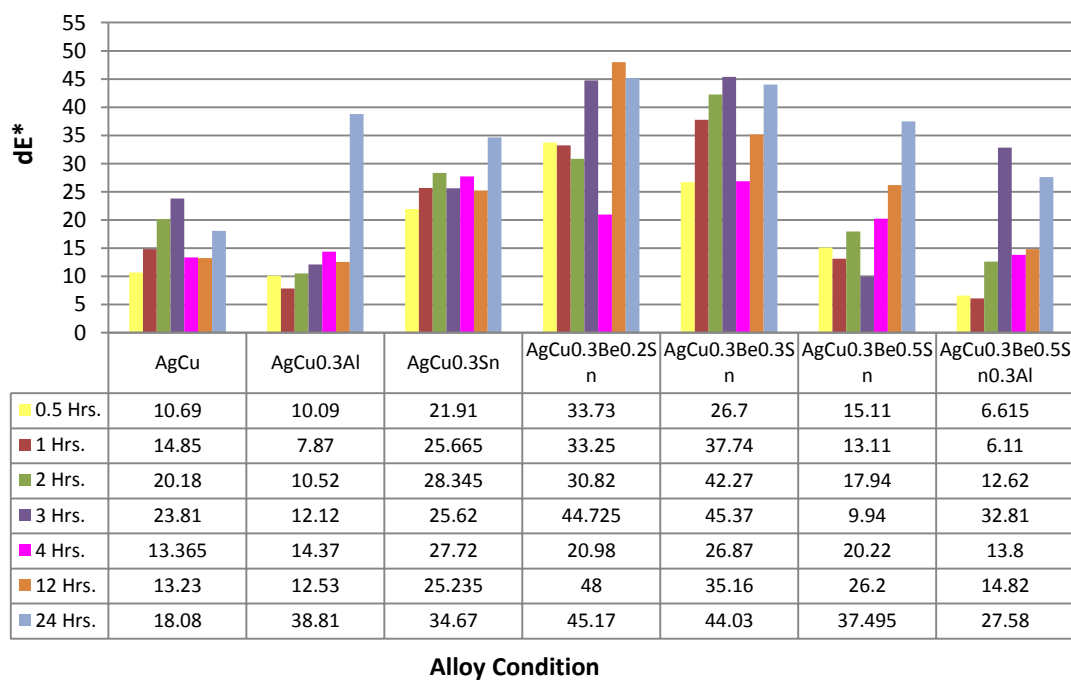
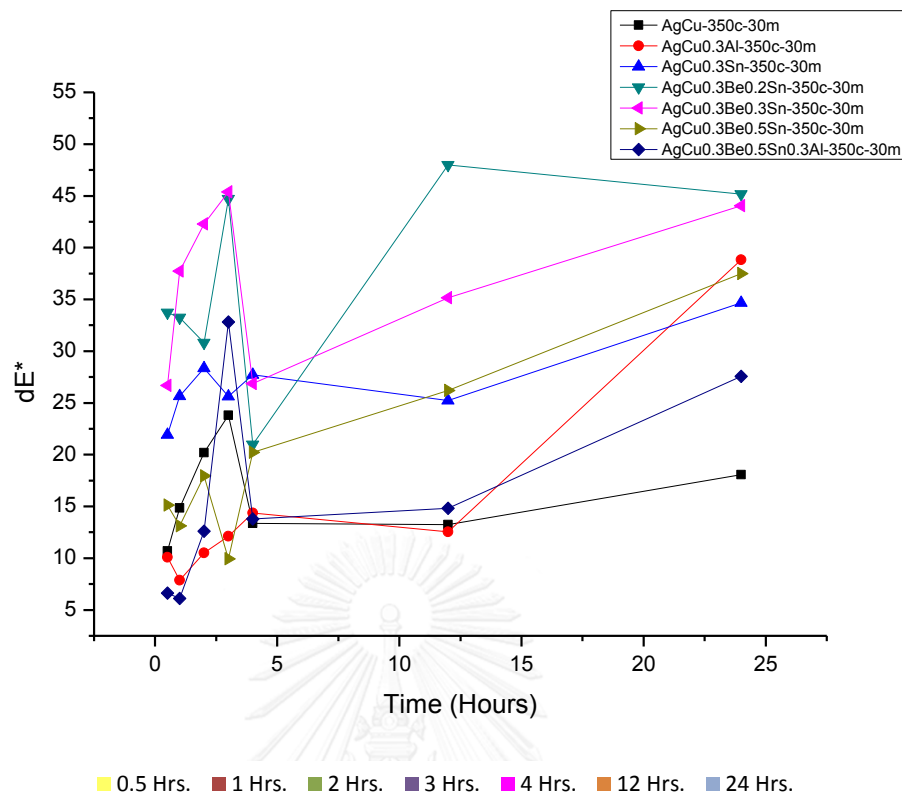
| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be 0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn | AgCu0.3 Be0.5Sn 0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|---|--|---|----------------------|
|  |  |  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 1 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น จาก 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมงในชิ้นงานสภาพหล่อ(As-cast) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด

























































ตารางที่ 4. ชี้นำงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง โดยชี้นำงานผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 30 นาที (Age 350°C – 30 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

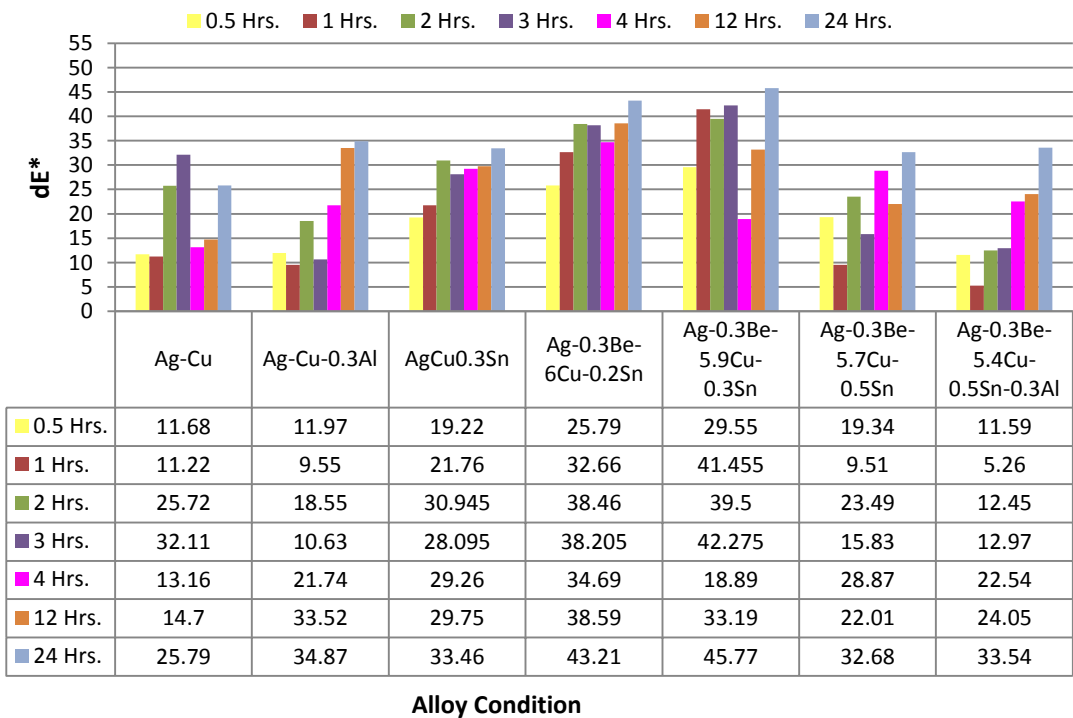
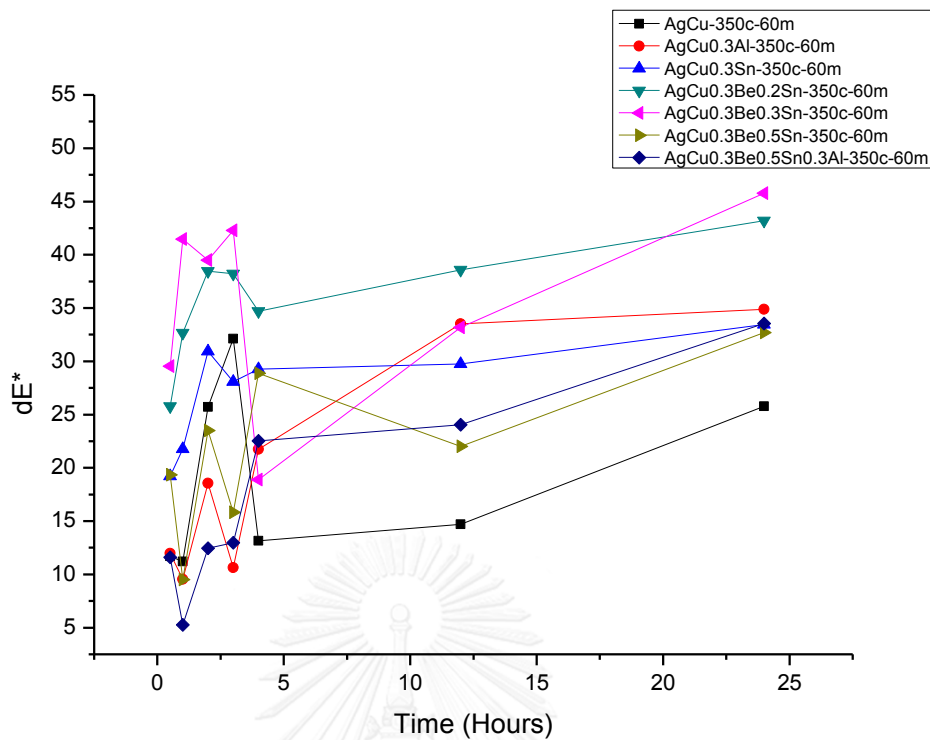
| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be 0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|---|---|---|----------------------|
|  |  |  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี dE^* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น จาก 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมงของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที (Aging 350°C , 30 min) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด





















































ตารางที่ 5. ชี้นำก่อนและหลังทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง โดยชี้นำผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที (Age 350°C – 60 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

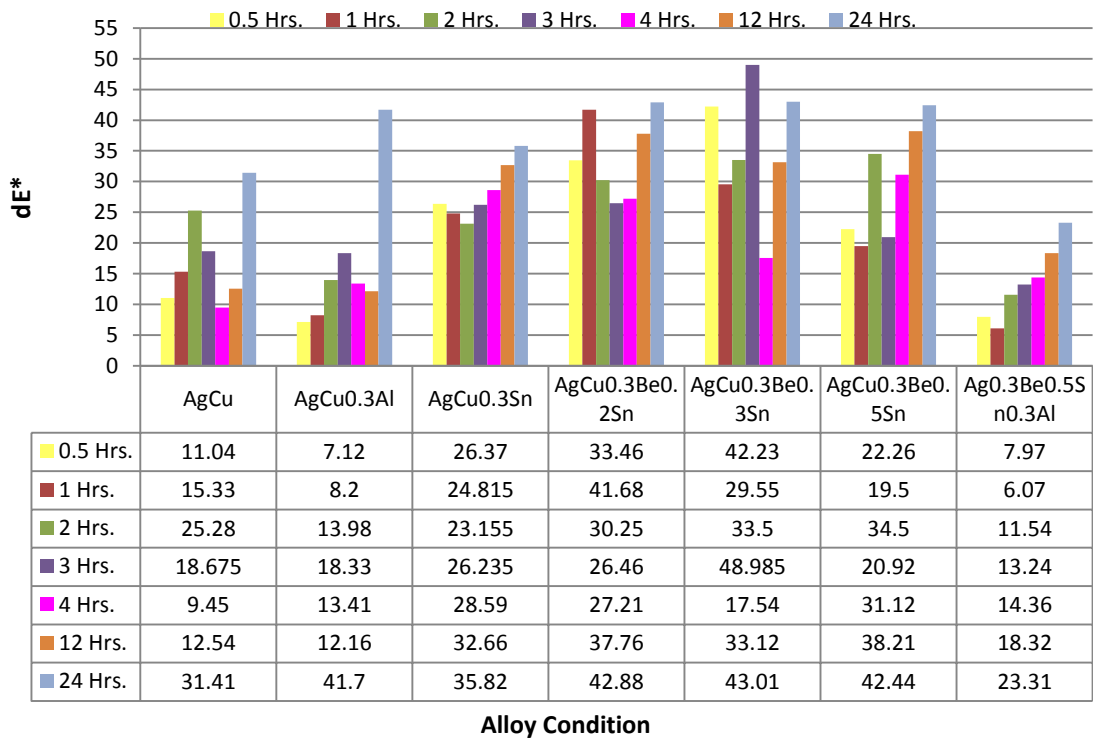
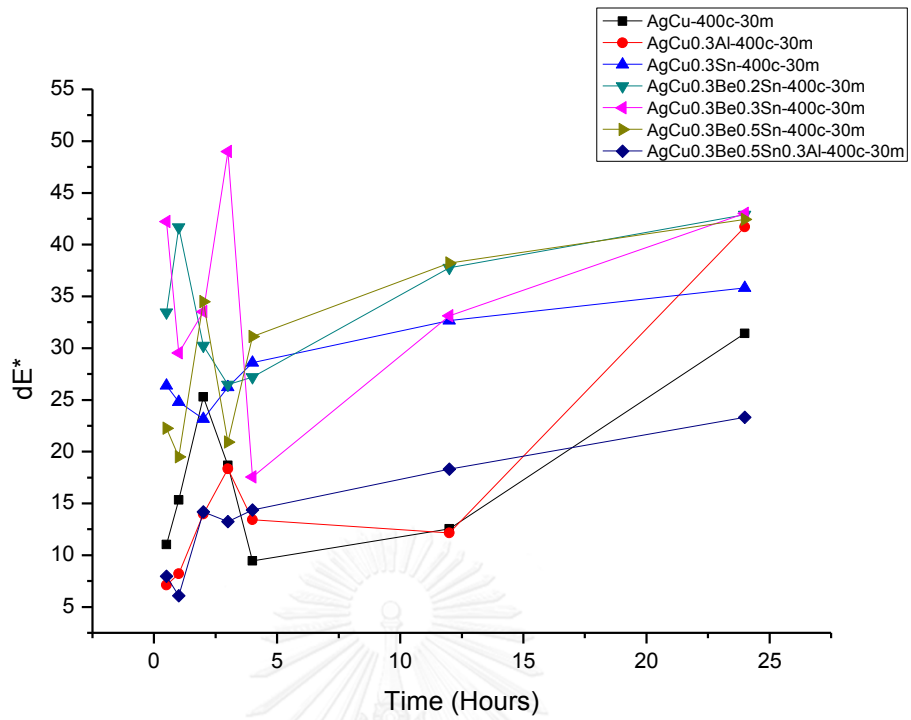
| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be 0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|---|---|---|----------------------|
|  |  |  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 3 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นจาก 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมงของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 350°C เวลา 60 นาที (Aging 350°C, 60 min) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด

ตารางที่ 6. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง โดยชิ้นงานผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที (Age 400°C – 30 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

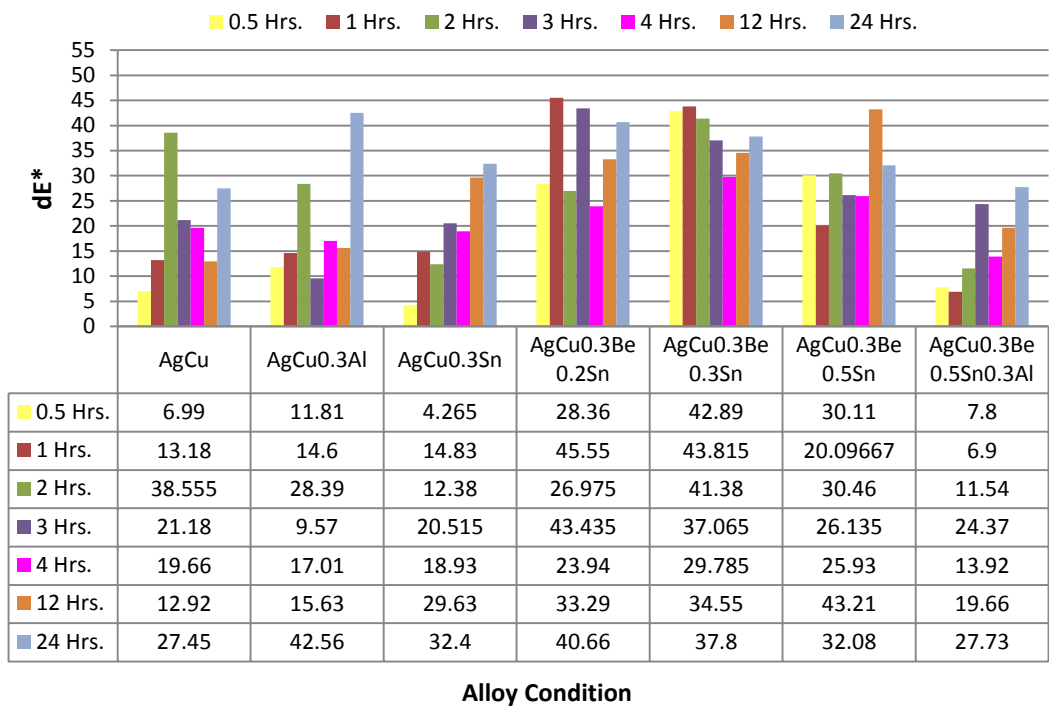
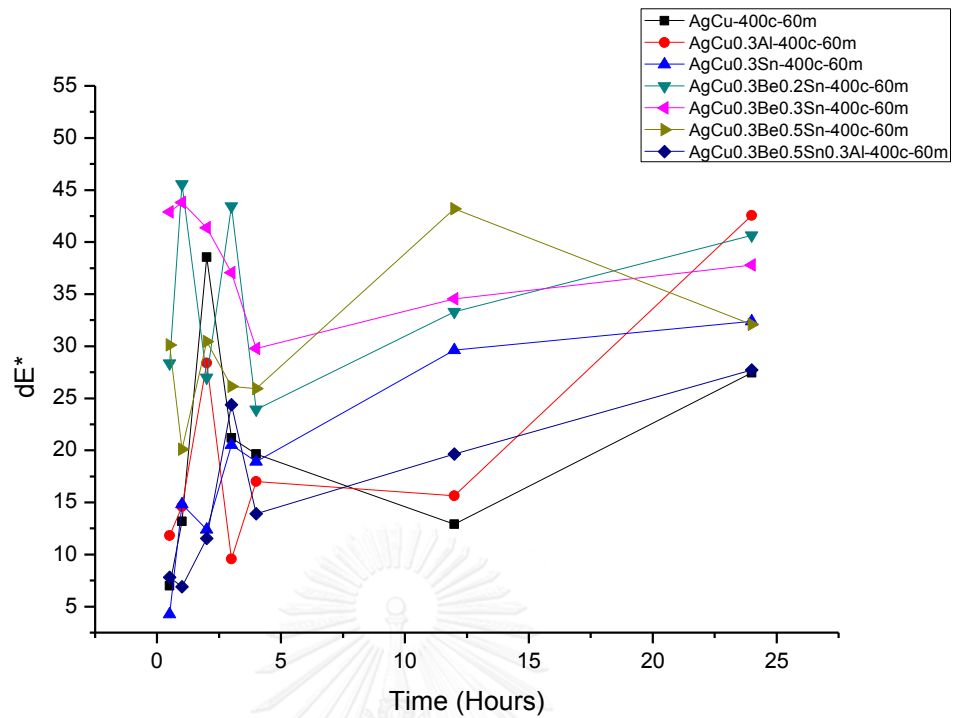
| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be e0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn0.3Al | Condition Tarnish |
|---|---|---|---|---|--|---|----------------------|
|  |  |  |  |  |  |  | 0 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 0.5 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 1 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 2 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 3 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 4 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 12 Hours |
|  |  |  |  |  |  |  | 24 Hours |



ภาพที่ 4 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นจาก 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมงของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 400°C เวลา 30 นาที (Aging 400°C, 30 min) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด

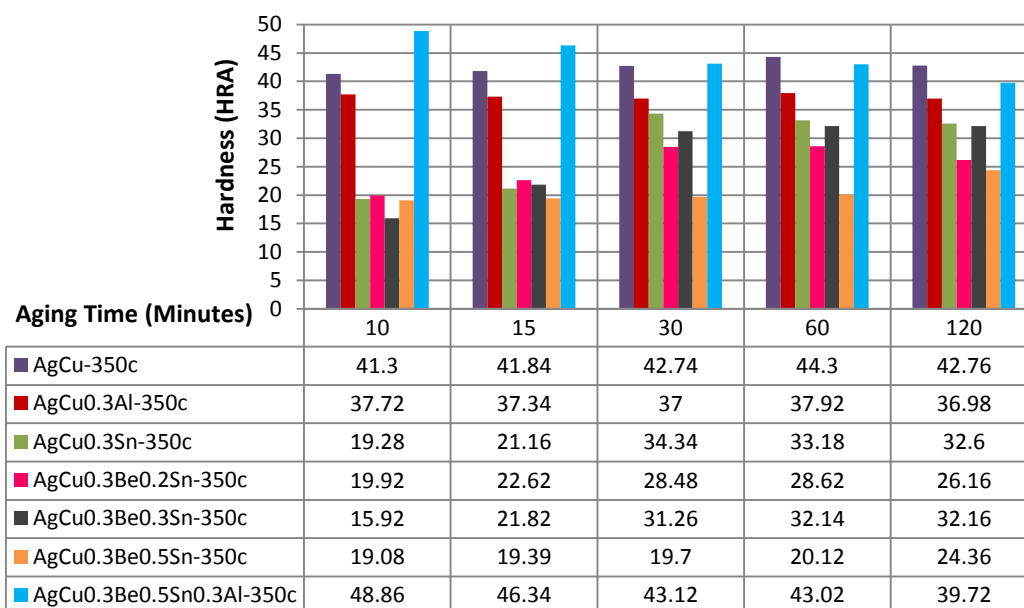
ตารางที่ 7. ชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบสมบัติต้านทานการหมอง โดยชิ้นงานผ่านกระบวนการอบบ่ม ใช้อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที (Age 400°C – 60 min), ทดสอบการหมองใช้เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 12 และ 24 ชั่วโมง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 7 ชุด

| AgCu | AgCu0.3Al | AgCu0.3Sn | AgCu0.3Be 0.2Sn | AgCu0.3Be 0.3Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn | AgCu0.3Be 0.5Sn0.3Al | Condition Tarnish |
|------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | | | | | 0 Hours |
| | | | | | | | 0.5 Hours |
| | | | | | | | 1 Hours |
| | | | | | | | 2 Hours |
| | | | | | | | 3 Hours |
| | | | | | | | 4 Hours |
| | | | | | | | 12 Hours |
| | | | | | | | 24 Hours |

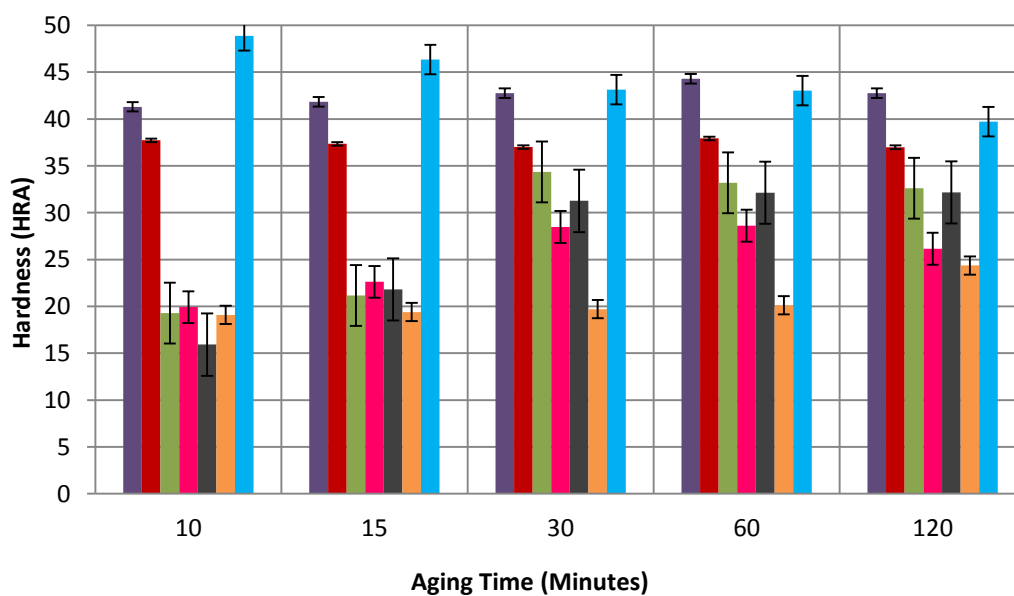


ภาพที่ 5 ค่าเปลี่ยนแปลงสี dE* ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทดสอบที่เพิ่มมากขึ้นจาก 0.5, 1, 2, 3, 4, 12, 24 ชั่วโมงของชิ้นงานผ่านการอบบ่มอุณหภูมิ 400°C เวลา 60 นาที (Aging 400°C, 60 min) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 7 ชุด

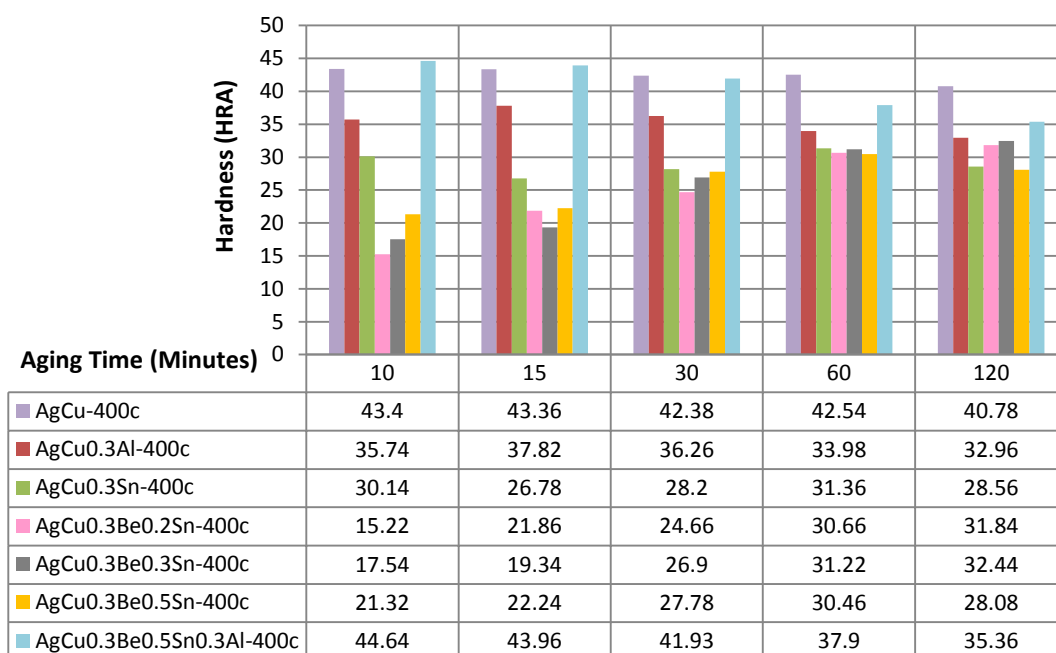




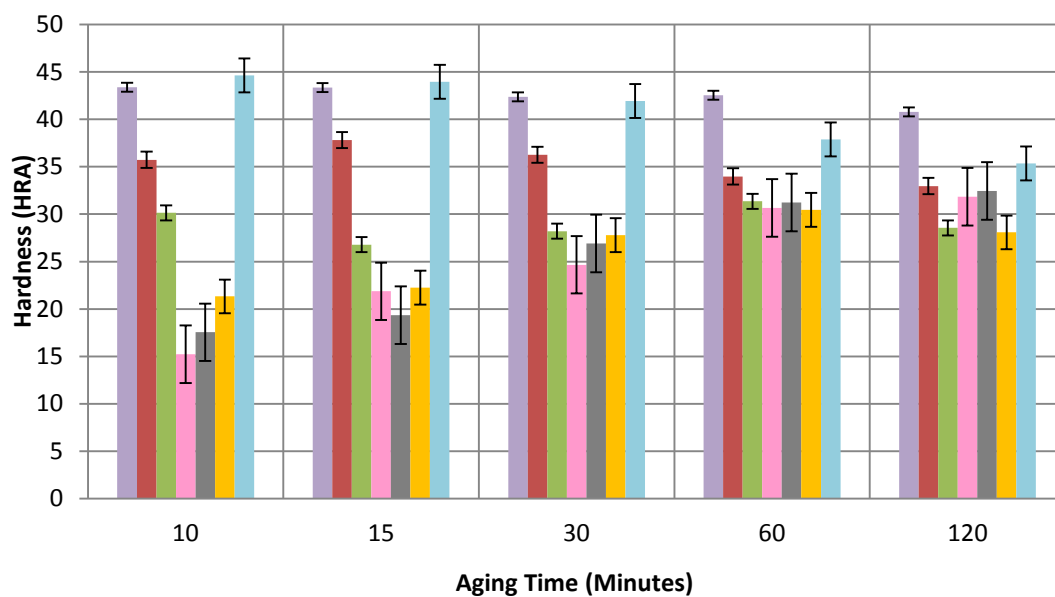
** Aging time 0 minute: ND = Not Detect (ค่าต่ำกว่าสเกล HRA Rockwell) **



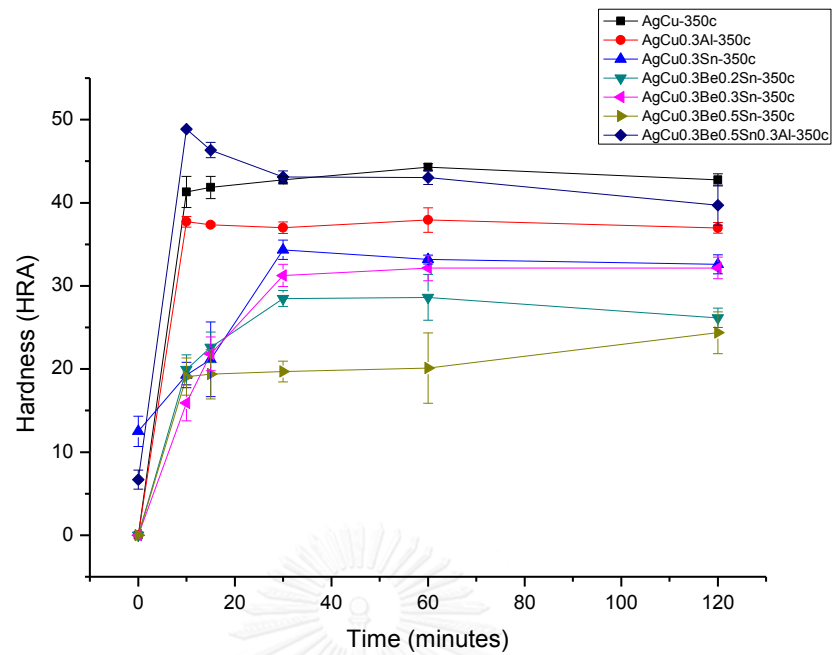
ภาพที่ ๑๑ ค่าความแข็งแบบกราฟแท่งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบบริคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 350°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



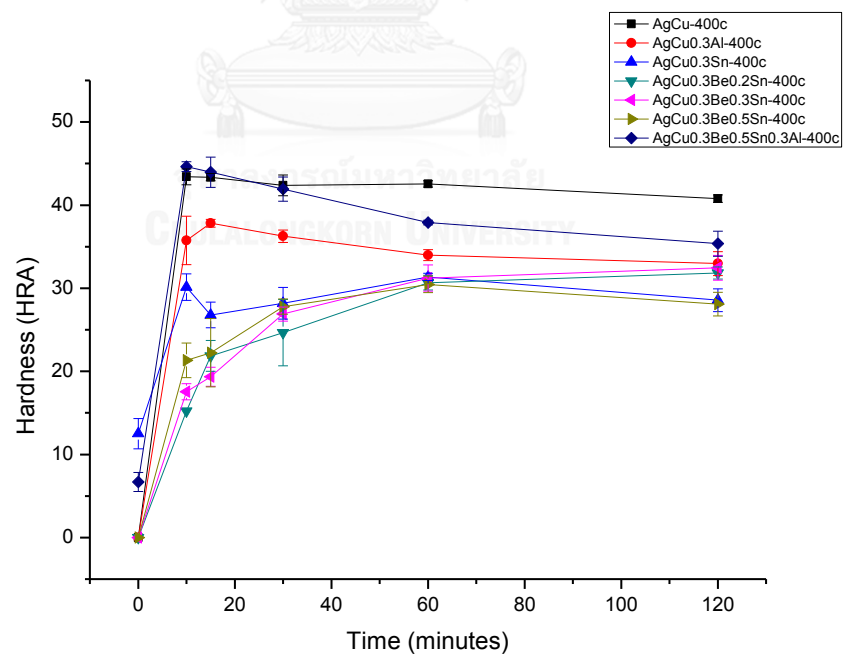
** Aging time 0 minute: ND = Not Detect (ค่าต่ำกว่าสเกล HRA Rockwell) **



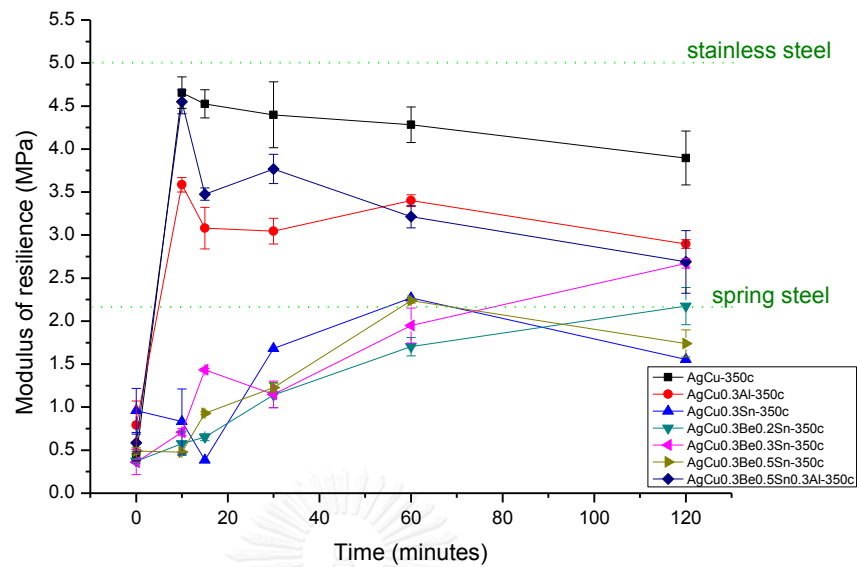
ภาพที่ ๑๒ ค่าความแข็งแบบกราฟแท่งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 400°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



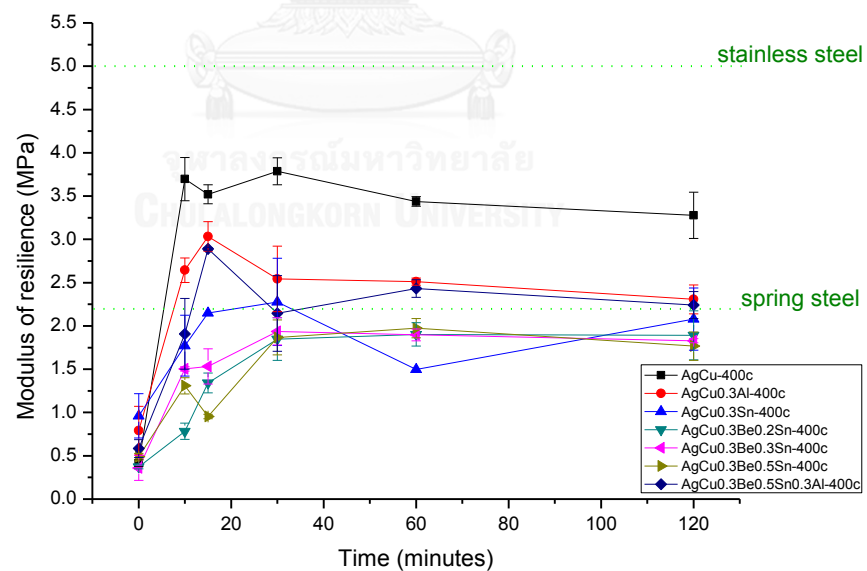
ภาพที่ ๑3 ค่าความแข็งแบบกราฟเส้นที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 350°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



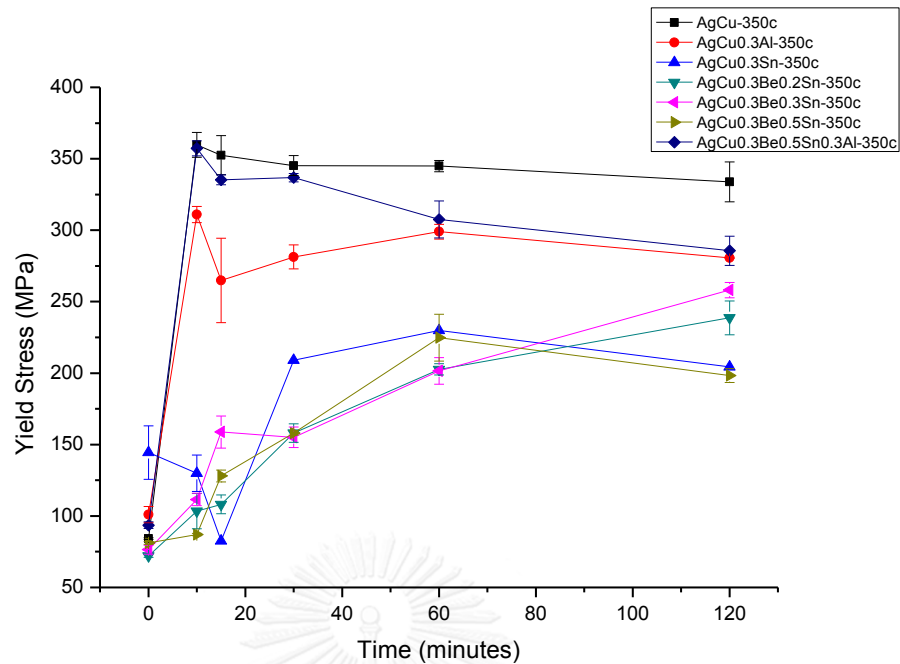
ภาพที่ ๑4 ค่าความแข็งแบบกราฟเส้นที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ (HRA) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 400°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



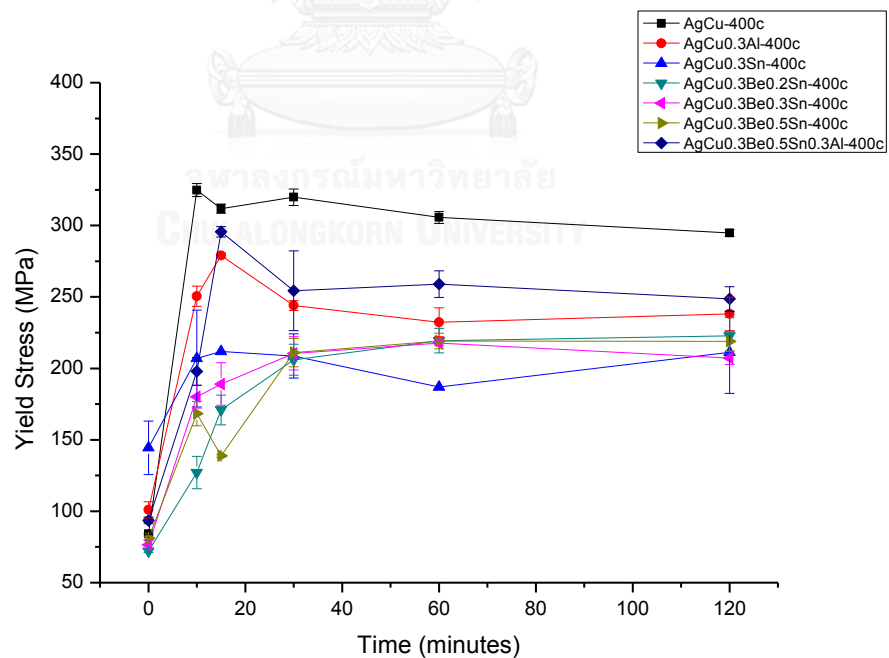
ภาพที่ ๑5 ค่าความเป็นสปริง (Modulus of resilience) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 350°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอริลิ่ง 7 ชุดโลหะผสม



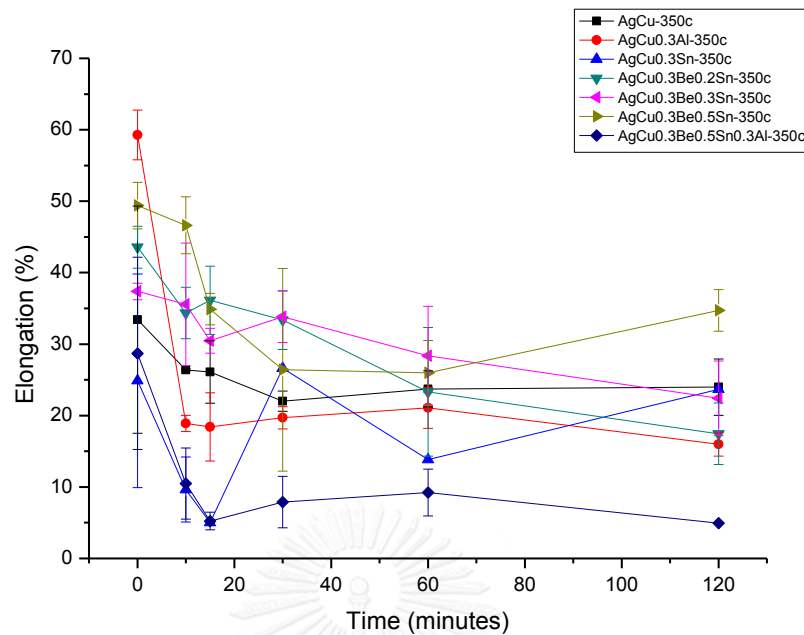
ภาพที่ ๑6 ค่าความเป็นสปริง (Modulus of resilience) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบบ่มที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 400°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอริลิ่ง 7 ชุดโลหะผสม



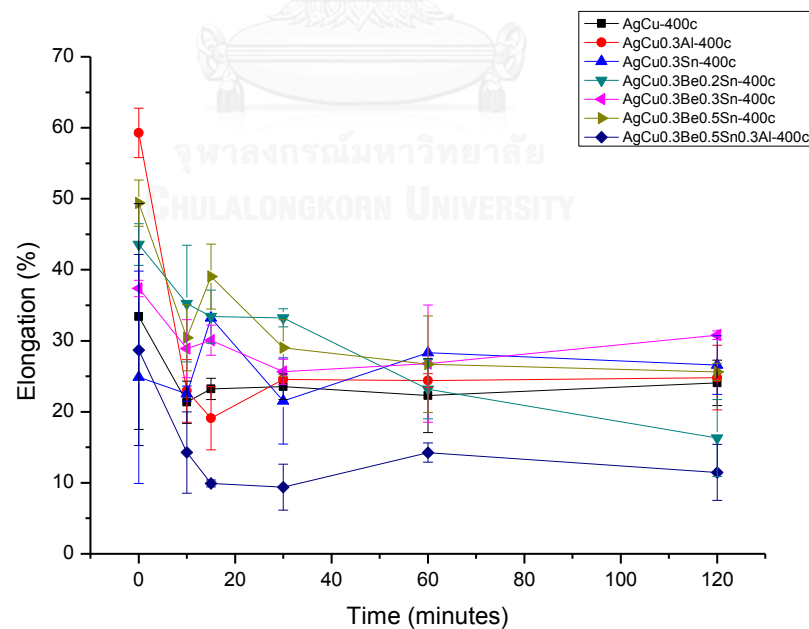
ภาพที่ ๑๗ ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบป่นที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 350°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



ภาพที่ ๑๘ ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบป่นที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 400°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



ภาพที่ ๑๙ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบป้อนที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 350°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม



ภาพที่ ๑๑๐ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการอบป้อนที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10, 15, 30, 60, 120 นาที (Aging 400°C, Time 10, 15, 30, 60, 120 minutes) ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 7 ชุดโลหะผสม

ตารางที่ จ1. ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ของชิ้นงานทดสอบ การต้านทานแรงดึงทั้ง 7 ชุดโลหะผสม

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu-ascast-1 | 2383.541841 | 2281.642023 | 153.7442684 |
| AgCu-ascast-2 | 2104.796838 | | |
| AgCu-ascast-3 | 1445.224842 | | |
| AgCu-ascast-4 | 2356.587389 | | |
| AgCu-ascast-5 | 1952.268923 | | |
| AgCu-350c-10m-1 | 4178.580794 | 3774.863211 | 607.0634848 |
| AgCu-350c-10m-2 | 4069.275676 | | |
| AgCu-350c-10m-3 | 3076.733164 | | |
| AgCu-350c-15m-1 | 4276.613066 | 4070.655138 | 178.3755987 |
| AgCu-350c-15m-2 | 3969.639144 | | |
| AgCu-350c-15m-3 | 3965.713205 | | |
| AgCu-350c-30m-1 | 3897.114078 | 3947.386177 | 74.31598101 |
| AgCu-350c-30m-2 | 3912.294308 | | |
| AgCu-350c-30m-3 | 4032.750144 | | |
| AgCu-350c-60m-1 | 4007.196771 | 4004.346942 | 36.81205882 |
| AgCu-350c-60m-2 | 3966.192795 | | |
| AgCu-350c-60m-3 | 4039.65126 | | |
| AgCu-350c-120m-1 | 3934.510081 | 3947.703964 | 167.1958002 |
| AgCu-350c-120m-2 | 3787.495999 | | |
| AgCu-350c-120m-3 | 4121.105811 | | |
| AgCu-400c-10m-1 | 3821.169554 | 3814.355105 | 35.65825356 |
| AgCu-400c-10m-2 | 3775.781369 | | |
| AgCu-400c-10m-3 | 3846.114392 | | |
| AgCu-400c-15m-1 | 3602.263082 | 3660.897043 | 64.84224572 |
| AgCu-400c-15m-2 | 3730.538468 | | |
| AgCu-400c-15m-3 | 3649.889579 | | |
| AgCu-400c-30m-1 | 3694.823442 | 3763.315682 | 59.84990847 |
| AgCu-400c-30m-2 | 3805.538101 | | |
| AgCu-400c-30m-3 | 3789.585503 | | |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu-400c-60m-1 | 3684.779074 | 3638.63787 | 60.37167257 |
| AgCu-400c-60m-2 | 3570.312646 | | |
| AgCu-400c-60m-3 | 3660.821891 | | |
| AgCu-400c-120m-1 | 3598.061593 | 3558.872819 | 82.58181999 |
| AgCu-400c-120m-2 | 3463.992729 | | |
| AgCu-400c-120m-3 | 3614.564134 | | |
| AgCu0.3Al-ascast-1 | 2481.266821 | 2452.00929 | 28.01667018 |
| AgCu0.3Al-ascast-2 | 2449.33592 | | |
| AgCu0.3Al-ascast-3 | 2425.42513 | | |
| AgCu0.3Al-350c-10m-1 | 3678.353209 | 3725.368461 | 58.40936129 |
| AgCu0.3Al-350c-10m-2 | 3790.754818 | | |
| AgCu0.3Al-350c-10m-3 | 3706.997358 | | |
| AgCu0.3Al-350c-15m-1 | 3572.485581 | 3569.154015 | 356.7603531 |
| AgCu0.3Al-350c-15m-2 | 3210.739547 | | |
| AgCu0.3Al-350c-15m-3 | 3924.236919 | | |
| AgCu0.3Al-350c-30m-1 | 3419.472991 | 3469.75953 | 64.03128384 |
| AgCu0.3Al-350c-30m-2 | 3447.961844 | | |
| AgCu0.3Al-350c-30m-3 | 3541.843755 | | |
| AgCu0.3Al-350c-60m-1 | 3650.595863 | 3523.880778 | 167.381676 |
| AgCu0.3Al-350c-60m-2 | 3586.911885 | | |
| AgCu0.3Al-350c-60m-3 | 3334.134585 | | |
| AgCu0.3Al-350c-120m-1 | 3407.090425 | 3424.637659 | 69.06858386 |
| AgCu0.3Al-350c-120m-2 | 3366.035166 | | |
| AgCu0.3Al-350c-120m-3 | 3500.787386 | | |
| AgCu0.3Al-400c-10m-1 | 3170.676162 | 3209.050467 | 68.3776176 |
| AgCu0.3Al-400c-10m-2 | 3168.479289 | | |
| AgCu0.3Al-400c-10m-3 | 3287.99595 | | |
| AgCu0.3Al-400c-15m-1 | 3396.600757 | 3313.092857 | 105.0139762 |
| AgCu0.3Al-400c-15m-2 | 3347.481919 | | |
| AgCu0.3Al-400c-15m-3 | 3195.195896 | | |
| AgCu0.3Al-400c-30m-1 | 3190.474599 | 3228.781447 | 140.0238952 |
| AgCu0.3Al-400c-30m-2 | 3383.972109 | | |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu0.3Al-400c-30m-3 | 3111.897632 | | |
| AgCu0.3Al-400c-60m-1 | 3131.475192 | 3084.487168 | 104.6704059 |
| AgCu0.3Al-400c-60m-2 | 2964.55671 | | |
| AgCu0.3Al-400c-60m-3 | 3157.429602 | | |
| AgCu0.3Al-400c-120m-1 | 3233.798543 | 3142.169887 | 117.8788769 |
| AgCu0.3Al-400c-120m-2 | 3009.185773 | | |
| AgCu0.3Al-400c-120m-3 | 3183.525345 | | |
| AgCu0.3Sn-ascast | 2458.311496 | 2085.917294 | 526.6449299 |
| AgCu0.3Sn-ascast-2 | 633.7831255 | | |
| AgCu0.3Sn-ascast-3 | 1713.523093 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-10m-1 | 1850.309071 | 1746.648231 | 180.7200306 |
| AgCu0.3Sn-350c-10m-2 | 1537.97218 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-10m-3 | 1851.663443 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-15m-1 | 1125.940313 | 2785.29787 | 71.52755135 |
| AgCu0.3Sn-350c-15m-2 | 2835.875487 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-15m-3 | 2734.720254 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-30m-1 | 2905.156469 | 2905.156469 | 0.000000000 |
| AgCu0.3Sn-350c-30m-2 | 765.452507 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-60m-1 | 3139.326343 | 2599.023341 | 764.1038332 |
| AgCu0.3Sn-350c-60m-2 | 2058.720339 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-60m-3 | 1720.932999 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-120m-1 | 1317.765029 | 1781.17986 | 841.1754002 |
| AgCu0.3Sn-350c-120m-2 | 1273.623402 | | |
| AgCu0.3Sn-350c-120m-3 | 2752.151149 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-10m-1 | 2456.605505 | 2760.612759 | 429.931181 |
| AgCu0.3Sn-400c-10m-2 | 3064.620012 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-10m-3 | 786.778536 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-15m-1 | 760.2907515 | 2364.28364 | 690.3301839 |
| AgCu0.3Sn-400c-15m-2 | 2852.420794 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-15m-3 | 1876.146485 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-30m-1 | 3178.587183 | 2724.812291 | 641.7346059 |
| AgCu0.3Sn-400c-30m-2 | 2271.037399 | | |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu0.3Sn-400c-30m-3 | 462.0690142 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-60m-1 | 871.8570784 | 2465.803299 | 147.3569359 |
| AgCu0.3Sn-400c-60m-2 | 2361.60621 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-60m-3 | 2570.000387 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-120m-1 | 3166.49171 | 3054.148054 | 158.8779222 |
| AgCu0.3Sn-400c-120m-2 | 1431.749669 | | |
| AgCu0.3Sn-400c-120m-3 | 2941.804398 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-ascast-1 | 2203.531168 | 2230.548972 | 32.94592253 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-ascast-2 | 2267.251893 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-ascast-3 | 2220.863854 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-10m-1 | 2492.700503 | 2395.586739 | 85.65520872 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-10m-2 | 2330.7971 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-10m-3 | 2363.262613 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-15m-1 | 2525.699664 | 2462.525871 | 83.08211602 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-15m-2 | 2368.413445 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-15m-3 | 2493.464505 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-30m-1 | 2734.111446 | 2674.249861 | 68.97189522 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-30m-2 | 2598.826593 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-30m-3 | 2689.811543 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-60m-1 | 2804.546113 | 2872.03763 | 94.77023136 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-60m-2 | 2980.382772 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-60m-3 | 2831.184004 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-120m-1 | 2935.231131 | 3058.379834 | 137.256629 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-120m-2 | 3033.552912 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-350c-120m-3 | 3206.355458 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-10m-1 | 2545.343694 | 2520.509641 | 129.4021862 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-10m-2 | 2635.695037 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-10m-3 | 2380.490192 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-15m-1 | 2766.05815 | 2772.862795 | 64.25052762 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-15m-2 | 2840.244825 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-15m-3 | 2712.285411 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-30m-1 | 2795.750058 | 2861.07033 | 108.1553546 |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-30m-2 | 2985.9125 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-30m-3 | 2801.548433 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-60m-1 | 2928.950259 | 2906.406487 | 58.47007046 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-60m-2 | 2840.020329 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-60m-3 | 2950.248872 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-120m-1 | 2953.747789 | 2872.626027 | 210.9231212 |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-120m-2 | 3030.944526 | | |
| AgCu0.3Be0.2Sn-400c-120m-3 | 2633.185765 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-ascast-1 | 2322.030998 | 2328.164809 | 77.83765658 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-ascast-2 | 2257.120016 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-ascast-3 | 2437.862646 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-ascast-4 | 2295.645575 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-10m-1 | 2363.301414 | 2505.495938 | 123.9809134 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-10m-2 | 2562.212487 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-10m-3 | 2590.973914 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-15m-1 | 2947.287461 | 2740.508216 | 206.2168034 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-15m-2 | 2534.858495 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-15m-3 | 2739.378693 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-30m-1 | 3010.107738 | 2828.636356 | 204.4183131 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-30m-2 | 2607.17978 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-30m-3 | 2868.62155 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-60m-1 | 3068.088017 | 3132.674107 | 91.33852499 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-60m-2 | 3197.260198 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-60m-3 | 2745.39281 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-120m-1 | 3386.873777 | 3305.300231 | 91.94439079 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-120m-2 | 3323.36147 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-350c-120m-3 | 3205.665447 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-10m-1 | 2779.381719 | 2764.758976 | 21.37447149 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-10m-2 | 2774.666767 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-10m-3 | 2740.228442 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-15m-1 | 2722.577976 | 2854.51689 | 156.6312384 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-15m-2 | 2813.353545 | | |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-15m-3 | 3027.619148 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-30m-1 | 2888.287883 | 2931.000022 | 37.32044073 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-30m-2 | 2947.39926 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-30m-3 | 2957.312924 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-60m-1 | 2931.102411 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-60m-2 | 2836.633445 | 2929.818697 | 92.55007295 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-60m-3 | 3021.720236 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-120m-1 | 2931.090886 | | |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-120m-2 | 2939.021819 | 2924.614551 | 18.51536142 |
| AgCu0.3Be0.3Sn-400c-120m-3 | 2903.730947 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-ascast-1 | 2189.021797 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-ascast-2 | 2452.262409 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-ascast-3 | 2329.089643 | 2349.845968 | 119.7933136 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-ascast-4 | 2429.010023 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-10m-1 | 2828.578839 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-10m-2 | 2377.980958 | 2708.948535 | 169.1827982 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-10m-3 | 2589.318231 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-15m-1 | 2529.584477 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-15m-2 | 2646.667516 | 2527.261149 | 120.5848188 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-15m-3 | 2405.531453 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-30m-1 | 2624.343212 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-30m-2 | 2722.185345 | 2597.458841 | 140.1166074 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-30m-3 | 2445.847967 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-60m-1 | 2841.713206 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-60m-2 | 2959.25514 | 3027.781534 | 228.1838757 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-60m-3 | 3282.376257 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-120m-1 | 2801.981135 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-120m-2 | 2792.099212 | 2795.580698 | 5.55007208 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-350c-120m-3 | 2792.661748 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-10m-1 | 2809.309948 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-10m-2 | 2635.144343 | 2759.428099 | 108.3288854 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-10m-3 | 2833.830007 | | |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-15m-1 | 2553.377088 | 2653.791543 | 161.4888393 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-15m-2 | 2567.923981 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-15m-3 | 2840.073559 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-30m-1 | 3016.829436 | 2938.214094 | 70.11083603 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-30m-2 | 2915.647104 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-30m-3 | 2882.165744 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-60m-1 | 2864.099704 | 2996.940459 | 117.0337393 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-60m-2 | 3084.852615 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-60m-3 | 3041.869056 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-120m-1 | 2849.392608 | 2893.961663 | 63.03016231 |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-120m-2 | 2938.530718 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn-400c-120m-3 | 2510.852244 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-ascast-1 | 2368.366891 | 2389.391798 | 29.73370929 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-ascast-2 | 2035.440673 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-ascast-3 | 2410.416706 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-ascast-4 | 1685.627775 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-10m-1 | 2313.333429 | 4102.968105 | 128.5022996 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-10m-2 | 4193.832953 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-10m-3 | 4012.103258 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-15m-1 | 3686.033357 | 3728.703982 | 60.34537687 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-15m-2 | 3268.86019 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-15m-3 | 3771.374607 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-30m-1 | 3757.055638 | 3752.074134 | 7.04491011 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-30m-2 | 3747.092631 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-30m-3 | 3191.118375 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-60m-1 | 3290.541521 | 3418.271782 | 125.593021 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-60m-2 | 3541.612472 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-60m-3 | 3422.661354 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-120m-1 | 2946.137877 | 3008.796234 | 175.6458478 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-120m-2 | 3207.179032 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350c-120m-3 | 2873.071794 | | |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-400c-10m-1 | 2502.301475 | 2648.573739 | 213.9404559 |

| Sample Reference | UTS (N) | AVG | SD |
|--|-------------|-------------|-------------|
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-10m-2 | 2894.115895 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-10m-3 | 2549.303846 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-15m-1 | 3406.412212 | 3323.996176 | 116.5538753 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-15m-2 | 2689.57539 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-15m-3 | 3241.580141 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-30m-1 | 2221.105468 | 3029.452593 | 96.90289204 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-30m-2 | 3097.973285 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-30m-3 | 2960.931901 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-60m-1 | 3005.085504 | 3050.165406 | 107.6836702 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-60m-2 | 2972.347872 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-60m-3 | 3173.062841 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-120m-1 | 3018.174804 | 2936.529683 | 85.68091079 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-120m-2 | 2847.315242 | | |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400c-120m-3 | 2944.099003 | | |



ตารางที่ ๑2. ค่าความแข็งจากการทดสอบความแข็งรีดิวซ์ (Scale A)

ชุด AgCu และ AgCu0.3Al

| Sample | Point | Hardness(HRA) | Sample | Point | Hardness(HRA) |
|--------------|-------|---------------|-------------------|-------|---------------|
| AgCu-ascast | 1 | - | AgCu0.3Al-ascast | 1 | - |
| | 2 | - | | 2 | - |
| | 3 | - | | 3 | - |
| | 4 | - | | 4 | - |
| | 5 | - | | 5 | - |
| AVG | | - | AVG | | - |
| SD | | - | SD | | - |
| AgCu-350-10m | 1 | 39 | AgCu0.3Al-350-10m | 1 | 38.2 |
| | 2 | 42.9 | | 2 | 36.9 |
| | 3 | 43 | | 3 | 37.9 |
| | 4 | 42.8 | | 4 | 37.2 |
| | 5 | 43.8 | | 5 | 38.4 |
| AVG | | 42.3 | AVG | | 37.72 |
| SD | | 1.886796226 | SD | | 0.645755372 |
| AgCu-350-15m | 1 | 39.9 | AgCu0.3Al-350-15m | 1 | 37.4 |
| | 2 | 43.6 | | 2 | 37.5 |
| | 3 | 41.9 | | 3 | 37.5 |
| | 4 | 42.2 | | 4 | 37 |
| | 5 | 41.6 | | 5 | 37.3 |
| AVG | | 41.84 | AVG | | 37.34 |
| SD | | 1.327780102 | SD | | 0.207364414 |
| AgCu-350-30m | 1 | 42.2 | AgCu0.3Al-350-30m | 1 | 37.4 |
| | 2 | 42.8 | | 2 | 37 |
| | 3 | 43.2 | | 3 | 35.9 |
| | 4 | 42.3 | | 4 | 36.9 |
| | 5 | 43.2 | | 5 | 37.8 |
| AVG | | 42.74 | AVG | | 37 |
| SD | | 0.477493455 | SD | | 0.71063352 |
| AgCu-350-1h | 1 | 44 | AgCu0.3Al-350-1h | 1 | 39.4 |
| | 2 | 44.5 | | 2 | 36.6 |
| | 3 | 44 | | 3 | 38.8 |
| | 4 | 44.1 | | 4 | 36.1 |
| | 5 | 44.9 | | 5 | 38.7 |
| AVG | | 44.3 | AVG | | 37.92 |

| | | | | | |
|--------------|---|-------------|-------------------|---|-------------|
| SD | | 0.393700394 | SD | | 1.46867287 |
| AgCu-350-2h | 1 | 42.8 | AgCu0.3Al-350-2h | 1 | 36.6 |
| | 2 | 41.8 | | 2 | 36.2 |
| | 3 | 42.5 | | 3 | 37.9 |
| | 4 | 43.8 | | 4 | 37 |
| | 5 | 42.9 | | 5 | 37.2 |
| AVG | | 42.76 | AVG | | 36.98 |
| SD | | 0.723187389 | SD | | 0.641872261 |
| AgCu-400-10m | 1 | 42.4 | AgCu0.3Al-400-10m | 1 | 31.9 |
| | 2 | 42.5 | | 2 | 38 |
| | 3 | 44.7 | | 3 | 38 |
| | 4 | 43.5 | | 4 | 37.5 |
| | 5 | 43.9 | | 5 | 33.3 |
| AVG | | 43.4 | AVG | | 35.74 |
| SD | | 0.969535971 | SD | | 2.915990398 |
| AgCu-400-15m | 1 | 44.1 | AgCu0.3Al-400-15m | 1 | 37 |
| | 2 | 43.2 | | 2 | 38.1 |
| | 3 | 43.1 | | 3 | 37.9 |
| | 4 | 43.3 | | 4 | 38.2 |
| | 5 | 43.1 | | 5 | 37.9 |
| AVG | | 43.36 | AVG | | 37.82 |
| SD | | 0.421900462 | SD | | 0.47644517 |
| AgCu-400-30m | 1 | 40.5 | AgCu0.3Al-400-30m | 1 | 35.1 |
| | 2 | 43 | | 2 | 37 |
| | 3 | 43.2 | | 3 | 36.2 |
| | 4 | 43.5 | | 4 | 36.8 |
| | 5 | 41.7 | | 5 | 36.2 |
| AVG | | 42.38 | AVG | | 36.26 |
| SD | | 1.255786606 | SD | | 0.740270221 |
| AgCu-400-1h | 1 | 42.8 | AgCu0.3Al-400-1h | 1 | 33.5 |
| | 2 | 42.9 | | 2 | 33.4 |
| | 3 | 42 | | 3 | 34.2 |
| | 4 | 42.7 | | 4 | 35 |
| | 5 | 42.3 | | 5 | 33.8 |
| AVG | | 42.54 | AVG | | 33.98 |
| SD | | 0.378153408 | SD | | 0.649615271 |

| | | | | | |
|-------------|---|-------------|------------------|---|------------|
| AgCu-400-2h | 1 | 41.2 | AgCu0.3Al-400-2h | 1 | 33.9 |
| | 2 | 40.8 | | 2 | 30.5 |
| | 3 | 41.2 | | 3 | 33 |
| | 4 | 40.2 | | 4 | 33.9 |
| | 5 | 40.5 | | 5 | 33.5 |
| AVG | | 40.78 | AVG | | 32.96 |
| SD | | 0.438178046 | SD | | 1.42407865 |

ตารางที่ ๑3. ค่าความแข็งจากการทดสอบความแข็งรีอคเวลล์ (Scale A)

ชุด AgCu0.3Sn และ AgCu0.3Be0.2Sn

| Sample | Point | Hardness(HRA) | Sample | Point | Hardness(HRA) |
|-------------------|-------|---------------|------------------------|-------|---------------|
| AgCu0.3Sn-ascast | 1 | 10.8 | AgCu0.3Be0.2Sn-ascast | 1 | - |
| | 2 | 13.5 | | 2 | - |
| | 3 | 10.3 | | 3 | - |
| | 4 | 13.7 | | 4 | - |
| | 5 | 14.2 | | 5 | - |
| AVG | | 12.5 | AVG | | - |
| SD | | 1.8069311 | SD | | - |
| AgCu0.3Sn-350-10m | 1 | 22 | AgCu0.3Be0.2Sn-350-10m | 1 | 20.3 |
| | 2 | 20.5 | | 2 | 22.8 |
| | 3 | 24.5 | | 3 | 19.5 |
| | 4 | 23 | | 4 | 18.5 |
| | 5 | 21.4 | | 5 | 18.5 |
| AVG | | 22.28 | AVG | | 19.92 |
| | | 1.538505769 | SD | | 1.778201338 |
| AgCu0.3Sn-350-15m | 1 | 26.3 | AgCu0.3Be0.2Sn-350-15m | 1 | 5.7 |
| | 2 | 25.2 | | 2 | 6.3 |
| | 3 | 16.3 | | 3 | 7.5 |
| | 4 | 17.4 | | 4 | 8.3 |
| | 5 | 20.6 | | 5 | 10.3 |
| AVG | | 21.16 | AVG | | 7.62 |
| | | 4.494774744 | SD | | 1.808867049 |
| AgCu0.3Sn-350-30m | 1 | 33 | AgCu0.3Be0.2Sn-350-30m | 1 | 27.7 |
| | 2 | 35 | | 2 | 27.9 |
| | 3 | 33.9 | | 3 | 28 |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|-------------|--|---|-------------|
| | 4 | 36 | | 4 | 30 |
| | 5 | 33.8 | | 5 | 28.8 |
| AVG | | 34.34 | AVG | | 28.48 |
| SD | | 1.169615321 | SD | | 0.947100839 |
| AgCu _{0.3} Sn-350-1h | 1 | 32.8 | AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn-350-1h | 1 | 25.7 |
| | 2 | 33.2 | | 2 | 26 |
| | 3 | 34.1 | | 3 | 28.7 |
| | 4 | 32.8 | | 4 | 31.2 |
| | 5 | 33 | | 5 | 31.5 |
| AVG | | 33.18 | AVG | | 28.62 |
| SD | | 0.540370243 | SD | | 2.754450943 |
| AgCu _{0.3} Sn-350-2h | 1 | 34 | AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn-350-2h | 1 | 26.2 |
| | 2 | 32.2 | | 2 | 24.3 |
| | 3 | 32.2 | | 3 | 26.5 |
| | 4 | 31.1 | | 4 | 26.3 |
| | 5 | 33.5 | | 5 | 27.5 |
| AVG | | 32.6 | AVG | | 26.16 |
| SD | | 1.155422001 | SD | | 1.161034022 |
| AgCu _{0.3} Sn-400-10m | 1 | 31.2 | AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn-400-10m | 1 | 92 |
| | 2 | 28.3 | | 2 | 99.5 |
| | 3 | 30 | | 3 | 91.2 |
| | 4 | 32.2 | | 4 | 96.3 |
| | 5 | 29 | | 5 | 70 |
| AVG | | 30.14 | AVG | | 89.8 |
| SD | | 1.586820721 | SD | | 11.56697886 |
| AgCu _{0.3} Sn-400-15m | 1 | 27.5 | AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn-400-15m | 1 | 19 |
| | 2 | 28.2 | | 2 | 23.3 |
| | 3 | 26.7 | | 3 | 22.2 |
| | 4 | 27.3 | | 4 | 23.6 |
| | 5 | 24.2 | | 5 | 21.2 |
| AVG | | 26.78 | AVG | | 21.86 |
| SD | | 1.538505769 | SD | | 1.859569843 |
| AgCu _{0.3} Sn-400-30m | 1 | 24.9 | AgCu _{0.3} Be _{0.2} Sn-400-30m | 1 | 19.1 |
| | 2 | 29.1 | | 2 | 22 |
| | 3 | 29 | | 3 | 27.2 |
| | 4 | 29.7 | | 4 | 26.2 |
| | 5 | 28.3 | | 5 | 28.8 |
| AVG | | 28.2 | AVG | | 24.66 |

| | | | | | |
|------------------|---|-------------|-----------------------|---|-------------|
| SD | | 1.910497317 | SD | | 3.998499719 |
| AgCu0.3Sn-400-1h | 1 | 31.2 | AgCu0.3Be0.2Sn-400-1h | 1 | 29.5 |
| | 2 | 30.8 | | 2 | 30.3 |
| | 3 | 31.2 | | 3 | 31 |
| | 4 | 31.8 | | 4 | 31.9 |
| | 5 | 31.8 | | 5 | 30.6 |
| AVG | | 31.36 | AVG | | 30.66 |
| SD | | 0.433589668 | SD | | 0.884872872 |
| AgCu0.3Sn-400-2h | 1 | 27 | AgCu0.3Be0.2Sn-400-2h | 1 | 32.2 |
| | 2 | 28 | | 2 | 32.6 |
| | 3 | 30.1 | | 3 | 32.3 |
| | 4 | 27.8 | | 4 | 31.1 |
| | 5 | 29.9 | | 5 | 31 |
| AVG | | 28.56 | AVG | | 31.84 |
| SD | | 1.368575902 | SD | | 0.736885337 |

ตารางที่ ๑๔. ค่าความแข็งจากการทดสอบความแข็งรีอคเวลล์ (Scale A)

ชุด AgCu0.3Be0.3Sn และ AgCu0.3Be0.5Sn

| Name | Point | Hardness(HRA) | Name | Point | Hardness(HRA) |
|----------------------------|-------|---------------|----------------------------|-------|---------------|
| AgCu0.3Be0.3Sn- ascast | 1 | - | AgCu0.3Be0.5Sn- ascast | 1 | - |
| | 2 | - | | 2 | - |
| | 3 | - | | 3 | - |
| | 4 | - | | 4 | - |
| | 5 | - | | 5 | - |
| AVG | | - | AVG | | - |
| SD | | - | SD | | - |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 350-10m | 1 | 18.4 | AgCu0.3Be0.5Sn- 350-10m | 1 | 20 |
| | 2 | 12.5 | | 2 | 21.2 |
| | 3 | 16.8 | | 3 | 16.2 |
| | 4 | 16 | | 4 | 20.8 |
| | 5 | 15.9 | | 5 | 17.2 |
| AVG | | 15.92 | AVG | | 19.08 |
| SD | | 2.158008341 | SD | | 2.243211983 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 350-15m | 1 | 22 | AgCu0.3Be0.5Sn- 350-15m | 1 | 17.8 |
| | 2 | 22.9 | | 2 | 24 |
| | 3 | 18.9 | | 3 | 25 |
| | 4 | 21 | | 4 | 22.8 |

| | | | | | |
|----------------------------|---|-------------|----------------------------|---|-------------|
| | 5 | 24.3 | | 5 | 24.9 |
| AVG | | 21.82 | AVG | | 22.9 |
| SD | | 2.033961652 | SD | | 2.984962311 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 350-30m | 1 | 33 | AgCu0.3Be0.5Sn- 350-30m | 1 | 21 |
| | 2 | 31.8 | | 2 | 19.2 |
| | 3 | 29.5 | | 3 | 17.8 |
| | 4 | 31.5 | | 4 | 20.3 |
| | 5 | 30.5 | | 5 | 20.2 |
| AVG | | 31.26 | AVG | | 19.7 |
| SD | | 1.327780102 | SD | | 1.240967365 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 350-1h | 1 | 30.1 | AgCu0.3Be0.5Sn- 350-1h | 1 | 16.1 |
| | 2 | 33 | | 2 | 15 |
| | 3 | 33 | | 3 | 22.5 |
| | 4 | 31 | | 4 | 24 |
| | 5 | 33.6 | | 5 | 23 |
| AVG | | 32.14 | AVG | | 20.12 |
| SD | | 1.505988048 | SD | | 4.224570984 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 350-2h | 1 | 29.9 | AgCu0.3Be0.5Sn- 350-2h | 1 | 20.5 |
| | 2 | 32.3 | | 2 | 24.6 |
| | 3 | 32.5 | | 3 | 27.4 |
| | 4 | 33.1 | | 4 | 23.9 |
| | 5 | 33 | | 5 | 25.4 |
| AVG | | 32.16 | AVG | | 24.36 |
| SD | | 1.30690474 | SD | | 2.524480145 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 400-10m | 1 | 18.8 | AgCu0.3Be0.5Sn- 400-10m | 1 | 21.8 |
| | 2 | 16.5 | | 2 | 19.5 |
| | 3 | 18.2 | | 3 | 18.8 |
| | 4 | 16.7 | | 4 | 23.3 |
| | 5 | 17.5 | | 5 | 23.2 |
| AVG | | 17.54 | AVG | | 21.32 |
| SD | | 0.976217189 | SD | | 2.082546518 |
| AgCu0.3Be0.3Sn- 400-15m | 1 | 19.9 | AgCu0.3Be0.5Sn- 400-15m | 1 | 11.1 |
| | 2 | 19.8 | | 2 | 5.8 |
| | 3 | 17.3 | | 3 | 3 |
| | 4 | 19.9 | | 4 | 8 |
| | 5 | 19.8 | | 5 | 13.3 |
| AVG | | 19.34 | AVG | | 8.24 |
| SD | | 1.141490254 | SD | | 4.100365837 |

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|---|-------------|
| AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn- 400-30m | 1 | 26.3 | AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn- 400-30m | 1 | 28.2 |
| | 2 | 25.8 | | 2 | 26.2 |
| | 3 | 27 | | 3 | 28.2 |
| | 4 | 27.6 | | 4 | 27.8 |
| | 5 | 27.8 | | 5 | 28.5 |
| AVG | | 26.9 | AVG | | 27.78 |
| SD | | 0.848528137 | SD | | 0.91760558 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn- 400-1h | 1 | 30.8 | AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn- 400-1h | 1 | 31.2 |
| | 2 | 29 | | 2 | 31.1 |
| | 3 | 32 | | 3 | 31.1 |
| | 4 | 31 | | 4 | 30 |
| | 5 | 33.3 | | 5 | 28.9 |
| AVG | | 31.22 | AVG | | 30.46 |
| SD | | 1.588080602 | SD | | 1.001498877 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.3} Sn- 400-2h | 1 | 29.9 | AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn- 400-2h | 1 | 26.8 |
| | 2 | 33.1 | | 2 | 29 |
| | 3 | 32.8 | | 3 | 28.9 |
| | 4 | 32.6 | | 4 | 26.3 |
| | 5 | 33.8 | | 5 | 29.4 |
| AVG | | 32.44 | AVG | | 28.08 |
| SD | | 1.490972837 | SD | | 1.420211252 |

ตารางที่ ๑5. ค่าความแข็งจากการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Scale A)

ชุด AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al

| Name | Point | Hardness(HRA) |
|-----------------------------|-------|---------------|
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-ascast | 1 | 6.2 |
| | 2 | 7.4 |
| | 3 | 6.5 |
| | 4 | 8.2 |
| | 5 | 5.2 |
| AVG | | 6.7 |
| SD | | 1.148912529 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350-10m | 1 | 48.8 |
| | 2 | 48.9 |
| | 3 | 48.8 |
| | 4 | 49 |
| | 5 | 48.8 |
| AVG | | 48.86 |
| SD | | 0.089442719 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350-15m | 1 | 46.8 |
| | 2 | 47 |
| | 3 | 45.4 |
| | 4 | 45.3 |
| | 5 | 47.2 |
| AVG | | 46.34 |
| SD | | 0.915423399 |
| AgCu0.3Be0.5Sn0.3Al-350-30m | 1 | 42.1 |
| | 2 | 43.7 |
| | 3 | 43 |
| | 4 | 43.9 |
| | 5 | 42.9 |
| AVG | | 43.12 |
| SD | | 0.715541753 |

| | | |
|--|---|-------------|
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-350-1h | 1 | 43 |
| | 2 | 42.8 |
| | 3 | 43.8 |
| | 4 | 43.7 |
| | 5 | 41.8 |
| AVG | | 43.02 |
| SD | | 0.80746517 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-350-2h | 1 | 37.1 |
| | 2 | 37.1 |
| | 3 | 40.9 |
| | 4 | 41.5 |
| | 5 | 42 |
| AVG | | 39.72 |
| SD | | 2.423220997 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400-10m | 1 | 44 |
| | 2 | 45.1 |
| | 3 | 45.4 |
| | 4 | 44.5 |
| | 5 | 44.2 |
| AVG | | 44.64 |
| SD | | 0.594138031 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400-15m | 1 | 44.9 |
| | 2 | 41.2 |
| | 3 | 45.5 |
| | 4 | 45.2 |
| | 5 | 43 |
| AVG | | 43.96 |
| SD | | 1.825650569 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400-30m | 1 | 41.8 |
| | 2 | 42.2 |
| | 3 | 44.1 |
| | 4 | 40.05 |
| | 5 | 41.5 |

| | | |
|---|---|-------------|
| AVG | | 41.93 |
| SD | | 1.459280645 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400-1h | 1 | 38 |
| | 2 | 37.7 |
| | 3 | 38.1 |
| | 4 | 38.2 |
| | 5 | 37.5 |
| AVG | | 37.9 |
| SD | | 0.291547595 |
| AgCu _{0.3} Be _{0.5} Sn _{0.3} Al-400-2h | 1 | 36.5 |
| | 2 | 34.7 |
| | 3 | 33 |
| | 4 | 36.4 |
| | 5 | 36.2 |
| AVG | | 35.36 |
| SD | | 1.507647174 |



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล: นวรัตน์ ไชยฤกษ์ บุตรนายบำรุง ไชยฤกษ์และนางสุจิตรา ไชยฤกษ์

วันเดือนปีเกิด: วันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531

ที่อยู่: 83 หมู่ที่ 8 ถ.ตรัง-ปะเหลียน ต.ท่าข้าม อ.ปะเหลียน จ.ตรัง 92120

วุฒิการศึกษา:

- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2553

- หลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา

หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555