



อิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ใน
เชิงพาณิชย์

THE EFFECT OF ZINC AND NICKEL ON THE OPTIMIZATION PROCESS OF STERLING
SILVER PRODUCTION FOR COMMERCIAL USES

พรนภา เด่นจากรูกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2566

อิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ใน
เชิงพาณิชย์



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและนวัตกรรม
วิทยาลัยอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE EFFECT OF ZINC AND NICKEL ON THE OPTIMIZATION PROCESS OF STERLING
SILVER PRODUCTION FOR COMMERCIAL USES



PORNNAPHA DENJARUKUL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Innovation and Industrial Management)
College of Creative Industry, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ใน

เชิงพาณิชย์

ของ

พรนภา เด่นจากรุกุล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและนวัตกรรม

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถนัด จินตโกศล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงแข บุตรกุล)

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์
ผู้วิจัย	พรนภา เต็มจากรุกูล
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจีพร วงศ์ปรีดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล

การผลิตเครื่องประดับในปัจจุบันมีการมุ่งเน้นที่จะพัฒนาคุณภาพสินค้าอยู่ตลอดเวลาภาคอุตสาหกรรมจึงมีความต้องการตัวเรือนที่มีความคงทนแข็งแรง ยึดเกาะอัญมณีได้ดี ทางผู้วิจัยจึงต้องการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ และศึกษาอิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยการศึกษาองค์ประกอบธาตุเบื้องต้น 9 ชนิด และนำมาคัดเลือกเพื่อเหลือให้ศึกษาทั้งหมด 3 องค์ประกอบที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เป็นมาตรฐาน คือ Alloy SA เป็นโลหะในระบบ AgCu ส่วน Alloy A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) และ Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) เป็นอัลลอยมีส่วนผสมจากโลหะ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งเป็นการศึกษาโลหะในระบบ AgCuZnNi และมีการเพิ่มสัดส่วนของโลหะเงินเป็น 93.5 wt% และ 94.5 wt% ตามลำดับ มีขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของโลหะด้วยเทคนิค XRF, Microscope, SEM, Tensile test, Hardness test และ Tarnish test ซึ่งหลังจากการหล่อโลหะเงินผสมกับอัลลอยทั้ง 3 สูตร พบว่าหลังหล่อค่าความแข็งโดยเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 60-70 HV ซึ่งยังมีความแข็งไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน จึงมีการปรับปรุงสมบัติของโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งด้วยกระบวนการทางความร้อนคือ การบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) จากการบ่มขึ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกันโดยอบที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการบ่มที่ 250°C, 350°C และ 450°C เป็นเวลา 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมพบว่า การบ่มแข็งช่วยให้ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 110-160 HV และจากการทดสอบการต้านทานการหมอง พบว่า Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) มีค่าความสว่าง (L*) เปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุดเพียง 21.85% เท่านั้น และให้ค่าความแข็งสูงสุด 119.7 ± 11.4 HV เมื่อผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่ 350°C เป็นเวลา 60 นาที ดังนั้น Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) จึงเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีค่าความแข็งที่เหมาะสมและยังมีความสามารถในการต้านทานการหมองได้ดีกว่าเงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน เหมาะแก่การนำไปผลิตจริงเพราะมีความคงทน ช่วยยืดระยะเวลาในการสวมใส่ สามารถเก็บสวยงามของชิ้นงานได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : โลหะเงินสเตอร์ลิง, การบ่มแข็ง, ความแข็ง, อุตสาหกรรมเครื่องประดับ, การใช้งานเชิงพาณิชย์

Title	THE EFFECT OF ZINC AND NICKEL ON THE OPTIMIZATION PROCESS OF STERLING SILVER PRODUCTION FOR COMMERCIAL USES
Author	PORNAPHA DENJARUKUL
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Kageeporn Wongpreedee
Co Advisor	Associate Professor Dr. Thanut Jintakasol

Product development had a focus on quality and paid attention to the manufacturing of jewelry. The main requirement is to achieve high hardness while securely holding the stones. This research aims to optimize the process of sterling silver production for commercial use by studying the influence of zinc and nickel on the structure and the properties of sterling silver. The first experiment involved investigating nine different alloys, from which three compositions were selected for further study. The SA alloy is the standard AgCu system used for comparison. Alloy A and Alloy B increase the amount of silver to 93.5 wt% and 94.5 wt%, respectively. Both alloys contain silver, copper, zinc, and nickel, with Alloy A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) and Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) being the sample compositions. The characterization was analyzed using XRF, Microscope, SEM, Tensile, Hardness, and Tarnish tests. The average hardness after casting was 60-70HV, which did not meet the requirements. Therefore, the properties were improved through precipitation hardening. The sample was heated at 750°C for one hour and then quenched in water. Aging was carried out at 250°C, 350°C, and 450°C with various durations of 15, 30, 60, 120, and 180 minutes. This process increased the hardness value to 110-160 HV. From the tarnish resistance tests, it was discovered that Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) showed promising results in the sweat test, with a change in brightness value (L^*) of only 21.85% and the highest hardness value of 119.7 ± 11.4 HV after aging at 350°C for 60 minutes. Therefore, Alloy B is the most suitable for commercial applications. Compared to standard sterling silver, its appropriate hardness and superior tarnish resistance make it durable and long-lasting, maintaining the aesthetic appeal of jewelry pieces.

Keyword : Sterling Silver, Precipitations Hardening, Hardness, Jewelry Industry, Commercial uses

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถและความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี และ รองศาสตราจารย์ ดร. ถนัดจินตโกศล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและคอยผลักดันให้การทำปริญญาานิพนธ์นี้ดำเนินไปได้ด้วยดี และผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์หลักสูตรปริญญาโท สาขาการจัดการอุตสาหกรรมและนวัตกรรมทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ ตลอดจนเจ้าหน้าที่สำนักงานของหลักสูตร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการเครือข่ายการอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรม (Hi-FI) อันประกอบไปด้วย สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สป.อว.) ร่วมกับ บริษัท อัญมณีสุภาโน จำกัด โดยมีคุณชยันนิตินัทธ ยงศ์พีระกุล ผู้บริหารบริษัท ที่ได้อำนวยความสะดวกตลอดการวิจัยและสนับสนุนข้อมูลการวิจัยในครั้งนี้ให้บรรลุตามวัตถุประสงค์

พรนภา เด่นจากรุกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	2
ความสำคัญของการวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย	3
บทที่ 2.....	4
ตอนที่ 1 เอกสารเกี่ยวกับโลหะที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
1.1 โลหะเงินสเตอร์ลิง	5
1.2 สมบัติของโลหะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	6
1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในกระบวนการผสมโลหะ	9
1.4 การหล่อโลหะเครื่องประดับ	10
1.5 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อนด้วยการป่มแข็ง (Precipitation Hardening)	11

ตอนที่ 2 ทฤษฎีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของโลหะ	13
2.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness).....	13
2.2 การทดสอบแรงดึงของโลหะ (Tensile test of metal)	15
2.3 การทดสอบการกันหมอง (Tarnish Test: Fuming Test)	17
2.4 การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIE-LAB	17
2.5 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้อง Optical Microscope และ Scanning Electron Microscope	18
2.6 การตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะผสม ด้วย X-Ray Fluorescence	22
ตอนที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : ธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในโลหะเงินสเตอร์ลิง	23
บทที่ 3	25
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้การทดลอง (Material)	33
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Machine & Instrument)	33
บทที่ 4	34
ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์โลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบ	34
1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพรีอัลลอยด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence)	34
1.2 ผลการทดสอบการหลอมโลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบ.....	35
1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบด้วยเทคนิค X- ray fluorescence.....	36
1.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)	37
1.5 ผลการวัดค่าความแข็ง (Hardness)	39
1.6 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	40

1.7 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish Test).....	41
1.8 ผลการศึกษาธาตุที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของโลหะเงินผสมเพื่อนำไปศึกษาในตอนถัดไป... 43	
ตอนที่ 2 การผสมสูตรโลหะเงินผสมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์.....	45
2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence .	45
2.2 ผลการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานหล่อ	46
2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับค่าความแข็งของงานหล่อ	47
2.4 ผลการอบชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation Hardening)	48
2.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับค่าความแข็งงานหล่อและหลัง กระบวนการ Homogenization.....	49
2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับความแข็งของโลหะหลังบ่มแข็ง	53
2.7 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish)	55
2.8 ผลการคัดเลือกอัลลอยที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์	57
บทที่ 5.....	59
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	59
ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงข้อมูลพื้นฐานของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	8
ตาราง 2 สูตรของพรีอัลลอยทั้ง 9 สูตรที่นำมาผสมในโลหะเงิน	26
ตาราง 3 ส่วนผสมของพรีอัลลอยทั้ง 3 สูตร	28
ตาราง 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence	34
ตาราง 5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังหล่อของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence	36
ตาราง 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอย	37
ตาราง 7 แสดงผลการทดสอบแรงดึง	40
ตาราง 8 แสดงลำดับคะแนนของโลหะเงินผสมทั้ง 9 สูตร แบ่งตามสมบัติของโลหะในแต่ละด้าน	44
ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยทั้งหมด 3 สูตร ด้วยเทคนิค XRF	45
ตาราง 10 ความแข็งของชิ้นงานหล่อ	46
ตาราง 11 ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750°C (Homogenization)	48
ตาราง 12 แสดงพิกัดสี CIE-Lab ของโลหะผสมก่อนทำการทดลอง Tarnish test.....	55
ตาราง 13 ลักษณะของชิ้นงานแต่ละอัลลอยก่อนและหลังทดสอบ Tarnish test.....	55
ตาราง 14 แสดงพิกัดสี CIE-Lab ของโลหะผสมหลังทำการทดลอง Tarnish test	56
ตาราง 15 แสดงลำดับคะแนนของโลหะเงินผสมทั้ง 3 สูตร แบ่งตามสมบัติของโลหะในแต่ละด้าน	58

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โลหะเงิน (Silver)	6
ภาพประกอบ 2 โลหะทองแดง (Copper).....	7
ภาพประกอบ 3 โลหะสังกะสี (Zinc).....	7
ภาพประกอบ 4 โลหะนิกเกิล (Nickel)	8
ภาพประกอบ 5 เปรอ์เซ็นต์ความต่างของรัศมีอะตอมธาตุต่าง ๆ เมื่อเทียบกับโลหะเงิน (Praiphruk et al., 2013a).....	9
ภาพประกอบ 6 เฟสไดอะแกรม เงิน-ทองแดง	10
ภาพประกอบ 7 แผนภูมิสมดุลของโลหะ A-B (Callister & Rethwisch, 2009)	12
ภาพประกอบ 8 แผนภาพความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็ง (Callister & Rethwisch, 2009).....	12
ภาพประกอบ 9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับเวลาในการบ่มแข็ง ณ อุณหภูมิคงที่ในฟังก์ชันลอการิทึม (Callister & Rethwisch, 2009).....	13
ภาพประกอบ 10 เครื่อง Vickers Hardness	14
ภาพประกอบ 11 หลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์	15
ภาพประกอบ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุทั่วไป.....	15
ภาพประกอบ 13 ขนาดชิ้นงานทดสอบ (American Society for Testing and Materials, 2013)	17
ภาพประกอบ 14 แผนภูมิของระบบ CIE-LAB ซึ่งแสดง L, a, b color space	18
ภาพประกอบ 15 กล้องจุลทรรศน์.....	19
ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Goldstein et al., 2003).....	20
ภาพประกอบ 17 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง	22

ภาพประกอบ 18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะระบบ Ag-Cu-In (Praiphruk et al., 2013a).....	23
ภาพประกอบ 19 แสดงความแข็งของโลหะ (Praiphruk et al., 2013a).....	24
ภาพประกอบ 20 ค่าความแข็งและ yield strength ที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านความร้อน (Heat-Treatment) (Sakultanchareonchai et al., 2016).....	24
ภาพประกอบ 21 แผนผังการดำเนินการวิจัย	25
ภาพประกอบ 22 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับกระบวนการหล่อ	27
ภาพประกอบ 23 กระบวนการหลอมอัลลอยเงิน	27
ภาพประกอบ 24 เฟสไดอะแกรมของเงิน-ทองแดง.....	29
ภาพประกอบ 25 การเตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่าง	30
ภาพประกอบ 26 เครื่องวัดความแข็งและตำแหน่งการวัด 5 ตำแหน่ง	30
ภาพประกอบ 27 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ	31
ภาพประกอบ 28 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	31
ภาพประกอบ 29 เครื่องวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์.....	32
ภาพประกอบ 30 กล้องทดสอบการกันหมอง.....	32
ภาพประกอบ 31 การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีของพรีอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence	34
ภาพประกอบ 32 ลักษณะต้นหล่อของอัลลอยทั้ง 9 ชนิด.....	35
ภาพประกอบ 33 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni) a)Backscattered electron image b)Mapping analysis.....	38
ภาพประกอบ 34 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ 9 สูตร	39
ภาพประกอบ 35 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง.....	40
ภาพประกอบ 36 แสดงตัวอย่างการทดสอบแรงดึง (Tensile test)	40
ภาพประกอบ 37 ลักษณะชิ้นงานที่ทดสอบการต้านทานการหมอง ที่ 15 นาที และ 60 นาที.....	42
ภาพประกอบ 38 แสดงค่าความสว่าง (L*) ของอัลลอยที่ 15 นาที และ 60 นาที.....	42

ภาพประกอบ 39 แสดงเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความสว่างของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปในช่วง 15 นาที จนถึง 60 นาที.....	43
ภาพประกอบ 40 ลักษณะต้นหล่อของโลหะเงินผสม 3 สูตร.....	45
ภาพประกอบ 41 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ	46
ภาพประกอบ 42 แสดงโครงสร้างจุลภาคในโหมด SE ของโลหะเงินผสม a)โลหะผสม SA ระบบ AgCu ที่กำลังขยายต่ำ b)โลหะผสม SA ระบบ AgCu ที่กำลังขยายสูง c)โลหะผสม A ระบบ AgCuZnNi ที่กำลังขยายต่ำ และ d)โลหะผสม A ระบบ AgCuZnNi ที่กำลังขยายสูง	47
ภาพประกอบ 43 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750°C (Homogenization)	49
ภาพประกอบ 44 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในโหมด SE ภายหลังจากหล่อและหลังการทำ Homogenization ของโลหะเงินผสม a)โลหะเงินผสม SA ระบบ AgCu b)โลหะเงินผสม A ระบบ AgCuZnNi c)โลหะผสม B ระบบ AgCuZnNi.....	50
ภาพประกอบ 45 แสดงภาพถ่าย Mapping ของโลหะผสม A ในระบบ AgCuZnNi a)ชิ้นงานหลังหล่อ และ b)ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการ Homogenization	51
ภาพประกอบ 46 กราฟความแข็งเทียบกับระยะเวลาในการบ่มแข็งของอัลลอย SA, อัลลอย A, และอัลลอย B	52
ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโหมด SE และการ Mapping ของอัลลอยที่บ่มแข็ง a) อัลลอย SA, b) อัลลอย A และ c) อัลลอย B.....	53
ภาพประกอบ 48 แสดงการเปรียบเทียบค่า L* แต่ละอัลลอยก่อนและหลังทดสอบ Tarnish test 56	
ภาพประกอบ 49 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างของค่า L* ของแต่ละอัลลอย	56

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

เครื่องประดับเป็นตัวแทนการแสดงความรู้สึกให้กับคนพิเศษในโอกาสพิเศษ เป็นสิ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญในการเลือกซื้อมากที่สุด ส่วนใหญ่ยังคงนิยมเครื่องประดับที่มีคุณภาพผ่านการออกแบบและผลิตอย่างประณีตจากช่างฝีมือ โดยที่ในปัจจุบันความท้าทายสำคัญของอุตสาหกรรมนี้คือ ผู้บริโภครุ่นใหม่มีการตัดสินใจเลือกสินค้า โดยมักจะคำนึงถึงเรื่องคุณภาพของสินค้าและความคุ้มค่าของราคามากขึ้น เป็นเหตุให้ผู้ประกอบการมุ่งเน้นที่จะพัฒนาการผลิตเครื่องประดับให้ทันสมัย มีคุณภาพและมาตรฐาน มีความคงทนแข็งแรง ยืดเกาะอัญมณีได้ดี สอดคล้องกับความต้องการและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค

โดยทั่วไปแล้ว เงินสเตอร์ลิงที่ใช้ผลิตเครื่องประดับเงิน เป็นหนึ่งในโลหะผสมมีค่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีปริมาณโลหะเงิน 92.5 % โดยน้ำหนัก เป็นมาตรฐาน ในขณะที่อีก 7.5 % โดยน้ำหนัก ถูกจำกัดไว้สำหรับองค์ประกอบโลหะผสมอื่น ๆ โดยมีทองแดงเป็นหลัก เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของเงินบริสุทธิ์ มีค่าของความแข็งแรงและความแข็งต่ำมาก จึงมีแนวทางต่าง ๆ ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเงินสเตอร์ลิงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของธาตุที่ผสมหรือการเติมธาตุเจือ (Addition alloy) หรือปรับปรุงผ่านกระบวนการ เช่น การชุบแข็ง (Age-hardening) การขึ้นรูปเย็น (cold working) และการปรับสภาพพื้นผิว (Surface treatment) เพื่อให้โลหะมีสมบัติเชิงกลเหมาะสมกับชิ้นงาน รวมถึงสมบัติทางกายภาพ ทั้งด้านสีและการต้านทานการหมอง

ด้วยเหตุนี้ ทำให้ทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมหลักเป็นเงินและทองแดง โดยศึกษาอิทธิพลของธาตุ Zn และ Ni ที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เพื่อให้ได้ตัวเรือนเครื่องประดับที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับการใช้งานของผู้บริโภคมากยิ่งขึ้นและสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าที่สวมใส่เครื่องประดับ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุ Zn และ Ni ที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง
2. เพื่อศึกษาการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์

ความสำคัญของการวิจัย

1. ประโยชน์เชิงวิชาการ
เป็นประโยชน์สำหรับนักวิชาการด้านเครื่องประดับ ในการส่งเสริมองค์ความรู้ด้านการผลิตเครื่องประดับ การปรับปรุงคุณภาพให้มีความแข็งแรงเหมาะสม
2. ประโยชน์ต่ออุตสาหกรรม
ทำให้ได้สูตรและกระบวนการที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับการออกแบบการผลิตในอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตเครื่องประดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอบเขตการวิจัย

1. ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา
ตัวแปรต้น คือ สัดส่วนของธาตุ Zn และ Ni, กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ
ตัวแปรตาม คือ สมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง
2. ขอบเขตด้านวิธีการดำเนินงาน
 - 1) การหล่อโลหะประณีตหรือการหล่อขึ้นหิ้งหาย (Investment casting/Lost-wax casting) ด้วยเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ (Vacuum Casting Machine)
 - 2) การศึกษาส่วนผสมของโลหะ ผสมในระบบ AgCuZnNi
 - 3) การวิเคราะห์สมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่ได้สัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชิงพาณิชย์
3. ขอบเขตด้านการวิเคราะห์สมบัติของอัลลอย
 - 1) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
 - 2) วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence; XRF)

3) วิเคราะห์สมบัติโดยการวัดค่าความแข็งของโลหะ (Hardness) ด้วย Micro Vickers Hardness

4) วิเคราะห์ค่าแรงดึง Yield strength ค่า tensile strength ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Hounsfield H10 KM)

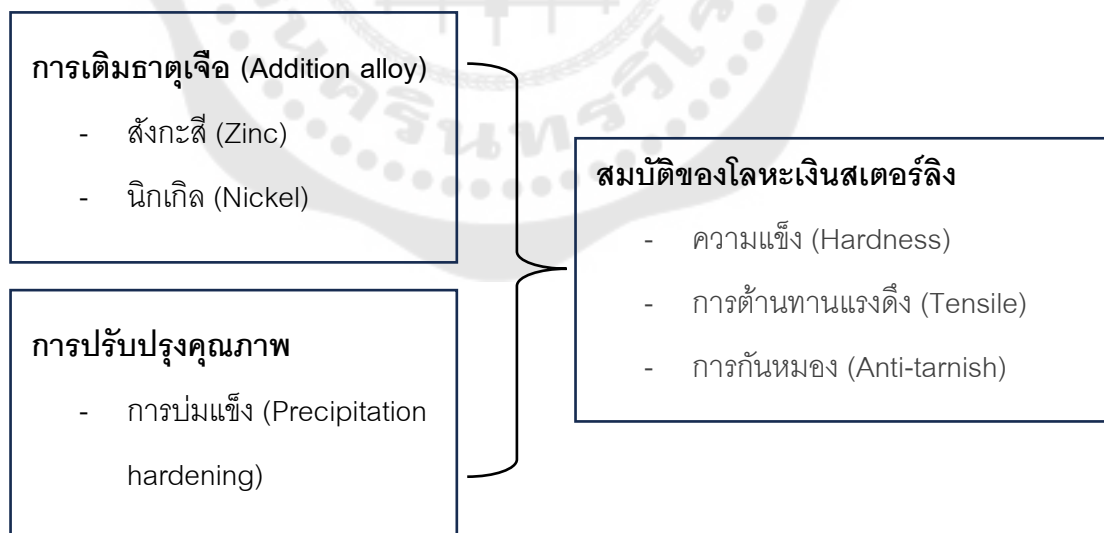
5) วิเคราะห์ค่าสีของโลหะ ระบบ CIE-Lab ด้วยเครื่อง Spectrophotometer HunterLab รุ่น UltraScanVIS

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. โลหะผสมหรืออัลลอย หมายถึง การผสมกันของธาตุโลหะระหว่าง ธาตุโลหะบริสุทธิ์ (pure metal) กับธาตุโลหะชนิดอื่นๆ ที่เรียกว่า ปริอัลลอย (pre-alloy) ที่เติมเข้ามาเพื่อเพิ่มสมบัติในการหล่อ

2. ปริอัลลอย (pre-alloy) หมายถึง ธาตุโลหะตั้งแต่ 1 ธาตุขึ้นไป ที่ถูกเติมเพื่อเพิ่มสมบัติให้แก่ธาตุโลหะบริสุทธิ์ (pure metal) ได้เป็นโลหะผสมหรืออัลลอยที่มีโครงสร้าง สมบัติทางกลหรือทางกายภาพที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานนั้นๆ

กรอบแนวคิดในการวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอในหัวข้อดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 เอกสารเกี่ยวกับโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 โลหะเงินสเตอร์ลิง
- 1.2 สมบัติของโลหะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในกระบวนการผสมโลหะ
- 1.4 การหล่อโลหะเครื่องประดับ
- 1.5 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อน ด้วยการบ่มแข็ง

ตอนที่ 2 ทฤษฎีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของโลหะ

- 2.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness)
- 2.2 การทดสอบแรงดึงของโลหะ (Tensile test of metal)
- 2.3 การทดสอบการกันหมอง (Tarnish test: Fuming Test)
- 2.4 การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIE-Lab
- 2.5 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้อง Optical Microscope และ

Scanning Electron Microscope

- 2.6 การตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะผสมด้วย X-Ray Fluorescence

ตอนที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : ธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง

ตอนที่ 1 เอกสารเกี่ยวกับโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 โลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะผสมหรืออัลลอย (Alloys) ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เป็นการผสมรวมกันของโลหะ 2 ส่วน คือ ธาตุโลหะบริสุทธิ์ (Pure metal) มักเป็นกลุ่มของโลหะมีค่า (Precious metal) เช่น เงิน (Silver), ทอง (Gold) และแพลทินัม (Platinum) ผสมกับธาตุชนิดอื่น ๆ ตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป ที่เรียกว่า พรีอัลลอย (Pre-Alloy) หรือมาสเตอร์อัลลอย (Master Alloy) ทำหน้าที่เพิ่มสมบัติให้กับ อัลลอยนั้น ๆ เช่น ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานในการหมอง ฯลฯ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำอัลลอยทองคำขาวมาศึกษาในโลหะเงินผสมหรือที่นิยมเรียกในอุตสาหกรรมว่า เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver)

เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) หรือ เงิน 925 จะมีปริมาณโลหะเงินอยู่ 92.50% ผสมกับธาตุอื่น ๆ อีก 7.5% ซึ่งธาตุหลักที่สำคัญที่ใช้ผสมกับโลหะเงิน คือ ทองแดง เพราะทองแดงมีคุณสมบัติทำให้โลหะผสมแข็งแรงขึ้น แต่เงินสเตอร์ลิงประเภทนี้จะหมองง่าย ดังนั้นปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนานำเอาธาตุโลหะอื่น ๆ มาใช้ผสมเพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษอื่น ๆ ให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน เช่น การผลิตเงินสปริงจะมีการผสมนิกเกิล (Nickel) เข้าไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเป็นสปริง หรือการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมอง จะมีการเติมสังกะสี (Zinc), อินเดียม (Indium), ซิลิคอน (Silicon) หรือเจอร์มาเนียม (Germanium) ลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง (สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), 2556)

พรีอัลลอยหรือธาตุเจือ คือ ธาตุโลหะที่เติมเพื่อเพิ่มความสามารถของอัลลอยนั้น ๆ ทั้งนี้ธาตุโลหะที่ผสมกันจะทำให้เกิด โครงสร้าง สมบัติ รวมถึงการเปลี่ยนแปลง เพื่อการนำไปใช้งาน ซึ่งอัลลอยนี้เมื่อถูกหลอมรวมแล้ว มีสมบัติทางโลหะวิทยาที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. สารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Homogeneous solid solution) คือ ของแข็งที่เกิดการหลอมตัวเป็นเนื้อเดียว มีองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเหมือนกันในทุกๆ ส่วน เช่น การผลิตแพลทินัม 950 ประกอบไปด้วยแพลทินัม 95 wt% และโคบอลต์หรือรูทีเนียม 5 wt%

2. สารละลายของแข็งเนื้อผสม (heterogeneous solid solution) คือ ของแข็งที่เมื่อหลอมรวมกันเกิดการแบ่งเฟสต่าง ๆ แยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจน มีองค์ประกอบไม่เหมือนกันในทุก ๆ ส่วน สามารถตรวจสอบได้โดยกล้องจุลภาค ซึ่งในอุตสาหกรรมเครื่องประดับโลหะมีค่าส่วนใหญ่ที่อยู่ในกลุ่มนี้ คือ ทองเคต่าง ๆ อาทิเช่น ทอง 18K เป็นทองที่มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 75 wt% ผสมกับ พรีอัลลอย 25 wt% ซึ่งพรีอัลลอยของทองหลัก ๆ จะประกอบด้วยธาตุทองแดง เงิน และธาตุอื่น ๆ จะถูกใส่ในปริมาณน้อย เพื่อเพิ่มสมบัติสำหรับงานเฉพาะประเภท เช่นเดียวกับ

โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลักที่ผสมลงในโลหะเงิน 92.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายเนื้อผสม

3. สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compound) คือ ของแข็งที่เกิดจากโลหะ 2 ชนิดหลอมละลายรวมกันแล้วเกิดเป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก ซึ่งมีสมบัติที่แข็งและเปราะ โดยทั่วไปจะแสดงโครงสร้างทางจุลภาคแบบเนื้อเดียว เช่น ทองสีฟ้าและทองสีม่วงที่พบว่าเป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ (ขจีพร วงศ์ปรีดี, 2551)

1.2 สมบัติของโลหะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1) เงิน (Silver)

โลหะเงินบริสุทธิ์มีสีขาวแวววาวสูงและมีความอ่อนมาก ทำให้สามารถบิดโค้งงอและตีเป็นแผ่นบาง ๆ สามารถดึงเป็นเส้นได้ดีมาก จึงมีการเติมธาตุอื่นในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น เช่น เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ที่มีการผสมทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็ง แต่เงินจะเกิดความหมองได้เมื่อใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากเงินทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์หรือทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (ขจีพร วงศ์ปรีดี, 2551)

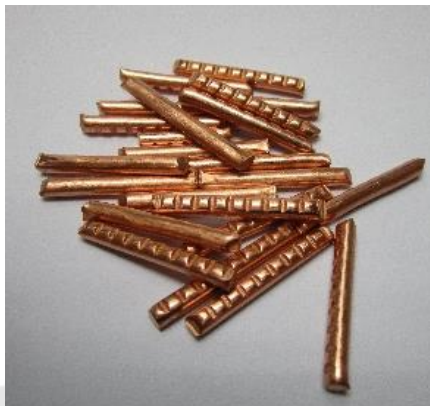


ภาพประกอบ 1 โลหะเงิน (Silver)

2) ทองแดง (Copper)

ทองแดงมีสีแดงอมชมพู จึงนิยมนำมาผสมเพื่อให้ได้สีของโลหะผสมที่ต้องการ เช่น ทองชมพู และยังมีสมบัติในการโค้งงอ ตีขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ดี เป็นสื่อไฟฟ้าและตัวนำที่ดี เช่นเดียวกับโลหะเงิน เป็นโลหะที่ไม่ได้มีมูลค่าทางการตลาดสูงในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเมื่อ

เทียบกับเงินหรือทอง แต่ทองแดงเป็นโลหะที่จำเป็นอย่างมากสำหรับการเติมในการผสมอัลลอยทองหรือเงิน เพื่อให้เกิดสมบัติที่ต้องการ (ขจีพร วงศ์ปรีดี, 2551)



ภาพประกอบ 2 โลหะทองแดง (Copper)

3) สังกะสี (Zinc)

สังกะสีเป็นโลหะสีเงิน มีสมบัติเด่นในการลดอุณหภูมิการหล่อ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ นิยมใช้ในการเติมลงในอัลลอยทองหรือเงิน เพราะช่วยเพิ่มการไหลได้ดี ช่วยทำให้ผิวงานมีความเงางาม ด้านการหมองได้ดี ถึงแม้ว่าสังกะสีเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ช่วยลดการเกิดออกไซด์ของทองแดง แต่ก็ยังเป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุนจากการหดตัวระหว่างการเย็นตัว ซึ่งสังกะสีจะเกิดเป็นสังกะสีออกไซด์แทนแล้วติดอยู่ในชิ้นงาน การเติมสังกะสีในสัดส่วนที่มากเกินไปร้อยละ 3 ทำให้โลหะอาจเกิดการแตกหรือเปราะจากสังกะสีออกไซด์ได้ (ขจีพร วงศ์ปรีดี, 2551)



ภาพประกอบ 3 โลหะสังกะสี (Zinc)

4) นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีขาวยเงิน มีสมบัติในด้านความแข็งแรง สามารถขึ้นรูปในอุณหภูมิต่ำได้ดี นำมาตีแผ่เป็นแผ่นและยังเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี เป็นโลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ใช้เป็นส่วนผสมของโลหะต่าง ๆ เนื่องจากสมบัติของนิกเกิลมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี ไม่เป็นสนิมง่ายเช่นเดียวกับสมบัติของทอง (Cableland Center, 2563) ซึ่งในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ นิยมใช้นิกเกิลเป็นส่วนผสมของทองคำขาวเพราะช่วยทำให้ทองมีสีขาว และมีราคาถูกกว่าโลหะตัวอื่นที่ช่วยเพิ่มความขาว เช่น แพลลาเดียม



ภาพประกอบ 4 โลหะนิกเกิล (Nickel)

ที่มา: <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel> (2023)

ตาราง 1 แสดงข้อมูลพื้นฐานของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

Element	Silver	Copper	Zinc	Nickel
Symbol	Ag	Cu	Zn	Ni
Atomic Number	47	29	30	28
Atomic radius (nm.)	1.44	1.28	1.33	1.25
Crystal structure	FCC	FCC	HCP	FCC
Density of Solid (g/cm ³)	10.49	8.94	7.13	8.90
Electronegativity	1.93	1.90	1.65	1.91
Boiling point (°C)	2,162	2,562	907	2,913
Melting point (°C)	961.8	1,084.6	419.5	1,455
Valency	1	1	2	2

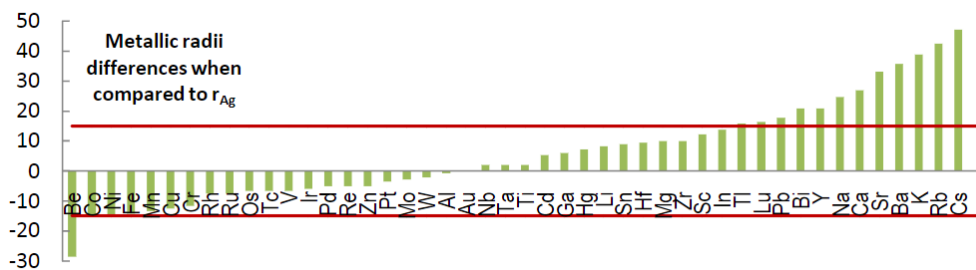
1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในกระบวนการผสมโลหะ

1.3.1 Hume-Rothery electron concentration

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการละลายเข้ากันได้ของโลหะตามกฎ Hume-Rothery

1. ความต่างของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอะตอม ต้องต่างกันไม่เกิน 15% เพราะถ้าอะตอมมีขนาดต่างกันมากจะทำให้ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโลหะลดลง

S. Praiphruk และคณะ (Praiphruk et al., 2013b) ได้ใช้เกณฑ์ Hume-Rothery เพื่อระบุองค์ประกอบธาตุเจือที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การละลายที่เป็นของแข็งสูงสุดโดยการเติมธาตุเจือในปริมาณที่น้อยที่สุด สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของรัศมีโลหะเมื่อเทียบกับโลหะเงิน (แสดงดังภาพประกอบ 5) ตามสมมติฐานอัตราส่วนไม่เกิน 15%



ภาพประกอบ 5 เปอร์เซ็นต์ความต่างของรัศมีอะตอมธาตุต่าง ๆ เมื่อเทียบกับโลหะเงิน (Praiphruk et al., 2013a)

2. โครงสร้างผลึกของธาตุที่นำมาผสมกันควรมีโครงสร้างเหมือนกัน เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้และจะสามารถละลายด้วยกันได้ดี

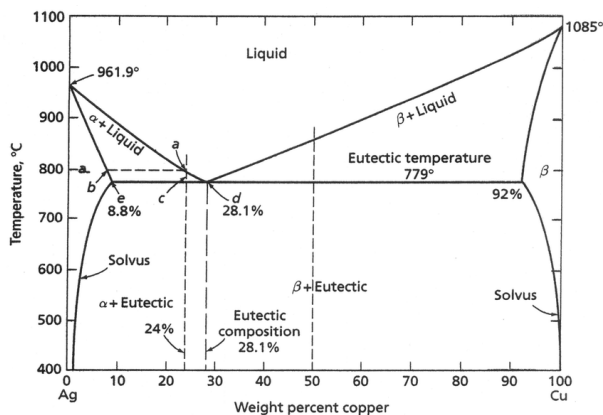
3. ค่า Electronegativity คือ ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัวเองเมื่อเกิดการสร้างพันธะเคมี เมื่อผสมโลหะจึงควรมีค่าไม่ต่างกันมากเกินไป เพราะถ้าธาตุที่ผสมกันธาตุหนึ่งมีความเป็น electronegative valence ส่วนอีกธาตุเป็น electropositive valence จะเกิดแรงดึงดูดให้กลายเป็นสารประกอบ (Intermetallic compounds)

4. ธาตุที่นำมาผสมควรมีประจุ (valency) ที่เท่า ๆ กัน

1.3.2 เฟสไดอะแกรม (Phase Diagram)

เฟสไดอะแกรม คือ การอธิบายช่วงระยะของโลหะผสมที่เกิดขึ้น ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กับเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่นำมาผสมในโลหะ เฟสไดอะแกรมทั่วใช้ระบบโลหะผสมแบบทวิ

(Binary alloy systems) เช่น เฟสไดอะแกรมของทองแดง – เงินที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันและเปอร์เซ็นต์ของทองแดง



ภาพประกอบ 6 เฟสไดอะแกรม เงิน-ทองแดง

ที่มา: www.youth.hazzart.it/component-youth-guide/copper-silver-phase-diagram (2023)

เฟสไดอะแกรม หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไดอะแกรมสมดุล (Equilibrium diagrams) เพราะบ่งบอกถึงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุล โครงสร้างที่แสดง ส่วนประกอบ และอุณหภูมิอื่นๆ ที่กำหนดขึ้นจะเกิดขึ้นพร้อมกันกับมีค่าพลังงานเคมีต่ำที่สุด

1.4 การหล่อโลหะเครื่องประดับ

การผลิตเครื่องประดับด้วยการหล่อ มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ขึ้นอยู่กับประเภทโลหะและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ การหล่อตัวเรือน (Casting) แบ่งออกได้เป็น การหล่อแบบสุญญากาศ (Vacuum Casting) และการหล่อแบบเหวี่ยง (Centrifugal Casting) โลหะผสมที่นิยมใช้ในการผลิตเครื่องประดับ ได้แก่ ทอง เงิน ทองเหลือง ทองแดง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การหล่อระบบดูดสุญญากาศ (Vacuum Casting) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเตรียมกระบอกรับน้ำ ทำโดยผสมปูนกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมในเครื่องผสมปูนในสภาวะสุญญากาศ นำต้นเทียนสวมเข้ากับกระบอกรับน้ำและนำไปวางในเครื่องผสมปูน จากนั้นเทปูนลงในกระบอกรับน้ำพร้อมกับดูดอากาศไปด้วย

2. การอบกระบอกรับน้ำ โดยเริ่มให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 90-150 องศาเซลเซียส รักษาระดับอุณหภูมิไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อละลายเทียนออกจากกระบอกรับน้ำ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 270-330 °C ภายใน 1 ชั่วโมง และคงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเผาไหม้สิ่งตกค้าง ป้องกันไม่ให้เกิดสิ่งเจือปน เพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 730-750 °C ภายใน 2 ชั่วโมงและคงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง เพื่อให้ปูนมีโครงสร้างเกิดพันธะที่แข็งแรง มีความทนทาน

แล้วลดอุณหภูมิของเตาอบปูนลงมาให้เหมาะสมกับประเภทและขนาดของชิ้นงานโดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และคงระดับอุณหภูมิไว้จนกว่าจะทำการหล่อ

3. การหล่อ เมื่อหลอมโลหะหลอมเหลวภายใต้สภาวะสุญญากาศ และปล่อยให้โลหะเข้าสู่โพรงแบบในกระบอกปูน จากนั้นจะทำการหล่อเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เมื่อทำการหล่อเสร็จแล้วนำกระบอกปูนออกจากเครื่องหล่อผ่านกระบวนการทำให้กระบอกปูนเย็นตัวลง

4. การนำต้นงานออกจากกระบอกปูน โดยการฉีดด้วยน้ำแรงดันสูงเข้าไปทำลายปูนพร้อมกับทำความสะอาดชิ้นงานไปด้วย

5. การทำความสะอาดผิวชิ้นงาน โดยทั่วไปโลหะหลังจากการหล่อจะเกิดออกไซด์อยู่ที่บริเวณผิวชิ้นงานจึงมีการกำจัดโดยใช้วิธีการแช่น้ำกรดที่มีความเข้มข้น 35% ประมาณ 15 นาที และล้างด้วยน้ำสะอาด ตัวเรือนเครื่องประดับที่ได้จากวิธีการหล่อข้างต้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับต้นเทียน (เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 2549)

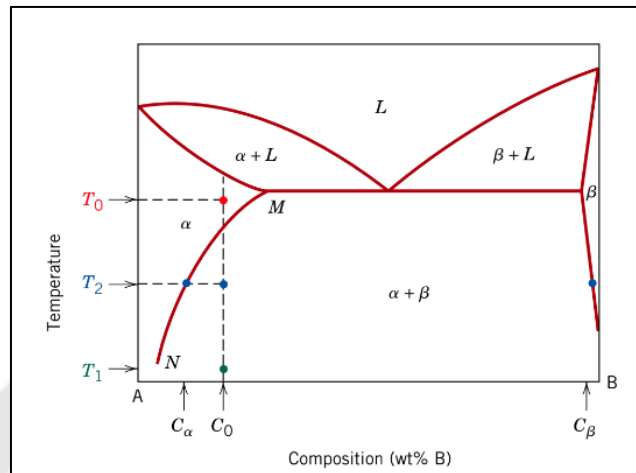
1.5 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อนด้วยการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening)

การปรับปรุงสมบัติโลหะทางกลและทางกายภาพในโลหะเงินสเตอร์ลิงให้ดีขึ้นเป็นไปตามความต้องการทำได้โดยใช้กระบวนการทางความร้อน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งและลดความเค้นสะสมตกค้างในโลหะ เพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitate hardening) (ณัฐพล ชมแสง et al., 2560) เป็นการทำให้อนุภาคของสารประกอบธาตุขนาดเล็ก ๆ ตกตะกอน กระจายตัวอย่างหนาแน่นในเฟสพื้น อนุภาคที่ตกตะกอนของเฟสที่สองจะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในขณะที่โลหะได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากแผนภูมิสมดุลเฟสของ A-B (ภาพประกอบ 7) แสดงการตกตะกอนของโลหะผสม A ที่มีส่วนผสมของธาตุ B ที่ C_0 wt% ซึ่งขั้นตอนการบ่มแข็งของโลหะผสมเงินจากการศึกษามีขั้นตอนหลัก ๆ ทั้งหมด 3 ขั้นตอน (ภาพประกอบ 8) ดังนี้

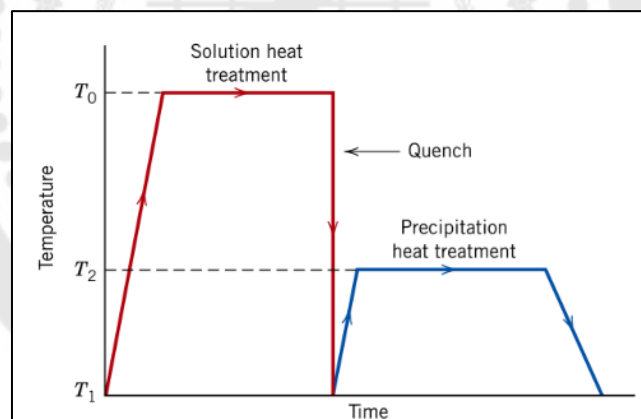
1. การอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogenization or Solution treatment) โดยโลหะจะถูกให้ความร้อน โดยให้อุณหภูมิเหนือเส้น Solvus temperature หรือที่จุด T_0 แช่ไว้จนกระทั่งเฟส β ที่มีทั้งหมดละลายเพื่อให้ได้สารละลายของแข็งเนื้อเดียวกัน เหลือเพียงเฟส α เท่านั้น ซึ่งในโลหะเงินสเตอร์ลิง T_0 จะมีอุณหภูมิประมาณ 745°C

2. การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) โลหะจะถูกทำให้โลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาที่จุด T_1 (ในโลหะผสมโดยส่วนมาก T_1 คืออุณหภูมิห้อง) เพื่อป้องกันการตกผลึกของ

เฟส β ในเฟส α ได้ ดังนั้นจะได้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียร เพราะมีส่วนผสมของธาตุ B เกินสมดุล ทำให้โลหะผสมในสภาวะนี้มีความอ่อนตัวลง



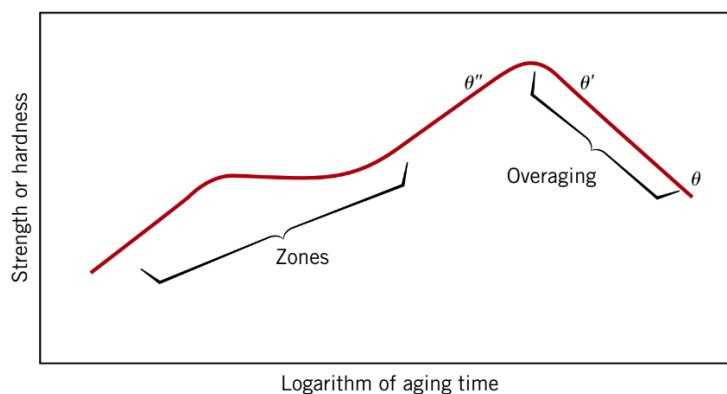
ภาพประกอบ 7 แผนภูมิสมดุลของโลหะ A-B (Callister & Rethwisch, 2009)



ภาพประกอบ 8 แผนภาพความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็ง (Callister & Rethwisch, 2009)

3. การบ่มแข็ง (Precipitation heat treatment) จากที่ได้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) โลหะผสมถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางในช่วง T_2 อยู่ภายในเฟส $\alpha + \beta$ เพื่อให้เฟส β ตกตะกอนออกมา จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง เกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงและระยะเวลา (สเกลลอการิทึม) ได้ดัง

ภาพประกอบ 9 เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไปจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นค่าความแข็งจะลดลงเรื่อย ๆ เกิดจากการบ่มที่นานเกินไป หรือที่เรียกว่า Overaging (Callister & Rethwisch, 2009) ดังนั้นเวลาการบ่มควรใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับโลหะเงินสเตอริลควรรีใช้อุณหภูมิในการบ่มแข็งประมาณ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับเวลาในการบ่มแข็ง ณ อุณหภูมิคงที่ในฟังก์ชันลอการิทึม (Callister & Rethwisch, 2009)

ตอนที่ 2 ทฤษฎีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของโลหะ

สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) คือ การศึกษาเกี่ยวกับความทนทานของวัสดุที่มีต่อแรงที่กระทำจากภายนอก เพื่อนำมาพิจารณาการเลือกวัสดุไปใช้งานให้เหมาะสม อาทิเช่น ความแข็ง (Hardness) ความทนแรงดึง (Tensile strength) ความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) และความเหนียว (Ductility) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาโลหะทางด้านความแข็งและความทนแรงดึง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)

ในโลหะผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะผสมนั้น ๆ ตั้งแต่กระบวนการผลิตและกระบวนการแปรรูป สมบัติเชิงกลด้านความแข็งของโลหะจึงเป็นที่นิยมใช้ตรวจสอบทางโลหะวิทยา ซึ่งโดยทั่วไปการวัดความแข็งของโลหะในแต่ละประเภทจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าวัสดุนั้น ๆ รวมถึงกระบวนการวัด ต้องมีความเข้าใจเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของโลหะบางประเภทและไม่ให้เกิดข้อผิดพลาด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อให้ได้ค่าที่มีความเที่ยงตรง

ความแข็ง คือ การที่วัสดุต้านทานต่อแรงกดทดสอบ การทดสอบความแข็งโดยทั่วไปทำได้หลายวิธี มักเป็นการทดสอบแบบทำลาย ในทางโลหวิทยาการจะเป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ของโลหะเมื่อได้รับแรงกดจากหัวกดมากกว่าทำให้วัสดุทดสอบ โดยการทดสอบความแข็งที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

เป็นการใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมโดยที่ปลายหัวกดจะทำมุม 136 องศา ในการกดลงบนพื้นผิววัสดุ จะได้รอยกดตามภาพประกอบ 11 เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้เลือกแรงกดตั้งแต่ 1-100 kgf เป็นเวลา 10-15 วินาที ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ ซึ่งการทดสอบสามารถการอ่านค่าได้แม่นยำสูง



ภาพประกอบ 10 เครื่อง Vickers Hardness

ที่มา: <https://afirmart.co.za/product/dtec-hvs-1000-digital-micro-vickers-hardness>. (2023)

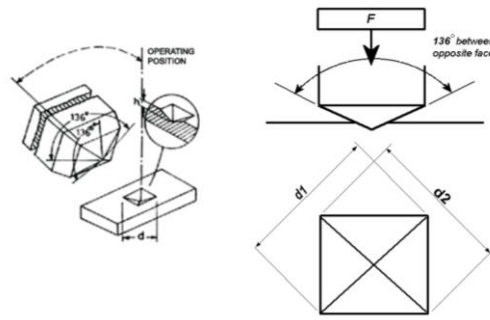
ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เนื่องจากหัวกดทำจากเพชรมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้วัดค่าความแข็งของโลหะเพราะสามารถวัดได้ตั้งแต่โลหะที่ความนิ่มมากไปจนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ เพียงเลือกแรงกดที่เหมาะสมเท่านั้น หัวกดแบบเดียวสามารถใช้ได้กับวัสดุทุกประเภทขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทำกรทดสอบ (วิระชัย ลามอ, 2550)

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2}$$

F = แรงกด หน่วย kgf

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง

HV = ความแข็งวิกเกอร์

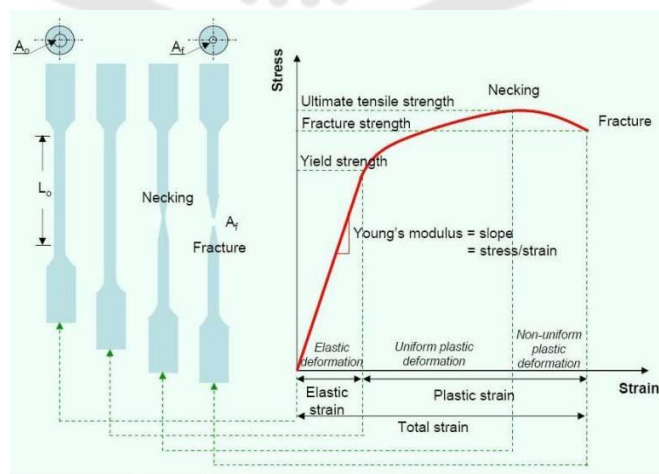


ภาพประกอบ 11 หลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

ที่มา: <https://www.cal-laboratory.com/บทความ/วิธีการใช้งาน-เครื่องทดสอบความแข็ง-hardness-tester/> (2024)

2.2 การทดสอบแรงดึงของโลหะ (Tensile test of metal)

ใช้สำหรับทดสอบความแข็งแรงของโลหะด้วยการดึงตัวอย่างทดสอบจนขาดในระยะเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ ซึ่งชิ้นงานที่นำมาใช้ทดสอบจะมีลักษณะแตกต่างกันไปสำหรับขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ การเตรียมตัวอย่างของโลหะอาจเตรียมเป็นแผ่นหรือแท่งตัวอย่าง โดยข้อมูลที่ได้จากการดึงจะแสดงในรูปแบบกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานดังภาพประกอบ 12



Shape of Ductile Specimen at Various Stages of Testing

ภาพประกอบ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุทั่วไป

ที่มา: <https://practicalmaintenance.net/?p=948> (2023)

ข้อมูลในด้านสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง จากแผนภาพความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมมี 4 อย่างดังต่อไปนี้

1. โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก (Modulus of elasticity)

เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ จากกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถนำมาคำนวณค่าโมดูลัสของความเป็นอีลาสติกได้จากความชันของกราฟในระยะแรกที่วัสดุยังแสดงสมบัติยืดหยุ่น (Elastic deformation) อยู่ สำหรับโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 % ของความเครียด โดยที่ค่าได้นี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะ (bond strength) ระหว่างอะตอมของโลหะ

2. ความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength)

เป็นค่าความเค้นที่โลหะเปลี่ยนแปลงสมบัติ จากแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ไปเป็นแบบถาวร (Plastic deformation) สำหรับวัสดุบางประเภทจะแสดงจุดครากอย่างชัดเจนจะสังเกตได้จากกราฟที่มีค่าความชันเป็นศูนย์ ส่วนวัสดุที่ไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.1% หรือ 0.2% ของ plastic strain ใช้เป็นค่ากำหนดในการหาจุดครากที่เกิดขึ้นในกราฟความเค้นและความเครียด อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า offset yield

3. ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

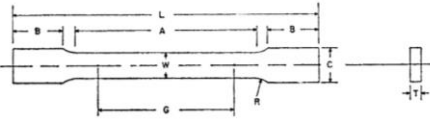
เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรมสูงสุด

4. เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation)

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึงเมื่อเทียบกับระยะการวัด (gage length) ของชิ้นงาน และเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความเหนียว (ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปโลหะยิ่งอ่อนยังมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมากแสดงว่าโลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก (T MAX TECHNOLOGY, 2016)

2.2.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นโดยมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบนั้นแสดงในภาพประกอบ 13 โดยวัสดุที่ใช้มาตรฐาน ASTM E8 ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบจะมี เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง เงิน และทอง เป็นต้น (American Society for Testing and Materials, 2013)

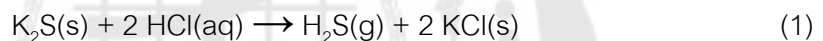


	Dimensions		
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	Subsize Specimen 6 mm [0.250 in.] Wide
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

ภาพประกอบ 13 ขนาดชิ้นงานทดสอบ (American Society for Testing and Materials, 2013)

2.3 การทดสอบการกันหมอง (Tarnish Test: Fuming Test)

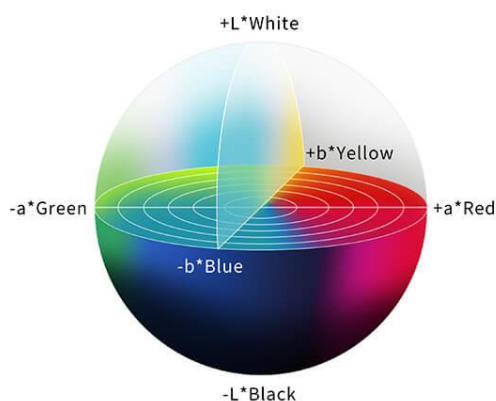
การทดสอบการกันหมอง ใช้การทดสอบแบบไอในสภาวะแวดล้อมแบบปิด ที่มี H₂S 0.4% อยู่ในบรรยากาศ ในการทดลองนี้ทำให้เกิดสภาวะบรรยากาศของ H₂S ได้โดยทำปฏิกิริยาโพแทสเซียมซัลไฟด์ 0.21 กรัม (K₂S) ผสมด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ 21 มิลลิลิตร (Lohwongwatana et al., 2015) ปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการต่อไปนี้:



ก่อนการทดลองทำการเตรียมตัวอย่างโดยการขัดด้วยกระดาษทรายดังนี้ลำดับ: 80, 120, 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตัวอย่างทั้งหมดจะวางในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม 0.4% H₂S เป็นเวลา 30 นาที

2.4 การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIE-LAB

ระบบสี CIE L*a*b* หรือ CIELAB เป็นระบบที่ใช้ในการวัดสีวัตถุที่พัฒนามาจากระบบ CIE Tristimulus Value (x, y และ z) และ CIE Chromaticity Coordinates (x, y และ Y) โดยมีการพัฒนาปรับปรุงให้สามารถบอกความแตกต่างของค่าสีได้อย่างแม่นยำ สม่ำเสมอและใกล้เคียงกับสีที่ตามองเห็น ปัจจุบันการระบุค่าสีที่เป็นที่ยอมรับในวงกว้างคือ CIELAB 1976 ซึ่งมีลักษณะ Color space (Advance Photo Systems Limited, 2024) ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แผนภูมิของระบบ CIE-LAB ซึ่งแสดง L, a, b color space

ที่มา: <https://www.linshangtech.com/tech/lab-color-model-color-meter-tech.html> (2021)

โดย L^* เป็นค่าที่ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness) ของวัตถุ

ถ้า $L = 0$ แสดงแสงสีดำ

ถ้า $L = 100$ แสดงแสงสีขาว

a^* เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกแดงสี

ถ้า a เป็น + บ่งบอกถึงวัตถุมีทิศทางไปทางสีแดง

ถ้า a เป็น - บ่งบอกถึงวัตถุมีทิศทางไปทางสีเขียว

b^* เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกโทนสี

ถ้า b เป็น + บ่งบอกถึงวัตถุมีทิศทางไปทางสีเหลือง

ถ้า b เป็น - บ่งบอกถึงวัตถุมีทิศทางไปทางสีน้ำเงิน

2.5 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้อง Optical Microscope และ Scanning Electron Microscope

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้าง และขนาดของเกรนของโลหะที่เกิดจากการผสมสัดส่วนของโลหะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ทั้งโครงสร้างในระดับมหภาคไปจนถึงระดับจุลภาค โดยการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาสามารถตรวจสอบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope; OM)

การตรวจสอบโครงสร้างโดยทั่วไปนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงในการศึกษา ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์จะต้องเตรียมผิวงานให้เรียบ โดยนำชิ้นงานไปขัดกับกระดาษทราย เบอร์ต่าง ๆ ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ตามด้วยการขัดกับผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินาเพื่อลบบรอย

กระดาษทรายออกจากผิวทดสอบ แล้วใช้สารละลายเจือจางในการกัดผิวชิ้นงานเพื่อให้เห็นโครงสร้างของโลหะ หลังจากนั้นนำตัวอย่างล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและทำให้ชิ้นงานแห้งสนิท ก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้าง



ภาพประกอบ 15 กล้องจุลทรรศน์

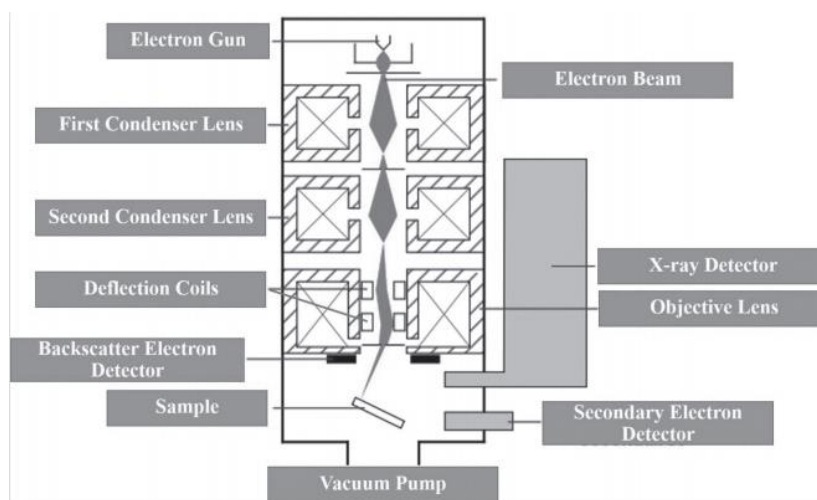
ที่มา: <https://www.microscopeworld.com/-reflected-light-microscope.aspx> (2023)

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุให้สามารถมองเห็นที่กำลังขยายสูงกว่า โดยใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง และใช้เลนส์ที่มีความเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนแทนเลนส์กระจก จะได้สัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนที่กระทำกับวัตถุ จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวบรวมและแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของวัตถุบนจอรับภาพ ซึ่งให้ภาพที่กำลังขยายสูงสามารถวิเคราะห์รายละเอียดของภาพได้สูงถึง 100 นาโนเมตร (Goldstein et al., 2003)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope; SEM) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายนอกของชิ้นงานทดสอบ ที่มีระยะความชัดลึกสูง โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพเสมือน 3 มิติ รายละเอียดของภาพทำให้สามารถแยกแยะและระบุลักษณะการรวมตัวของธาตุ การแบ่งเฟส และขนาดเกรนของโลหะในพื้นผิวชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ส่วนประกอบของเครื่อง SEM



ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง
(Goldstein et al., 2003)

ในขณะที่ลำอิเล็กตรอน (electron beam) พุ่งชนตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของโลหะ มีการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นพลังงานในระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) (ภาพประกอบ 16) ออกมา ซึ่งสามารถรวบรวมและแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนตรงนั้นนำไปใช้ศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่าง หรือการวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ ซึ่งภาพที่เกิดจากการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image; SE) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและมีพลังงานน้อยกว่า 50 eV เกิดที่พื้นผิวลึกไม่เกิน 10 nm. ซึ่งง่ายต่อการรวบรวม ให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของพื้นผิว ทำให้เป็นสัญญาณที่นิยมนำมาสร้างภาพเสมือนใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image; BSE) เป็นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวลึกเกิน 10 nm มีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง สัญญาณภาพที่ได้จะแสดงตามความต่างของเลขอะตอม (composition contrast) ในแต่ละพื้นที่บนผิวชิ้นงาน โดยธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำจะมีเฉดสีมืด (ดำ) กว่าธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจึงจะมีเฉดสีเทาไปจนถึงสีสว่าง (ขาว) เกิดจากการสะท้อนของอิเล็กตรอนไปยังจอรับภาพและนอกจากนี้สามารถแสดงภาพในลักษณะ topography

คือลักษณะทางกายภาพที่เป็นธรรมชาติของตัวอย่างรวมถึงความสูงต่ำ ลึกตื้นของผิวตัวอย่างได้อีกด้วย

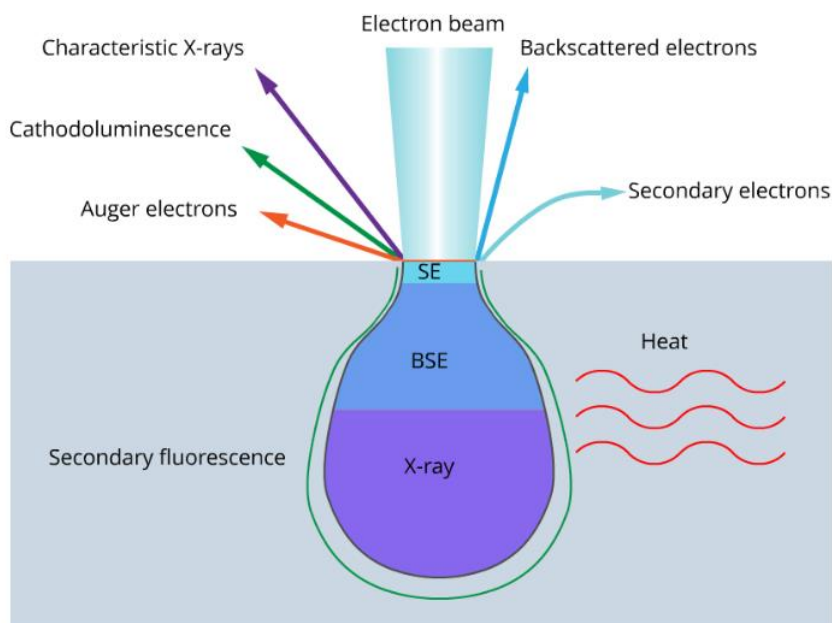
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-ray image; X-ray) เป็นภาพที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากเพียงพอจนหลุดออกจากวงโคจรเพื่อรักษาเสถียรภาพ ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจรถัดไปจะลดระดับพลังงานภายในลงและเข้ามาแทนที่ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่มาแทนมีระดับพลังงานสูงกว่า จึงมีการปล่อยในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งมีความยาวคลื่นเฉพาะตัวในแต่ละธาตุ จึงเรียกว่า “รังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray)” สามารถนำมาใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุตามระดับพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพที่เรียกว่า Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากค่าสเปกตรัมที่ได้จากรังสีเอ็กซ์

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

1) Point analysis คือ การใช้ลำของอิเล็กตรอนตกกระทบบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการศึกษา เพื่อวัดค่าปริมาณของรังสีเอ็กซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ

2) Line scan analysis คือ การใช้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่องกราดตามแนวตัวอย่าง ซึ่งนิยมนำมาใช้ศึกษาในบริเวณที่สนใจ เช่น การหาขอบเขตของรอยต่อของเกรนหรือเฟสของโลหะ

3) Mapping analysis คือ การใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดลงบนพื้นผิวตัวอย่างซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์แบบนี้ จะแสดงเป็นภาพลักษณะการกระจายตัวของธาตุที่มีบนพื้นผิวนั้น ๆ (ดลฤดี โตเย็น, 2566)



ภาพประกอบ 17 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง
ที่มา: https://myscope.training/SEM_Beam_specimen_interactions (2024)

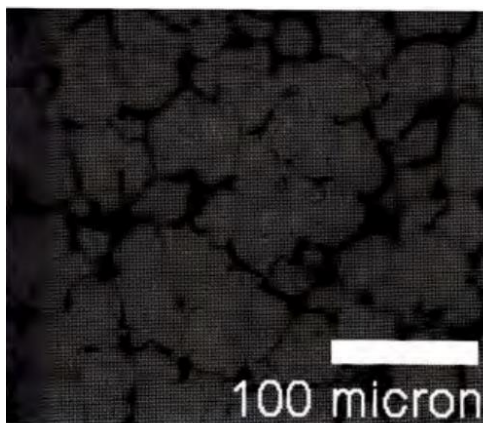
2.6 การตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะผสม ด้วย X-Ray Fluorescence

ในอุตสาหกรรมนิยมใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence ในการตรวจสอบค่าความบริสุทธิ์ของโลหะมีค่า เนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง เหมาะสำหรับเครื่องประดับที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้ว โดยค่าความถูกต้องของการวัดด้วยเทคนิค XRF จะมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ประการ ที่เป็นตัวกำหนดคือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานและความเที่ยงตรงของเครื่องมือ การกระจายของธาตุต่าง ๆ ในโลหะเป็นองค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์ เนื่องจาก การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วย XRF เป็นจุด (spot) เพียงจุดเดียวเท่านั้น ซึ่งหลักการของเครื่องวัดจะอาศัยการวัดปริมาณ X-Ray Fluorescence ที่ปลดปล่อยมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิด โดยที่เครื่องจะปล่อยรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีไปที่ชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมหลุดออกมาในรูปโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจะไม่เสถียร จึงเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปฟลูออเรสเซนซ์ เพื่อให้กลับมามีอยู่ในสถานะที่เสถียรกว่า ซึ่งพลังงานที่คายออกมาจะมีความแตกต่างกัน ด้วยเอกลักษณ์เฉพาะในการคายพลังงานของธาตุแต่ละชนิด จึงทำให้เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุแต่ที่อยู่ที่ชิ้นงานได้ จากตำแหน่งและความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ตามลำดับ (สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), 2565)

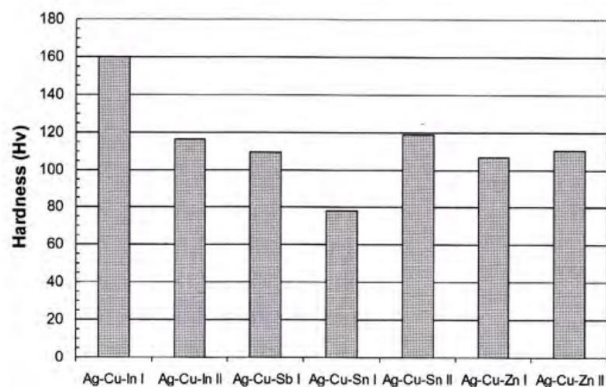
ตอนที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : ธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในโลหะเงินสเตอร์ลิง

C.W. Corti (2017) ได้ศึกษาพื้นฐานของโลหะมีค่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของโลหะผสมที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะมีค่า ทั้งในด้านความแข็งแรง จุดหลอมเหลว สี ความยืดหยุ่น ฯลฯ โดยศึกษาผ่านการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของโลหะมีค่า 4 ชนิด คือ ทอง แพลทินัม แพลเลเดียม และเงิน ซึ่งได้กล่าวในส่วนของโลหะเงินไว้ว่า โลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งอยู่ที่ 22 HV เท่านั้น และเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งอยู่ที่ 66-76 HV เนื่องจากเงินสเตอร์ลิงประกอบไปด้วย เงิน 92.5% และทองแดง 7.5% ซึ่งทองแดงมีอะตอมที่เล็กกว่าธาตุเงินมากจึงช่วยให้เงินมีความแข็งเพิ่มขึ้นได้ ถ้าต้องการให้โลหะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (สำหรับทำสปริงและโซ่) อาจเติมสังกะสีเพิ่มไปบางส่วน นอกจากจะช่วยให้เพิ่มความเหนียวแล้วยังช่วยลดการเกิดออกซิไดซ์และเพิ่มการไหลตัวในการหล่อได้ดี ช่วยให้สีของเงินสเตอร์ลิงขาวกว่าเดิม (Corti, 2017)

S. Praiphruk และคณะ (2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของโลหะทองแดง (Cu), อินเดียม (In), ดีบุก (Sn), พลวง (Sb) และสังกะสี (Zn) ที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง เนื่องจากในอุตสาหกรรมต้องการโลหะเงินที่ทนทานต่อรอยขีดข่วน มีสมบัติเชิงกลที่ดี ถึงแม้ว่าในเชิงพาณิชย์สามารถทำให้โลหะเงินมีความแข็งได้ถึง 140-170 HV เมื่อผ่านวิธีการทางความร้อนหรือการปรับปรุงทางกล แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอื่น ๆ ภายหลังจากการหล่อ จึงศึกษาการเติมโลหะเจือมากถึง 22 ชนิด พบว่าการผสมระหว่างเงิน ทองแดงและอินเดียม ช่วยโลหะมีความเหนียวและยังคงมีความแข็ง 142 HV ภายหลังจากการหล่อ บริเวณเมทริกซ์ของ Ag-Cu-In และบริเวณขอบเกรนมีความแข็งสูงมากถึง 160 HV (Praiphruk et al., 2013a)



ภาพประกอบ 18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะระบบ Ag-Cu-In (Praiphruk et al., 2013a)



ภาพประกอบ 19 แสดงความแข็งของโลหะ (Praiphruk et al., 2013a)

Siriwan และคณะ (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติทางกลของงานหล่อและภายหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของอัลลอย 935AgCuBeSn พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการ Homogenization ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 60 นาที และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 350 °C ช่วยเพิ่มความแข็ง และ yield strength ให้กับอัลลอย 935AgCuBeSn ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับอัลลอย 935AgCu (Sakultanchareonchai et al., 2016)

Alloy	Hardness(HV _{0.01})				
	As-cast	Homogenization	Homogenization + 15-min aging	Homogenization + 30-min aging	Homogenization + 60-min aging
R	61±7	59±4	130±2	123±3	123±1
A1	59±3	63±4	84±8	113±2	116±7
A2	60±2	59±3	143±3	137±2	158±2

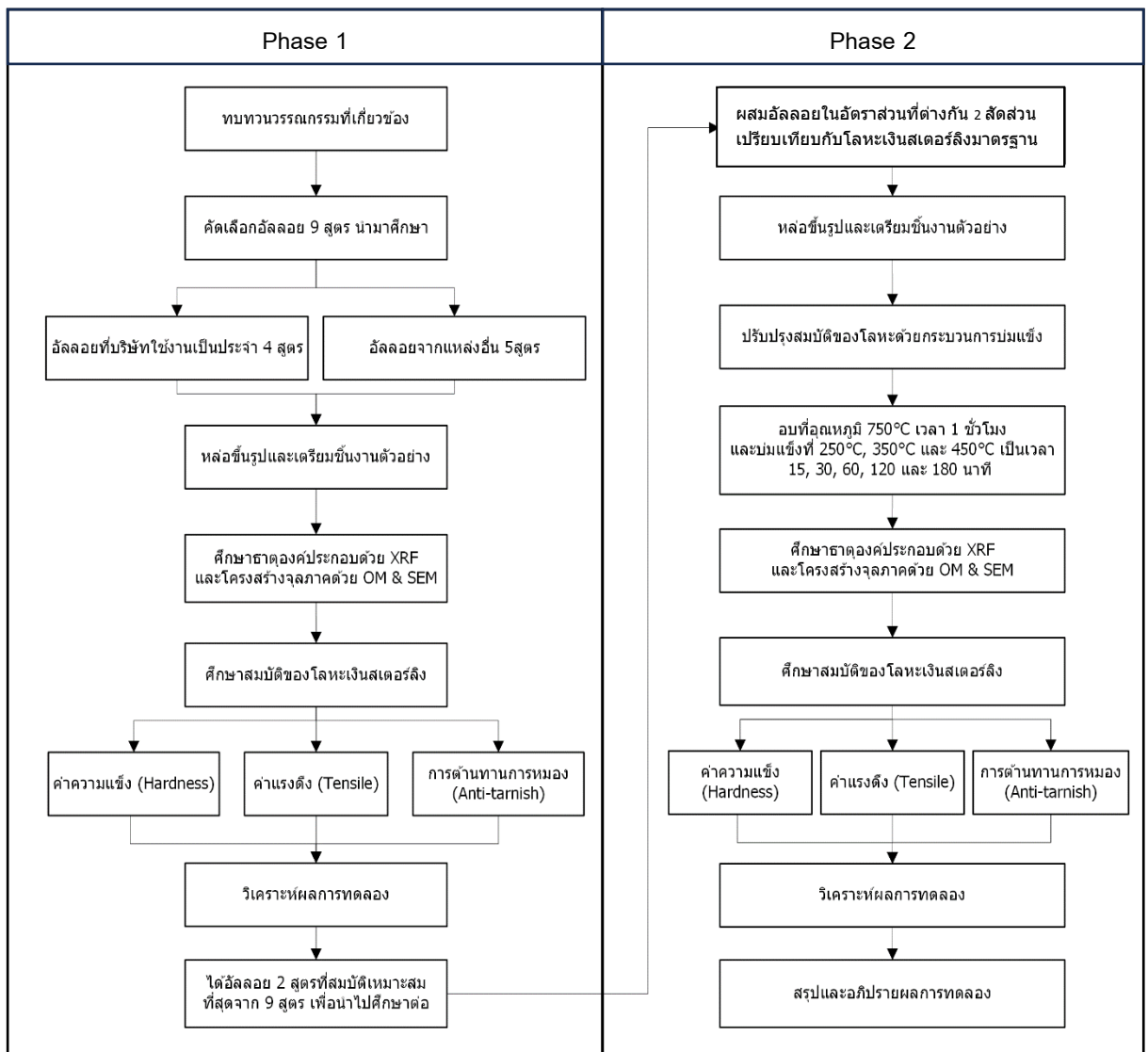
Table 4. Yield strength of the experimental alloys in the as-cast and heat-treated conditions.

Alloy	Yield Strength (MPa)				
	As-cast	Homogenization	Homogenization + 15-min aging	Homogenization + 30-min aging	Homogenization + 60-min aging
R	78±4.9	74±6.4	84±7.1	88±9.9	123±8.5
A1	28±4.3	66±4.5	86±4.7	151±3.2	151±10.7
A2	51±2.0	64±0.7	160±3.8	173±11.3	217±4.3

ภาพประกอบ 20 ค่าความแข็งและ yield strength ที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านความร้อน (Heat-Treatment) (Sakultanchareonchai et al., 2016)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุ Zn และ Ni ที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 21 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาโลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบ

1. การคัดเลือกอัลลอยที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 ศึกษาอิทธิพลของธาตุที่ผสมกับโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับกระบวนการผลิตเครื่องประดับ รวบรวมข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับธาตุเจือในโลหะเงินสเตอร์ลิง และกระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะ

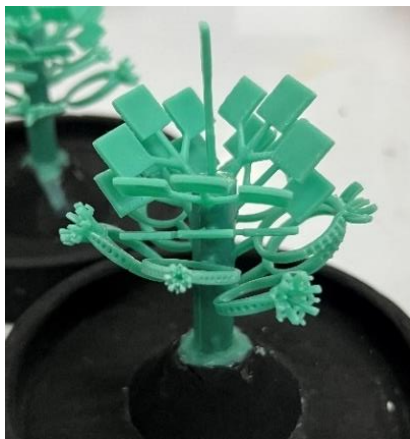
1.2 ศึกษาพรีอัลลอยที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมและสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นตัวเรือน และได้รับความอนุเคราะห์เข้าไปทำการศึกษาและทำการทดลองในบริษัท จึงมีการเลือกศึกษาจากอัลลอยที่มีจำหน่ายอยู่ในอุตสาหกรรม โดยทำการคัดเลือก พรีอัลลอยนำมาศึกษาในวิจัยนี้ทั้งหมด 9 สูตร แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2 สูตรของพรีอัลลอยทั้ง 9 สูตรที่นำมาผสมในโลหะเงิน

Pre-Alloy	Composition at 100 wt%				
	%Ag	%Cu	%Zn	%Ni	%In
T1	-	63.89	12.87	23.24	-
T2	-	71.91	13.25	14.84	-
T3	-	67.38	12.78	19.83	-
T4	-	61.89	12.77	25.34	-
T5	-	57.70	12.55	29.75	-
T6	-	36.93	17.92	45.15	-
T7	19.70	53.43	9.03	17.61	0.23
T8	9.67	52.61	11.11	23.30	3.32
T9	3.69	70.32	13.68	12.33	-

2. กระบวนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

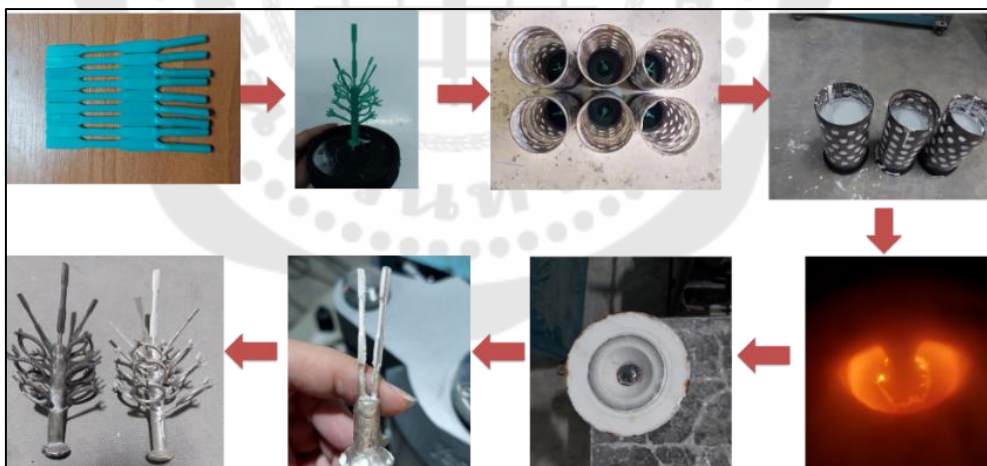
2.1 เตรียมชิ้นงานเทียบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 x 1 x 0.2 เซนติเมตร 18 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงดึง 1 ชิ้น สำหรับนำไปหล่อในกระบวนการหล่อ



ภาพประกอบ 22 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับกระบวนการหล่อ

2.2 เตรียมส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง ทำการผสมระหว่างเงินบริสุทธิ์ 92.5 wt% และพริ้อลลอย 7.5 wt%

2.3 ควบคุมกระบวนการหล่อ โดยอบกระบอกปูนที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส ดำเนินการหล่อชิ้นงานที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ ขั้นตอนเป็นไปตามภาพประกอบ 23 หลอมละลายโลหะและหล่อที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส และพักให้เย็นตัวในอากาศเป็นเวลา 8 นาที แล้วทำการจุ่มน้ำ



ภาพประกอบ 23 กระบวนการหลอมอัลลอยเงิน

3. ศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของโลหะ เช่น องค์ประกอบของธาตุและโครงสร้างจุลภาค ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

การทดลองตอนที่ 2 การผสมสูตรโลหะเงินผสมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์เมื่อผสมด้วยธาตุเจือชนิดต่าง ๆ แล้ว ยังคงมีความแข็งแรงในช่วง 60-70 HV เท่านั้น ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน (ต้องการความแข็งแรง ≥ 120 HV) จึงศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพรีอัลลอย 2 สูตร (พรีอัลลอย A และ B) ที่มีสังกะสีและนิกเกิลเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ต่างกันเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิงมาตรฐานที่ผสมทองแดงเพียงอย่างเดียว (พรีอัลลอย SA) รวมเป็น 3 สูตร โดยมีส่วนผสมตามตาราง 3 ผสมเข้ากับโลหะเงินที่ 92.5 wt%, 93.5 wt% และ 94.5 wt% ตามลำดับ

ตาราง 3 ส่วนผสมของพรีอัลลอยทั้ง 3 สูตร

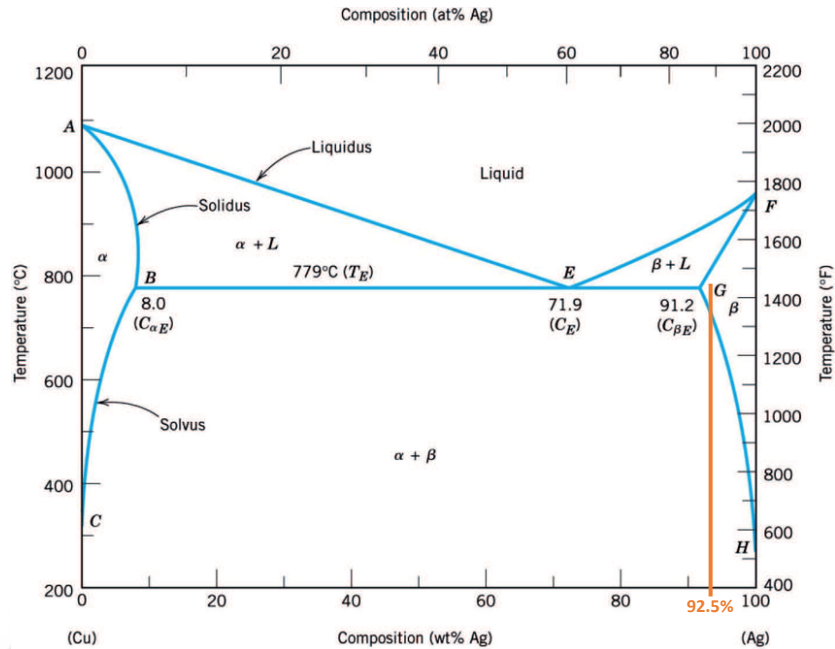
Pre-Alloy	Compositions		
	Cu (wt%)	Zn (wt%)	Ni (wt%)
SA	100	-	-
A	77	12	11
B	77	11.5	11.5

2. เตรียมชิ้นงานเทียบและทำการหล่อชิ้นงานเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 2

3. นำชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 สูตรไปวัดความแข็งแรง วิเคราะห์องค์ประกอบ และศึกษาโครงสร้างจุลภาค ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

4. นำชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมของทุกองค์ประกอบที่ได้จากการหล่อมาแบ่งอย่างละ 15 ชิ้น รวมเป็น 45 ชิ้น อบแผ่นชิ้นงานตัวอย่างรอบที่ 1 ด้วยเตาอุณหภูมิสูง (Carbolite tube furnace) ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาอบแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งที่ 92.5-94.5wt%Ag อุณหภูมิที่ใช้ในการละลายเฟสหรือ Homogenization จะดูได้จากเฟสไดอะแกรม Ag-Cu (ภาพประกอบ 24) อุณหภูมิต้องอยู่สูงกว่าเส้น Solvus หรือใช้ช่วงอุณหภูมิยูเทคติกคือจุด E ที่ 779°C เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมกลายเป็น single phase คือเฟส β โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อยู่ที่ 750°C จากนั้นทำการ Quenching ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อคงสภาพเฟส โดยเฟสของโลหะผสมขณะนี้จะอยู่ในสถานะของ Metastable คือเป็นสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution)

ของเฟส β ซึ่งพร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะที่เสถียรกว่าคือเกิด second phase ทันทีเมื่อสภาวะต่าง ๆ เปลี่ยนแปลง จากระยะเวลาที่เปลี่ยนไปหรือการได้รับความร้อน



ภาพประกอบ 24 เฟสไดอะแกรมของเงิน-ทองแดง

ที่มา: www.researchgate.net/figure/Phase-diagram-of-Cu-Ag_fig2_267097997 (2024)

5. อบแผ่นชิ้นงานตัวอย่างรอบที่ 2 โดยแบ่งชิ้นงานแต่ละองค์ประกอบ นำไปอบที่อุณหภูมิ 250°C, 350°C และ 450°C เป็นระยะเวลา 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ เพื่อศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม จากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาอบแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง

6. วัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้หลังจากการอบในแต่ละอุณหภูมิ วิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบเพื่อเพิ่มความแข็งที่เหมาะสมที่สุด

7. ศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของโลหะ เช่น องค์ประกอบของธาตุและโครงสร้างจุลภาค ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

1. กระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับนำไปวิเคราะห์สมบัติของโลหะ

1.1 เตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่างสำหรับนำไปวิเคราะห์ โดยนำชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมวาง

ลงในแม่พิมพ์ จากนั้นทำการหล่อเรซินใสเพื่อใช้ยึดจับตัวชิ้นงานสำหรับนำไปขัดผิวเรียบในขั้นถัดไป

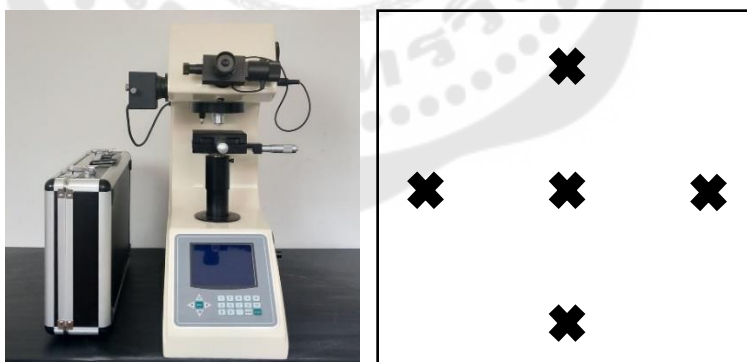
1.2 ขัดผิวชิ้นงานตัวอย่างให้เรียบ ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1000, 1200 และขัดด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอน ตามลำดับ จะได้ชิ้นงานดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 การเตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่าง

2. การทดสอบความแข็งของโลหะ

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวจนเรียบจากข้อที่ 1 ทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness รุ่น DTEC HVS-1000 ใช้น้ำหนักกด 10 gf (HV0.1) เวลาทดสอบ 10 วินาที โดยทดสอบชิ้นงาน ชิ้นละ 5 ครั้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 เครื่องวัดความแข็งและตำแหน่งการวัด 5 ตำแหน่ง

3. การทดสอบค่าแรงดึง (Tensile Test)

เตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM:E8 ขนาดพื้นที่ดึง 1.4 x 1.8 มิลลิเมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Hounsfield H10 KM)



ภาพประกอบ 27 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ



ภาพประกอบ 28 เครื่องทดสอบแรงดึง

ที่มา: <https://strec.chula.ac.th/stoss/product/universal-testing-machine-1-ton-utm1> (2023)

4. การศึกษาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence; XRF)

นำชิ้นงานที่ต้องการศึกษาบางส่วนไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในชิ้นงาน ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ รุ่น FISCHERSCOPE X-RAY XDV-SDD โดยวัดทั้งหมด 3 ครั้งแล้วทำการเฉลี่ยปริมาณธาตุแต่ละชนิด



ภาพประกอบ 29 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

ที่มา: www.helmut-fischer.com/products/xrf-film-thickness-measurement-xvd-sdd (2023)

5. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope; OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวจนเรียบจากข้อที่ 1 นำมาถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อหาบริเวณที่สนใจและศึกษาเชิงลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทำการ Mapping เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุในบริเวณนั้น ๆ

6. การทดสอบการกันหมอง (Tarnish Test: Fuming Test)

ทำการทดสอบโดยทำการผลิตกล่องทดสอบ Anti-Tarnish ให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนภายใต้สภาวะของ H_2S และสามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นขณะทดสอบได้ (ภาพประกอบ 30) จากนั้นวางชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวจากข้อ 1 ลงไปในกล่องทดสอบ หลังจากนั้นทำการผสมสารเคมีระหว่าง K_2S 0.21 กรัม กับ HCL 21 มิลลิลิตร วางลงตรงกลางของกล่อง ปิดฝากล่องให้สนิทแล้ววางทิ้งไว้ 15 – 30 นาที



ภาพประกอบ 30 กล่องทดสอบการกันหมอง

7. การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIE-Lab

ทำการวัดค่าสีของชิ้นงานด้วยเครื่อง Spectrophotometer HunterLab รุ่น UltraScanVIS โดยทำการวัดในระบบ CIE-Lab โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวจากข้อ 1 มาทำการวัดค่าสีก่อนทำการทดสอบ บันทึกรูปและเก็บข้อมูล จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบ Tarnish Test เมื่อทดสอบเสร็จสิ้น นำชิ้นงานมาวัดค่าสีอีกครั้ง บันทึกรูปและเก็บข้อมูล

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้การทดลอง (Material)

1. โลหะเงิน (Silver; Ag)
2. พรีอัลลอย (Pre-Alloy)
3. ปูนยิปซัม
4. กระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1000, 1200
5. ผงเพชรขนาด 1 ไมครอน
6. เรซินใส
7. โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
8. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 Molar

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Machine & Instrument)

1. เครื่องหล่อระบบสุญญากาศ (Vacuum Casting Machine)
2. เครื่องอบปูน
3. เครื่องผสมปูน
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) รุ่น Universal Testing Machine (H10 KM)
5. กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
6. เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด (Metallographic Grinding and Polishing Machine)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
8. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence; XRF)
9. เตาอบอุณหภูมิสูง (Carbolite tube furnace)
10. เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer HunterLab) รุ่น UltraScanVIS
11. กล้องทดสอบการกันหมอง

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์โลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบ

เป็นการศึกษาส่วนผสมของอัลลอยในภาพรวม ที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง ในงานวิจัยนี้ได้นำพรีอัลลอยที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน 9 สูตร มาทำการทดลองเพื่อศึกษาธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพที่เหมาะสมและสามารถนำไปเป็นแนวทางการพัฒนาต่อ ยอดในการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ในตอนถัดไป ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพรีอัลลอยด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence)

นำตัวอย่างพรีอัลลอยทั้ง 9 ชนิดไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF



ภาพประกอบ 31 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพรีอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

ตาราง 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

Composition	Pre-Alloy at 100 wt%				
	%Ag	%Cu	%Zn	%Ni	%In
T1	-	63.89	12.87	23.24	-
T2	-	71.91	13.25	14.84	-
T3	-	67.38	12.78	19.83	-
T4	-	61.89	12.77	25.34	-

ตาราง 4 (ต่อ)

Composition	Pre-Alloy at 100 wt%				
	%Ag	%Cu	%Zn	%Ni	%In
T5	-	57.70	12.55	29.75	-
T6	-	36.93	17.92	45.15	-
T7	19.70	53.43	9.03	17.61	0.23
T8	9.67	52.61	11.11	23.30	3.32
T9	3.69	70.32	13.68	12.33	-

1.2 ผลการทดสอบการหลอมโลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบ

ทดลองหล่อโลหะเงินผสมทั้งหมด 9 ชนิด โดยหลังจากทดลองหล่อขึ้นงานพบว่า ปริมาณอลอยที่มีปริมาณนิกเกิลสูงจะหลอมละลายได้ยากกว่า เนื่องจากนิกเกิลมีจุดหลอมเหลวที่สูง ส่งผลให้จุดหลอมเหลวโดยรวมของโลหะสูงขึ้น ต้องใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการหลอมนานมากขึ้น จากการนำตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ และ Scanning electron microscope (SEM) พบว่านิกเกิลและทองแดงกระจายตัวเข้ากันได้ดีกับโลหะเงิน และพบการปนเปื้อนของสแลก (Slag) บริเวณที่มีปริมาณทองแดงสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทองแดงมีความสามารถจับตัวกับอากาศได้อย่างรวดเร็ว



ภาพประกอบ 32 ลักษณะต้นหล่อของอัลลอยทั้ง 9 ชนิด

1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเงินผสม 9 องค์ประกอบด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

นำตัวอย่างชิ้นงานของอัลลอยทั้ง 9 ชนิด ที่ได้หลังจากการหล่อไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

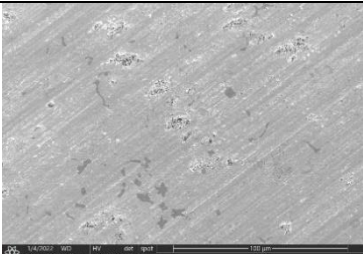
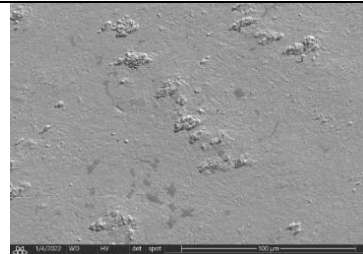
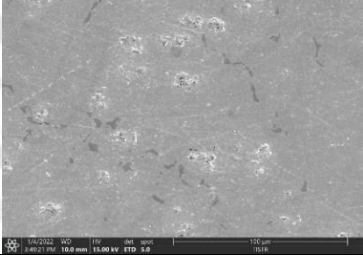
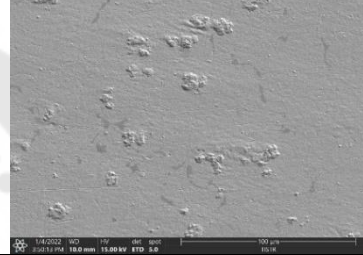
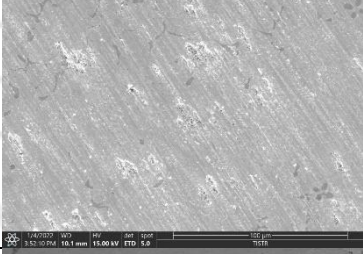
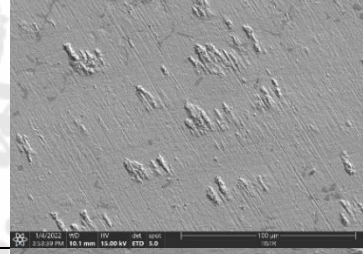
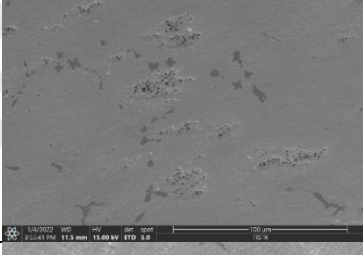
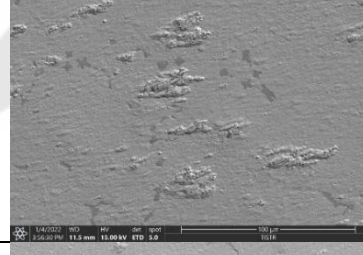
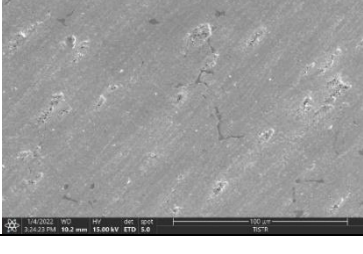
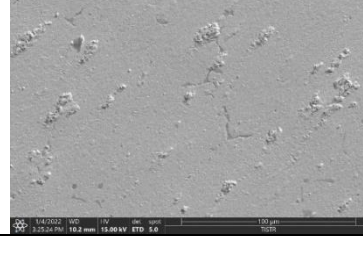
ตาราง 5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังหล่อของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

Sample	Ag (wt%)	Cu (wt%)	Zn (wt%)	Ni (wt%)
T1	94.20	3.40	0.40	2.00
T2	94.54	3.81	0.40	1.25
T3	94.35	3.87	0.47	1.31
T4	94.50	3.26	0.44	1.80
T5	95.50	3.30	0.37	0.83
T6	95.17	1.27	0.56	3.00
T7	95.14	2.83	0.29	1.74
T8	95.29	2.75	0.38	1.58
T9	94.45	3.65	0.43	1.47

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบพบว่าหลังจากหล่อแล้ว พบว่าโลหะเงินและนิกเกิลมีเปอร์เซ็นต์สูงขึ้น ซึ่งต่างจากโลหะทองแดงและสังกะสีจะมีเปอร์เซ็นต์ลดลง

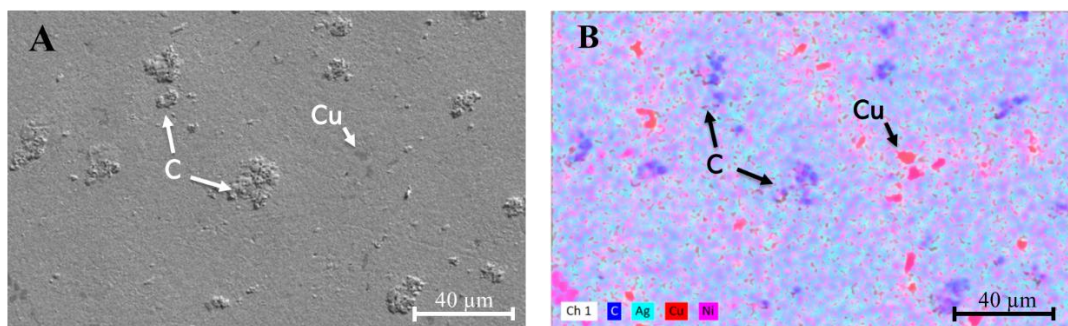
1.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

ตาราง 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอย

Sample	SEM (SE)	SEM (BSE)
T1 (94.2Ag-3.4Cu-0.4Zn-2.0Ni)		
T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni)		
T3 (94.4Ag-3.9Cu-0.4Zn-1.3Ni)		
T4 (94.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-1.8Ni)		
T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni)		

ตาราง 6 (ต่อ)

Sample	SEM (SE)	SEM (BSE)
T6 (95.2Ag-1.3Cu-0.5Zn-3.0Ni)		
T7 (95.2Ag-2.8Cu-0.3Zn-1.7Ni)		
T8 (95.3Ag-2.7Cu-0.4Zn-1.6Ni)		
T9 (94.5Ag-3.7Cu-0.4Zn-1.4Ni)		



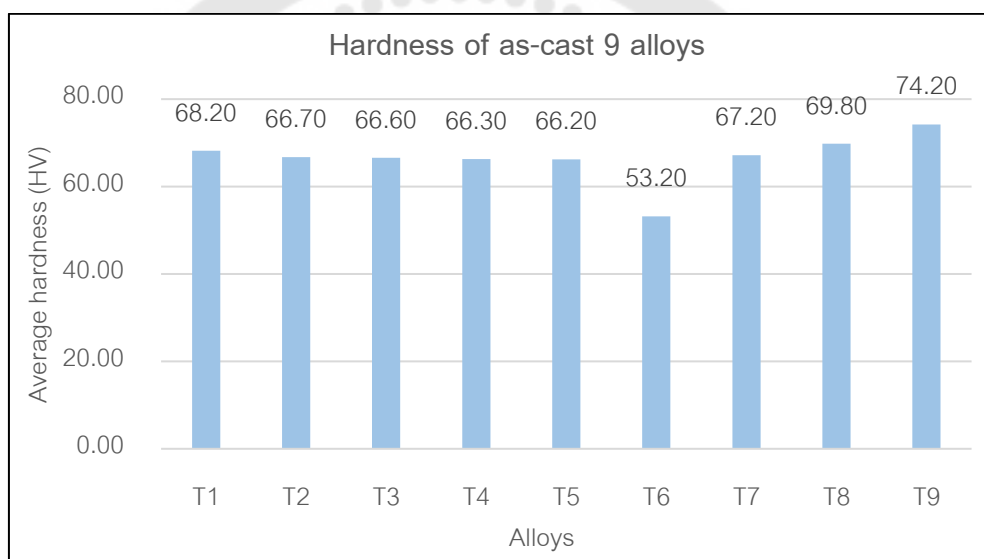
ภาพประกอบ 33 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni)

a) Backscattered electron image b) Mapping analysis

การเติม Zn และ Ni ลงในโลหะเงินผสม พบว่าทุก ๆ องค์ประกอบ Zn สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของเงิน ส่วน Ni จะมีการกระจายตัวในลักษณะกิ่งของ dendrite ที่ทั่วทั้งชิ้นงานตัวอย่าง และจากภาพประกอบ 33 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni) ในภาพ BSE จะเห็นลักษณะโครงสร้างที่นูนขึ้นมา เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของคาร์บอน

1.5 ผลการวัดค่าความแข็ง (Hardness)

จากการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness (HV0.1) ของชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการหล่อ แสดงตามภาพประกอบ 34

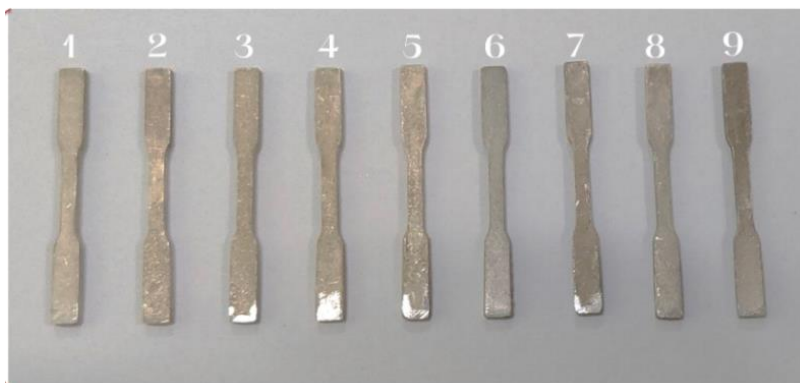


ภาพประกอบ 34 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ 9 สูตร

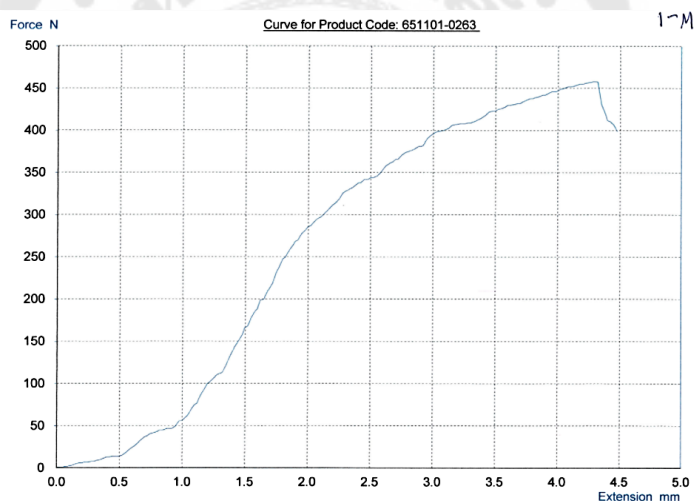
จากภาพประกอบ 34 แสดงค่าความแข็งของงานหล่อจะอยู่ในช่วง 53 HV - 68 HV ซึ่ง อัดลอยที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดคือ T9 (94.5Ag-3.7Cu-0.4Zn-1.4Ni) มีความแข็งอยู่ที่ 74.20HV รองลงมาเป็น T8 (95.3Ag-2.7Cu-0.4Zn-1.6Ni), T1 (94.2Ag-3.4Cu-0.4Zn-2.0Ni) และ T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni) ตามลำดับ ส่วนอัดลอยที่มีค่าความแข็งต่ำที่สุด คือ T6 (95.2Ag-1.3Cu-0.5Zn-3.0Ni) เนื่องจากมีองค์ประกอบของโลหะทองแดงน้อยกว่าอัดลอยชนิดอื่นๆ ตามตาราง 5

1.6 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

จากการนำชิ้นงานทั้ง 9 ชิ้น (ภาพประกอบ 35) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine – UTM (H10 KM) สามารถหาค่าความแข็งแรงของวัสดุได้ดังตาราง 7



ภาพประกอบ 35 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง



ภาพประกอบ 36 แสดงตัวอย่างการทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ตาราง 7 แสดงผลการทดสอบแรงดึง

Compositions	UTS (MPa)	Yield Strength (MPa)
T1 (94.2Ag-3.4Cu-0.4Zn-2.0Ni)	527.00	189.90
T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni)	695.00	206.30
T3 (94.4Ag-3.9Cu-0.4Zn-1.3Ni)	649.00	206.30

ตาราง 7 (ต่อ)

Compositions	UTS (MPa)	Yield Strength (MPa)
T4 (94.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-1.8Ni)	599.00	205.60
T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni)	580.00	200.50
T6 (95.2Ag-1.3Cu-0.5Zn-3.0Ni)	706.00	172.90
T7 (95.2Ag-2.8Cu-0.3Zn-1.7Ni)	578.00	200.80
T8 (95.3Ag-2.7Cu-0.4Zn-1.6Ni)	649.00	193.80
T9 (94.5Ag-3.7Cu-0.4Zn-1.4Ni)	699.00	190.90

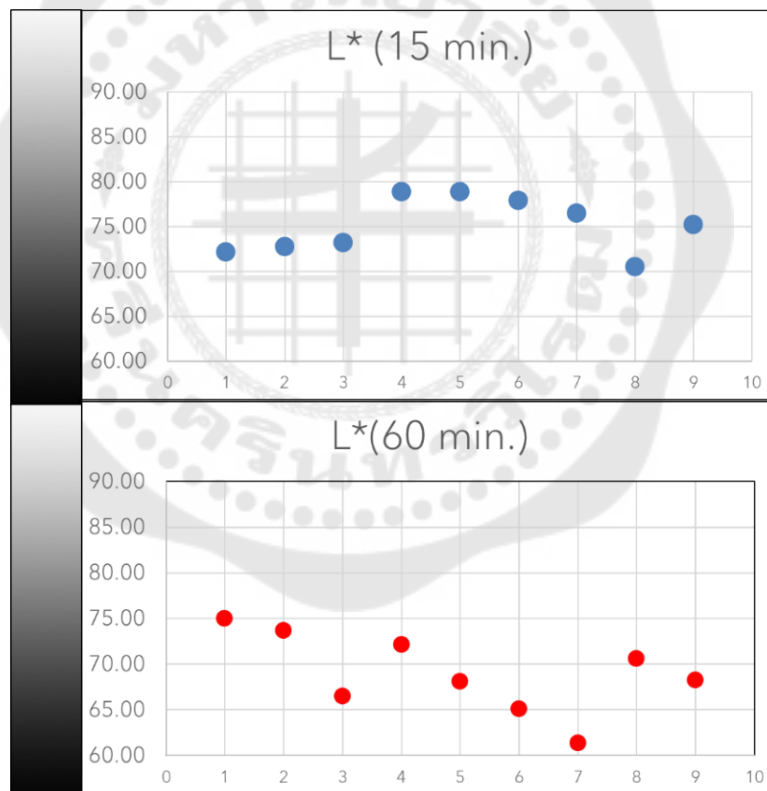
หลังจากทดสอบค่าแรงดึง (Tensile Test) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine พบว่าโลหะเงินผสมมีค่า Yield Strength สูงที่สุดคือ T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni), T3 (94.4Ag-3.9Cu-0.4Zn-1.3Ni) มีค่าเท่ากับ 206.3 MPa รองลงมาคือ T4 (94.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-1.8Ni) มีค่าเท่ากับ 205.6 MPa จากการวิเคราะห์พบว่าการผสม Ni ในสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยให้โลหะเงินผสมมีความแข็งแรงขึ้น แต่จะทำให้ค่าความยืดหยุ่นลดลงถ้าเติมในปริมาณมากเกินไป

1.7 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish Test)

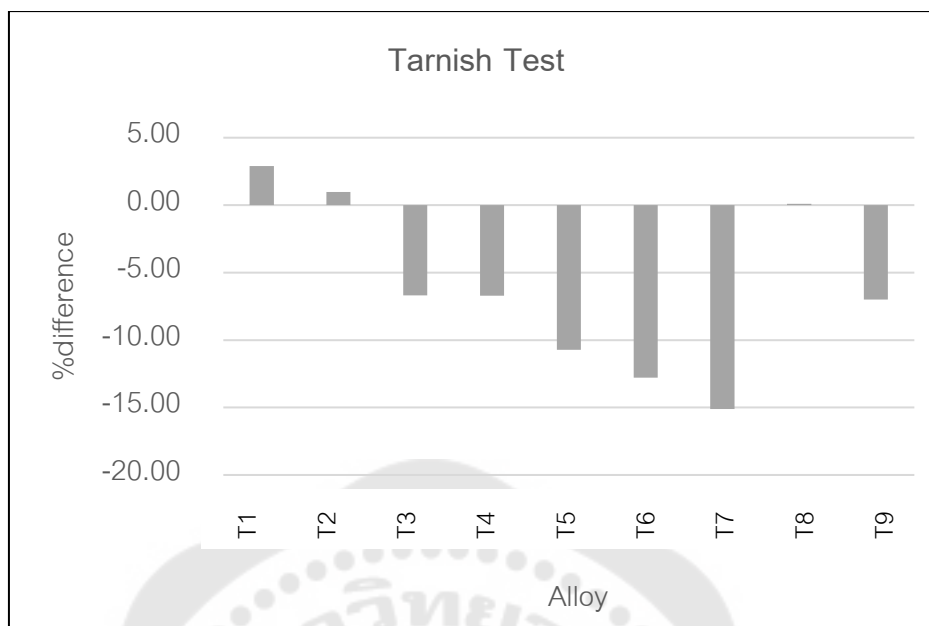
จากการวางชิ้นงานไว้ภายใต้สภาวะของ H_2S เป็นเวลา 15 นาที และ 60 นาที พบว่าชิ้นงานทั้ง 9 ชนิดมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปดังภาพประกอบ 37 เมื่อทำการวัดค่าสีที่เปลี่ยนไป ด้วยเทคนิค CIE-Lab โดยวัดค่าความสว่าง (L^*) ของชิ้นงานทั้งหมด (ตามภาพประกอบ 38)



ภาพประกอบ 37 ลักษณะสีในงานที่ทดสอบการต้านทานการหมอง ที่ 15 นาที และ 60 นาที



ภาพประกอบ 38 แสดงค่าความสว่าง (L*) ของอัลลอยที่ 15 นาที และ 60 นาที



ภาพประกอบ 39 แสดงเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความสว่างของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปในช่วง 15 นาที จนถึง 60 นาที

จากการทดสอบการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish Test) เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L^*) ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป ในช่วง 15 นาที จนถึง 60 นาทีดังภาพประกอบ 39 พบว่าอัลลอยที่มีเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างของค่าความสว่าง (L^*) ที่เปลี่ยนไปน้อยที่สุด คือ T8 (95.3Ag-2.7Cu-0.4Zn-1.6Ni) รองลงมา คือ T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni), T1 (94.2Ag-3.4Cu-0.4Zn-2.0Ni), T4 (94.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-1.8Ni), T3 (94.4Ag-3.9Cu-0.4Zn-1.3Ni) ตามลำดับ

1.8 ผลการศึกษาธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินผสมเพื่อนำไปศึกษาในตอนที่ถัดไป

จากการทดลองหล่อโลหะเงินผสมทั้ง 9 สูตร สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยมีเกณฑ์ตัดสินจาก 1) ด้านความแข็ง (Hardness) 2) ด้านการต้านทานแรงดึง (Yield strength) และ 3) ด้านการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish) โดยจะให้คะแนนเรียงจากโลหะเงินผสมที่มีสมบัติดีที่สุดของแต่ละด้าน คือมีค่าเท่ากับ 1 ไปจนถึงน้อยที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 9 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังตาราง 8

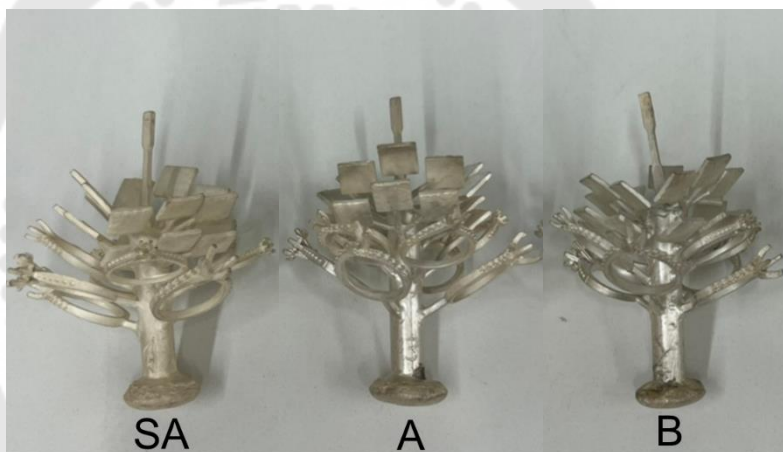
ตาราง 8 แสดงลำดับคะแนนของโลหะเงินผสมทั้ง 9 สูตร แบ่งตามสมบัติของโลหะในแต่ละด้าน

Alloy	Properties of Alloys (out of 9)			Summary
	Highest hardness	Highest yield strength	Anti-Tarnish	
T1 (94.2Ag-3.4Cu-0.4Zn-2.0Ni)	1	7	3	11
T2 (94.5Ag-3.8Cu-0.4Zn-1.3Ni)	5	1	2	8
T3 (94.4Ag-3.9Cu-0.4Zn-1.3Ni)	6	1	5	12
T4 (94.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-1.8Ni)	7	2	4	13
T5 (95.5Ag-3.3Cu-0.4Zn-0.8Ni)	8	4	7	19
T6 (95.2Ag-1.3Cu-0.5Zn-3.0Ni)	9	8	8	25
T7 (95.2Ag-2.8Cu-0.3Zn-1.7Ni)	4	3	9	16
T8 (95.3Ag-2.7Cu-0.4Zn-1.6Ni)	3	5	1	9
T9 (94.5Ag-3.7Cu-0.4Zn-1.4Ni)	2	6	6	14

จากผลรวมคะแนนในตาราง 8 สามารถวิเคราะห์ธาตุที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินผสมได้ว่า อัลลอย T8 ให้ผลดีที่สุดในด้านการต้านการหมองเนื่องมาจากมีปริมาณธาตุ Cu น้อย และเมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกลที่มีอันดับที่ดีระหว่าง T1-T3 พบว่า T1 มีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณการผสม Ni สูงสุด ทำให้ผู้วิจัยมีการจัดทำส่วนผสมในการทดลองขั้นถัดไป โดยคงปริมาณทองแดงในพรีอัลลอยไว้เท่ากัน ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาการหมองในโลหะเงินผสม และศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ni และ Zn ในสัดส่วนที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง

ตอนที่ 2 การผสมสูตรโลหะเงินผสมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

ผลการศึกษาองค์ประกอบของโลหะเงินผสม 3 องค์ประกอบที่แตกต่างกัน โดยมีโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เป็นมาตรฐาน คือ Alloy SA (โลหะในระบบ AgCu) ซึ่งไม่มีการผสมโลหะอื่นๆ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบสมบัติ ส่วน Alloy A และ Alloy B เป็นอัลลอยมีส่วนผสมจากโลหะ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งเป็นการศึกษาโลหะในระบบ AgCuZnNi และมีการเพิ่มสัดส่วนของโลหะเงินเป็น 93.5 wt% และ 94.5 wt% ตามลำดับ สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยทั้งหมด 3 สูตร ด้วย X-ray Fluorescence (XRF) ได้ดังตาราง 9 ซึ่งการศึกษการเปลี่ยนแปลงสมบัติของโลหะผ่านทางโครงสร้างจุลภาค และมีการปรับปรุงสมบัติของโลหะเงินผสมให้ดียิ่งขึ้นด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Precipitation hardening) สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 40 ลักษณะต้นหล่อของโลหะเงินผสม 3 สูตร

2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

นำตัวอย่างชิ้นงานของอัลลอยทั้ง 3 สูตร ที่ได้หลังจากการหล่อไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตาราง 9

ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยทั้งหมด 3 สูตร ด้วยเทคนิค XRF

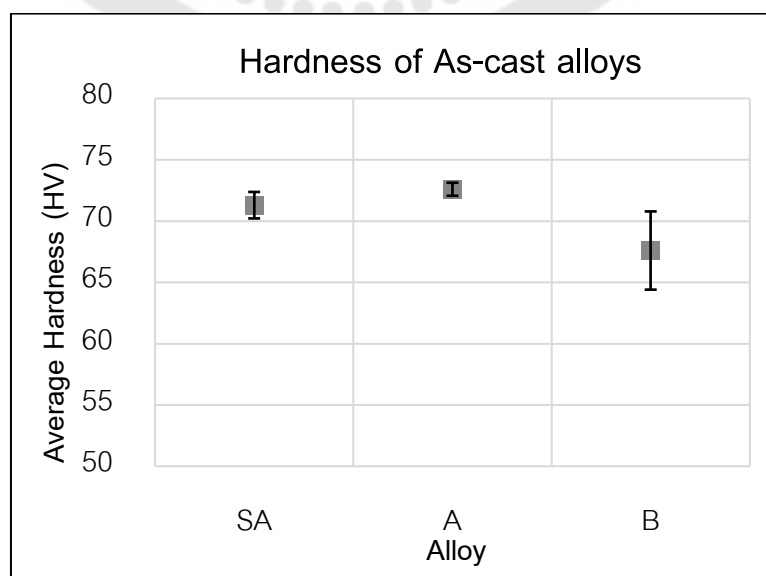
Sample	Compositions			
	%Ag	%Cu	%Zn	%Ni
SA	92.5	7.50	0.00	0.00
A	93.5	5.01	0.79	0.70
B	94.5	4.24	0.63	0.63

จากตาราง 8 จะเห็นได้ว่าอัลลอย A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) และ B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) หลังจากการหล่อจะมีสัดส่วนของทองแดงที่ต่างกัน ทั้งที่ในพรีอัลลอยมีการผสมสัดส่วนของทองแดงเท่ากันกันคือ 77 wt% แต่เนื่องจากอัลลอย A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) และอัลลอย B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) มีการผสมโลหะเงินในสัดส่วนที่ต่างกันคือ 93.5 wt% และ 94.5 wt% ตามลำดับ จึงทำให้เมื่อคูลด์สั่วนโดยรวมอัลลอย A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) จะมีสัดส่วนของทองแดง สังกะสี และนิกเกิล มีปริมาณมากกว่าอัลลอย B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)

2.2 ผลการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานหล่อ

จากการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness (HV0.1) ของชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการหล่อ แสดงตามตารางที่ 10
ตาราง 10 ความแข็งของชิ้นงานหล่อ

Hardness Test	Round 1 (HV)	Round 2 (HV)	Round 3 (HV)	Round 4 (HV)	Average (HV)	SD
SA (92.5Ag-7.5Cu)	71.7	70.1	72.9	70.6	71.3	1.08
A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	72.7	72.8	73.1	71.7	72.6	0.53
B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	70.1	69.9	68.1	62.2	67.6	3.19

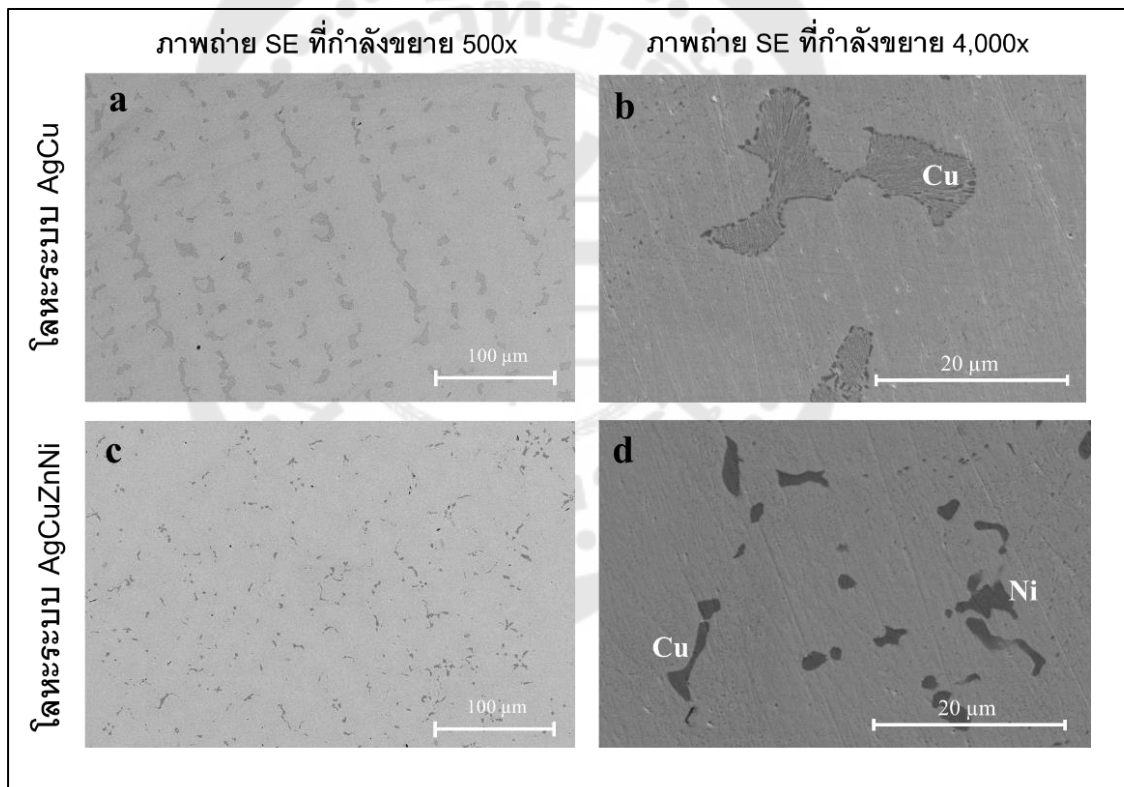


ภาพประกอบ 41 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ

จากการวัดค่าความแข็งของงานหล่อจะอยู่ในช่วง 67 HV -73 HV ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของโลหะเงินสเตอร์ลิงทั่วไป จะเห็นได้ว่าอัลลอย B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) มีสัดส่วนของธาตุทองแดงต่ำ ส่งผลให้มีค่าความแข็งต่ำ และยังมีสัดส่วนของธาตุเงินสูงกว่าอัลลอยชนิดอื่นๆ ตามตาราง 8 มีโลหะเงินผสมอยู่ที่ 94.5 wt%Ag สูงกว่าอัลลอย SA (92.5Ag-7.5Cu) และ A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) ส่งผลให้มีค่าความแข็งต่ำลงเช่นเดียวกัน

2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับค่าความแข็งของงานหล่อ

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถวิเคราะห์ค่าความแข็งในโลหะเงินสเตอร์ลิงได้ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 42 แสดงโครงสร้างจุลภาคในโหมด SE ของโลหะเงินผสม a) โลหะผสม SA ระบบ AgCu ที่กำลังขยายต่ำ b) โลหะผสม SA ระบบ AgCu ที่กำลังขยายสูง c) โลหะผสม A ระบบ AgCuZnNi ที่กำลังขยายต่ำ และ d) โลหะผสม A ระบบ AgCuZnNi ที่กำลังขยายสูง

จากภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า (ภาพประกอบ 42a) แสดงให้เห็นโครงสร้างของโลหะผสมในระบบ AgCu (อัลลอย SA; 92.5Ag-7.5Cu) จะมีลักษณะของเฟสทองแดงที่เกิดขึ้นเป็น

lamellar หรือเรียกว่า Eutectic structure กระจายอยู่ที่ทั้งชิ้นงานตัวอย่าง จะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อปรับกำลังขยาย 4,000 เท่า ตามภาพประกอบ 42b ส่วนโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi (อัลลอย A; 93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) เกิดลักษณะของธาตุ addition alloy แทรกตามขอบเกรนกระจายตัวอย่างทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อดูที่กำลังขยายเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 42d) จะเห็นได้ว่าเฟสของทองแดงและเฟสของนิกเกิลมีการแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ส่วนธาตุสังกะสีจะละลายอยู่ในเนื้อโลหะเงิน ซึ่งการผสมนิกเกิลเข้าไปไม่ถึง 1 wt% ช่วยส่งผลให้โลหะเงินสเตอริลิ่งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกับการเกิดโครงสร้าง ยูเทคติกของโลหะผสมระบบ AgCu คือมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 67 HV -73 HV

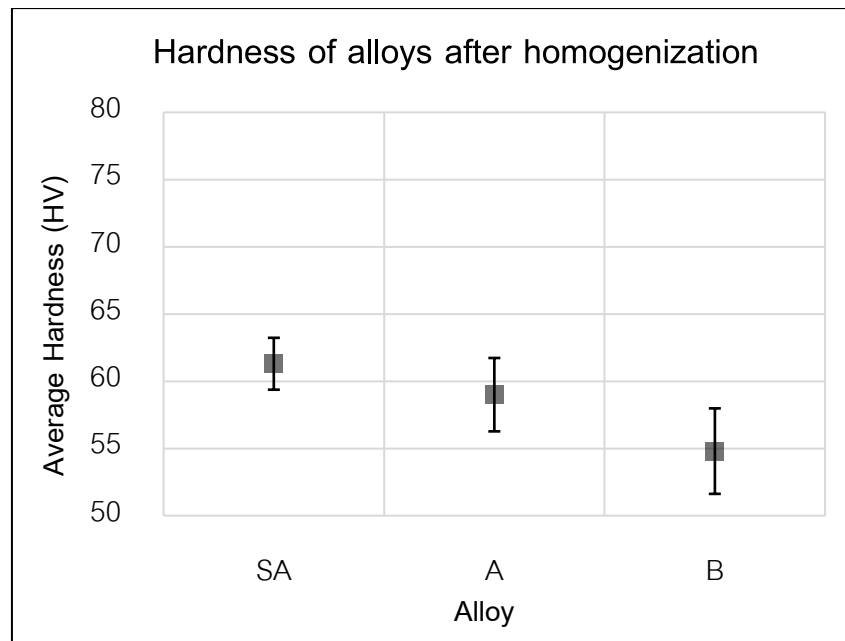
2.4 ผลการอบชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation Hardening)

ขั้นที่ 1 การทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution Treatment)

จากการอบแผ่นชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogenization) และจุ่มน้ำ (Quenching) ให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อคงสภาพสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) สามารถวัดค่าความแข็งของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 11

ตาราง 11 ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750°C (Homogenization)

Test	Round1 (HV)	Round2 (HV)	Round3 (HV)	Round4 (HV)	Round5 (HV)	Average (HV)	SD
SA (92.5Ag-7.5Cu)	62.1	61.2	62.2	58.1	63.1	61.3	1.93
A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	57.3	55.8	58.4	62.0	61.7	59.0	2.73
B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	50.8	58.5	52.4	55.3	57.0	54.8	3.18

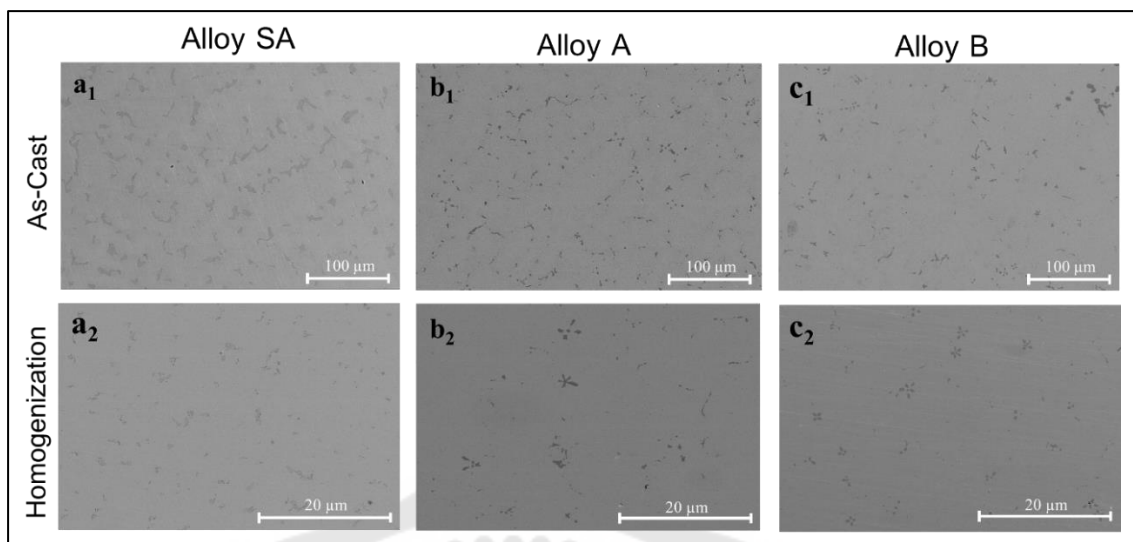


ภาพประกอบ 43 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750°C (Homogenization)

พบว่าความแข็งของอัลลอยหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งลดลงมาอยู่ในช่วง 50-60 HV จากช่วง 60-70 HV แสดงดังภาพประกอบ 43 เนื่องจากโลหะเงินผสมเมื่อได้รับความร้อนในช่วง 750°C จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจากสารละลายของแข็งเนื้อผสม (Heterogeneous solid solutions) ในส่วนของเฟสที่สอง (second phase) จะสลายไปเป็นเนื้อเดียวกันในเฟสที่หนึ่ง (matrix) กลายเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Homogeneous solid solutions) จึงส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าลดลง

2.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับค่าความแข็งงานหล่อและหลังกระบวนการ Homogenization

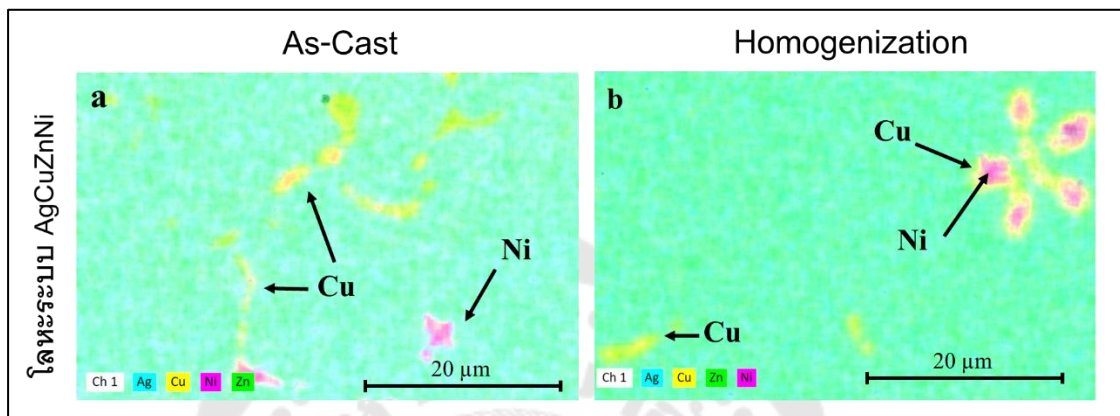
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 44 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในโหมด SE ภายหลังจากการหล่อและหลังการทำ Homogenization ของโลหะเงินผสม a) โลหะเงินผสม SA ระบบ AgCu b) โลหะเงินผสม A ระบบ AgCuZnNi c) โลหะผสม B ระบบ AgCuZnNi

จากการอบแผ่นชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogenization) และจุ่มน้ำ (Quenching) ให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากภาพประกอบ 44a₁ แสดงให้เห็นโครงสร้างชิ้นงานที่ได้จากการหล่อของโลหะผสมในระบบ AgCu (อัลลอย SA; 92.5Ag-7.5Cu) จะเห็นลักษณะของเฟสทองแดงที่เกิดขึ้นเป็น Eutectic structure เมื่อผ่านกระบวนการ Homogenization ทำให้เฟสที่เกิดขึ้นบางส่วนสลายหายไป (จะเห็นได้ว่าเฟสทองแดงไม่ได้สลายไปอย่างสมบูรณ์ เป็นผลมาจากข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้ในการผลิต ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการอบ จะช่วยให้เฟสทองแดงสลายไปสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น) โดยอะตอมของทองแดงที่มีขนาดเล็กกว่าเงินจะเคลื่อนที่เข้าไปแทรกในเมทริกซ์ของเงิน เกิดเป็นลักษณะตามภาพประกอบ 44a₂ เนื้อโลหะมีสัดส่วนความเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (homogeneous solid solution) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะมีค่าลดลง ส่วนโครงสร้างของโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi ของอัลลอย A; (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) และ B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) หลังจากการหล่อจะเกิดเฟสทองแดงและเกิดเฟส निकเกิดแยกจากกันอย่างชัดเจนมีลักษณะเป็น dendrite ตามภาพประกอบ 44b₁ และ 44c₁ ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการ Homogenization ทำให้เฟสทองแดงบางส่วนละลายไปในเนื้อโลหะเงิน แต่จะเห็นได้ว่าทองแดงบางส่วนมีการไปจับตัวกับนิกเกิลโดยที่ทองแดงจะอยู่รอบๆ นิกเกิล ตามภาพประกอบ 45b เกิดเป็นเฟสที่มีความเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวของ Cu-Ni ส่งผลให้ค่าความแข็ง

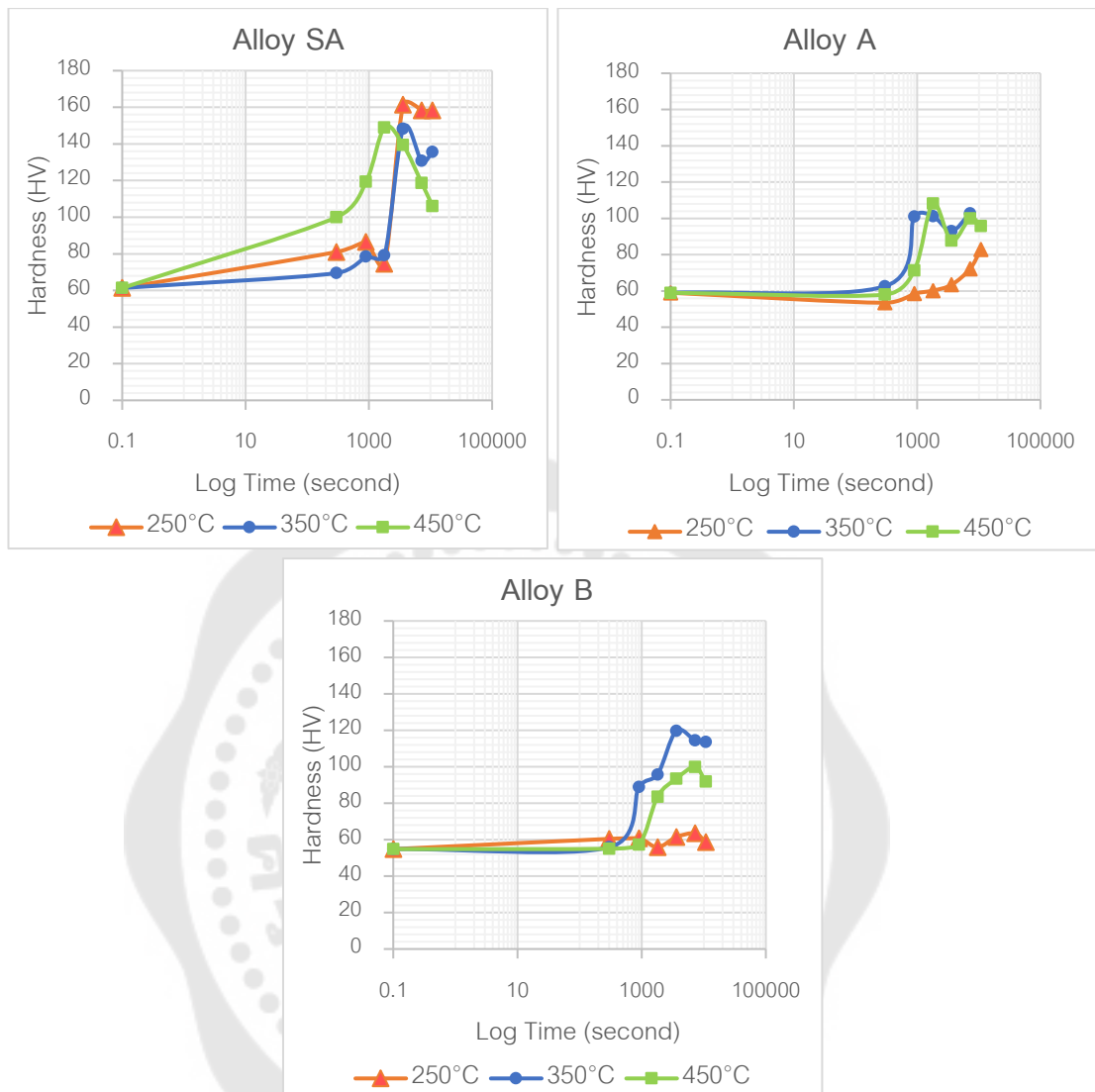
ของโลหะมีค่าลดลงเช่นเดียวกันเมื่อผ่านกระบวนการ Homogenization ดูความแข็งเปรียบเทียบได้จากภาพประกอบ 41 ก่อนกระบวนการ Homogenization และภาพประกอบ 43 หลังกระบวนการ Homogenization



ภาพประกอบ 45 แสดงภาพถ่าย Mapping ของโลหะผสม A ในระบบ AgCuZnNi a) ชิ้นงานหลังหล่อ และ b) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการ Homogenization

ขั้นที่ 2 การบ่ม (Aging)

เพื่อให้เกิดการแยกตัวของเฟสที่สอง (second phase) ทำให้เกิดสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) กระจายตัวอยู่ภายในเนื้อวัสดุ ทำหน้าที่ขัดขวางการเสียรูปของระนาบอะตอม ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้ยากขึ้น จึงทำการทดลองอบที่ 3 อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 250°C, 350°C และ 450°C ที่ระยะเวลา 5, 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการบ่มอัลลอยแต่ละชนิด ซึ่งสามารถวัดค่าความแข็งของโลหะที่เปลี่ยนไปหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 250°, 350°C และ 450°C ที่ระยะเวลาต่างกัน สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความแข็งดังภาพประกอบ 46



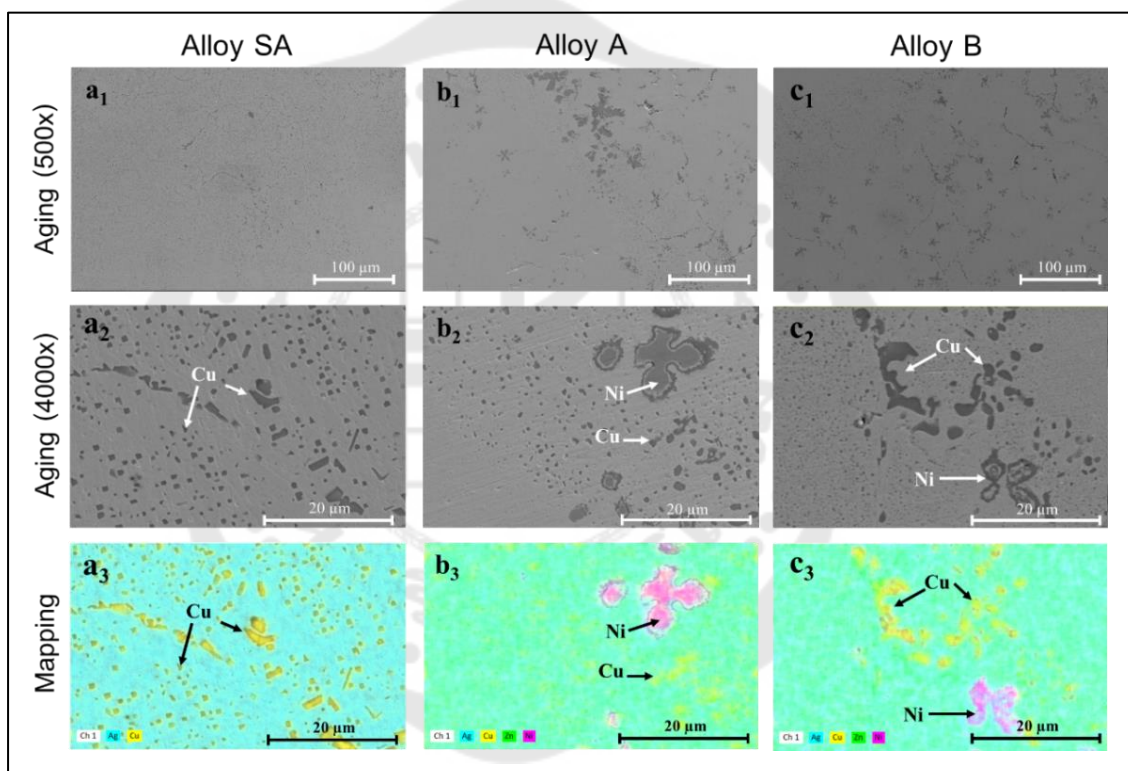
ภาพประกอบ 46 กราฟความแข็งเทียบกับระยะเวลาในการบ่มแข็งของอัลลอย SA, อัลลอย A, และอัลลอย B

จากการทดลองเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะด้วยการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) ผลที่ได้จากการอบในแต่ละช่วงเวลาและช่วงอุณหภูมิ จะให้ผลดีกับอัลลอยแต่ละชนิดแตกต่างกัน พบว่าเมื่อนำค่าความแข็งเทียบกับระยะเวลาในการบ่มแข็งดังภาพประกอบ 46 จะเห็นได้ว่า อัลลอย SA ($92.5\text{Ag}-7.5\text{Cu}$) ซึ่งเป็นโลหะในระบบ AgCu มีวงจรรวมของการเกิดของสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) จนถึงการสลายให้ไปของสารประกอบของแข็งครบตามวงจร (Cycle) หรือตามทฤษฎีการบ่มแข็ง ภาพประกอบ 9 การบ่มแข็งสมบูรณ์ในทุกอุณหภูมิ และสามารถเพิ่มความแข็งของอัลลอยได้เป็น 161.4 ± 2.4 HV เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที ส่วนอัลลอย B ($94.5\text{Ag}-4.3\text{Cu}-0.6\text{Zn}-0.6\text{Ni}$) และ A ($93.5\text{Ag}-5.0\text{Cu}$)

0.8Zn-0.7Ni) ซึ่งเป็นโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi จะเห็นความสมบูรณ์ของวงจร (Cycle) ในการบ่มแข็งในบางอุณหภูมิเท่านั้น และอัลลอยที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งแล้วให้ค่าความแข็งสูงที่สุดคือ อัลลอย B มีค่าความแข็งอยู่ที่ 119.7 ± 11.4 HV เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที

2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับความแข็งของโลหะหลังบ่มแข็ง

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโหมด SE และการ Mapping ของอัลลอยที่บ่มแข็ง

a) อัลลอย SA, b) อัลลอย A และ c) อัลลอย B

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่าลักษณะของโครงสร้างสอดคล้องกับค่าความแข็งที่วัดได้ โดยโลหะผสมในระบบ AgCu คืออัลลอย SA (92.5Ag-7.5Cu) (ภาพประกอบ 47a) เมื่อบ่มด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม ธาตุทองแดงที่มีความสามารถในการละลายในสภาวะสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) สามารถที่จะมีพลังงานขับเคลื่อน (Driving force) ที่ดีกว่า โดยทองแดงเกิดเฟสที่สอง (second phase) ตามที่เกิดขึ้นในภาพประกอบ 47a₂ ของสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) ของทองแดงแยกตัว

ออกมาและกระจายอยู่ทั่วเนื้อโลหะเงิน เกิดการขัดขวางการเคลื่อนตัวตามขอบเกรน ทำให้เกิดความแข็งและได้ความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 161.4 ± 2.4 HV เมื่ออบที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที

จากการวิเคราะห์โลหะผสมในระบบ AgCuZnNi พบว่าหลังจากการบ่มแข็งช่วยให้โลหะเงินผสมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมในระบบ AgCu เนื่องจากสัดส่วนของแดงที่ลดลงด้วย และที่สภาวะ Homogenization ของแดงอาจเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากทองแดงมีการจับตัวกับนิกเกิลเป็น single phase ซึ่งมีความเสถียร จึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าในการสลายพันธะระหว่างทองแดงและนิกเกิล และการที่ Zn เป็นธาตุที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ พลังงานขับเคลื่อน (Driving force) ก็ต่ำเช่นกัน จึงละลายผสมในเฟสของทองแดงไม่มีการเกิด nucleation ของ second phase หรือสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) ของทองแดงแยกตัวออกมาที่มากนัก จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi โดยรวมในการบ่มแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 90-120 HV เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi ระหว่าง A ($93.5\text{Ag}-5.0\text{Cu}-0.8\text{Zn}-0.7\text{Ni}$) และ B ($94.5\text{Ag}-4.3\text{Cu}-0.6\text{Zn}-0.6\text{Ni}$) พบว่าอัลลอย A มีสัดส่วนของทองแดงอยู่ที่ 5 wt% ซึ่งเมื่อทำการบ่มแข็งทองแดงควรมีโอกาสเกิด precipitate ออกมาเป็น second phase ได้มากกว่าอัลลอย B ที่มีทองแดงอยู่เพียง 4.3 wt% แต่อัลลอย B กลับให้ค่าความแข็งสูงกว่าอัลลอย A ด้วยเหตุนี้จึงนำอัลลอยมาเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างทองแดงและนิกเกิลสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ อัลลอย A มีสัดส่วน $87.7\%\text{Cu} : 12.3\%\text{Ni}$ และอัลลอย B มีสัดส่วน $87.8\%\text{Cu} : 12.2\%\text{Ni}$ พบว่าสัดส่วนของทองแดงต่อนิกเกิลของทั้งสองอัลลอยมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อัลลอย A มีสัดส่วนทองแดงน้อยกว่าอัลลอย B จึงส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้หลังจากการบ่มแข็งมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากทองแดงมีโอกาสในการแยกตัวออกจากนิกเกิลแล้วเกิดเป็นเฟสใหม่ได้น้อยกว่า ต้องใช้พลังงานที่สูงและระยะเวลาในการแยกตัวออกมาเป็น second phase ส่งผลให้อัลลอย A ใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มแข็งนานกว่าจึงจะให้ค่าความแข็งได้ใกล้เคียงกับอัลลอย B จากภาพประกอบ 47c อัลลอย B ($94.5\text{Ag}-4.3\text{Cu}-0.6\text{Zn}-0.6\text{Ni}$) แสดงให้เห็นถึงเฟสของทองแดงขนาดเล็กที่เกิดขึ้นหลังจากการ precipitate ทองแดงมีโอกาสในการแยกตัวออกจากนิกเกิลมากกว่า เกิดเฟสของทองแดงขนาดเล็กกระจายทั่วชิ้นงาน ทำให้เกิดความแข็งเพิ่มขึ้นในโลหะเงินสเตอริลิ่งและมีความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 119.7 ± 11.4 HV เมื่ออบที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที ส่วนอัลลอย A ($93.5\text{Ag}-5.0\text{Cu}-0.8\text{Zn}-0.7\text{Ni}$) ต้องบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลานานถึง 180 นาที จึงจะให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 116.9 ± 8.8 HV

2.7 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish)



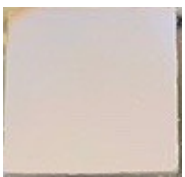



จากการทดลองวัดค่าสีของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบด้วยเทคนิค CIE-Lab โดยวัดค่าความสว่าง (L^*), แกนสีแดง-เขียว (a^*) และแกนสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) ของชิ้นงานทั้งหมด ได้ผลดังนี้

ตาราง 12 แสดงพิกัดสี CIE-Lab ของโลหะผสมก่อนทำการทดลอง Tarnish test

Alloy	L^*	a^*	b^*
SA (92.5Ag-7.5Cu)	115.21 (±0.03)	0.66 (±0.01)	6.34 (±0.01)
A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	114.64 (±0.03)	0.40 (±0.03)	5.17 (±0.02)
B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	114.33 (±0.26)	0.37 (±0.09)	6.57 (±0.21)

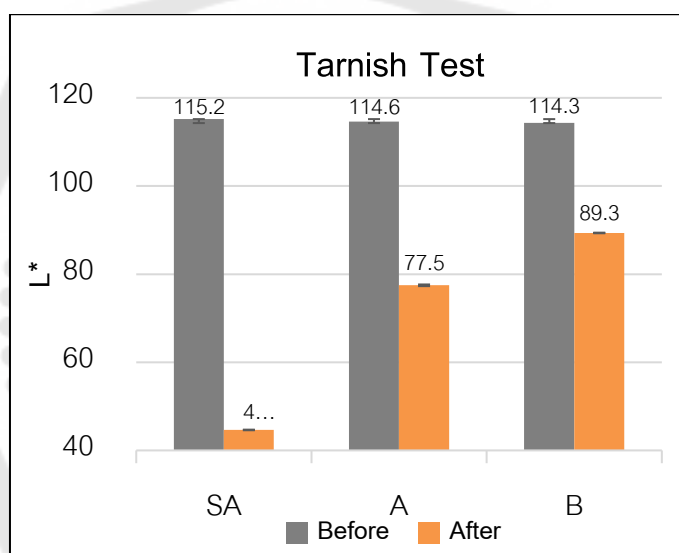
จากการวางชิ้นงานไว้ภายใต้สภาวะของ H_2S เป็นเวลา 30 นาที พบว่าชิ้นงานทั้ง 3 สูตรมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปดังตาราง 13 เห็นได้ชัดว่าอัลลอย SA (92.5Ag-7.5Cu) มีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด จึงทำการวัดค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค CIE-Lab โดยวัดค่าความสว่าง (L^*), แกนสีแดง - เขียว (a^*) และ แกนสีเหลือง - น้ำเงิน (b^*) ของชิ้นงานทั้งหมด ได้ผลดังตาราง 14

ตาราง 13 ลักษณะของชิ้นงานแต่ละอัลลอยก่อนและหลังทดสอบ Tarnish test

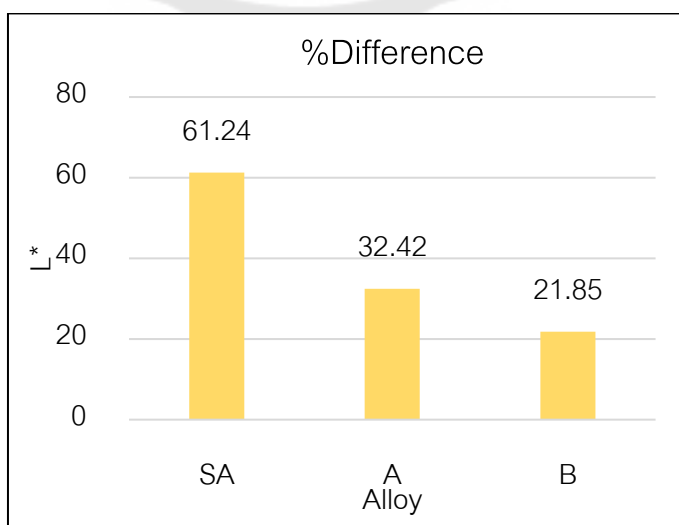
Tarnish test	Alloy SA	Alloy A	Alloy B
ก่อนทดสอบ			
หลังทดสอบ			

ตาราง 14 แสดงพิกัดสี CIE-Lab ของโลหะผสมหลังทำการทดลอง Tarnish test

Alloy	L*	a*	b*
SA (92.5Ag-7.5Cu)	44.65 (±0.07)	5.19 (±0.45)	-28.69 (±0.52)
A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	77.47 (±0.19)	14.89 (±0.51)	42.04 (±1.91)
B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	89.34 (±0.07)	5.40 (±0.04)	21.06 (±0.07)



ภาพประกอบ 48 แสดงการเปรียบเทียบค่า L* แต่ละอัลลอยก่อนและหลังทดสอบ Tarnish test



ภาพประกอบ 49 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างของค่า L* ของแต่ละอัลลอย

จากภาพประกอบ 48 แสดงการวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIE-Lab โดยเปรียบเทียบความหมองจากค่าความสว่าง (L^*) ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าอัลลอย A ($93.5\text{Ag}-5.0\text{Cu}-0.8\text{Zn}-0.7\text{Ni}$) และ B ($94.5\text{Ag}-4.3\text{Cu}-0.6\text{Zn}-0.6\text{Ni}$) ให้ผลที่ดีกว่าเนื่องจากมีความเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L^*) ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับอัลลอย SA ($92.5\text{Ag}-7.5\text{Cu}$) ที่เป็นอัลลอยมาตรฐาน มีการเปลี่ยนแปลงของแผ่นทดสอบ(ตาราง 14) ไปในโทนที่เข้มขึ้น แสดงให้เห็นการหมองของโลหะอย่างชัดเจนในอัลลอย SA ($92.5\text{Ag}-7.5\text{Cu}$) เมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างของค่าความสว่าง (L^*) ดังภาพประกอบ 49 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัลลอยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุดหรือมีการหมองน้อยที่สุดคืออัลลอย B ($94.5\text{Ag}-4.3\text{Cu}-0.6\text{Zn}-0.6\text{Ni}$) รองลงมาคือ A ($93.5\text{Ag}-5.0\text{Cu}-0.8\text{Zn}-0.7\text{Ni}$) และ SA ($92.5\text{Ag}-7.5\text{Cu}$) มีเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างคิดเป็น 21.85%, 32.42% และ 61.24% ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนของทองแดงที่ผสมในโลหะเงินผสม จะเห็นได้ว่ายิ่งสัดส่วนทองแดงมีค่ามากจะส่งผลให้โลหะเงินผสมมีความหมองมากตามลำดับ และโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi สามารถต้านทานการหมองได้ดีกว่าโลหะผสมระบบ AgCu เพราะนอกจากการผสมทองแดงในปริมาณที่ลดลงช่วยให้ความหมองลดลงแล้ว การเติมสังกะสี ยังมีความสามารถในการจับตัวกับ ซัลไฟด์ (sulfide) และออกไซด์ (oxide) ได้ดีกว่า ทองแดง ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาเป็น Zinc sulfide มีลักษณะเป็นสีขาว-เหลือง ส่วน Copper sulfide มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล-ดำ ทำให้เมื่อเกิดการหมอง เค้นชัดมากกว่า และการผสมนิกเกิลจากการวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคนิกเกิลบางส่วนจะเข้าไปรวมตัวกับทองแดง ซึ่งมีความเสถียร จึงทำให้ทองแดง บางส่วนไม่ทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ (sulfide) หรือออกไซด์ (oxide) เพิ่มขึ้น

2.8 ผลการคัดเลือกอัลลอยที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

จากการทดลองหล่อโลหะเงินผสมทั้ง 3 สูตร สามารถคัดเลือกอัลลอยที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุด 1 สูตร โดยมีเกณฑ์ตัดสินจาก 1) ด้านความแข็ง (Hardness) 2) ด้านการต้านทานการหมอง (Anti-Tarnish) และ 3) ด้านระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต (Time) โดยจะให้คะแนนเรียงจากโลหะเงินผสมที่มีสมบัติดีที่สุดของแต่ละด้าน คือมีค่าเท่ากับ 1 ไปจนถึงน้อยที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งโลหะที่ให้ผลรวมน้อยที่สุด คืออัลลอยที่มีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่เหมาะสม และสามารถนำไปพัฒนาต่อขั้นตอนในการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์

ตาราง 15 แสดงลำดับคะแนนของโลหะเงินผสมทั้ง 3 สูตร แบ่งตามสมบัติของโลหะในแต่ละด้าน

Alloy	Properties of Alloys			Summary
	Highest hardness	Anti-Tarnish	Best production time	
SA (92.5Ag-7.5Cu)	1	3	1	5
A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	3	2	2	7
B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	2	1	1	3

จากผลรวมคะแนนในตาราง 15 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัลลอยที่ให้ผลรวมน้อยที่สุดคือ อัลลอย B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) มีความแข็งและต้านทานการหมองได้ดี และใช้ระยะเวลาในการผลิตที่เหมาะสม ใช้ระยะเวลา 60 นาที ในการเพิ่มความแข็งได้ถึง 119.7 HV ดังนั้นการเติมธาตุ Zn และ Ni ในโลหะเงินสเตอร์ลิง สามารถช่วยเพิ่มสมบัติทั้งทางกลและทางกายภาพให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานและพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์ สามารถผสมโลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นและลดปริมาณการใช้ทองแดงในการผสมแต่ยังคงสมบัติทางด้านความแข็งที่ดีให้แก่โลหะเงินสเตอร์ลิงได้ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาระหว่างการผลิต เช่น ฝ้าดำ-ฝ้าแดง (Fire strain) ซึ่งเป็นผลมาจากออกไซด์ของทองแดงที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยเรื่อง อิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่มีผลต่อการออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง และเพื่อออกแบบการผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยการศึกษาองค์ประกอบของโลหะเงินผสม 3 องค์ประกอบที่แตกต่างกัน โดยมีโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เป็นมาตรฐาน คือ Alloy SA (โลหะในระบบ AgCu) เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบสมบัติ ส่วน Alloy A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) และ Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) เป็นอัลลอยมีส่วนผสมจากโลหะ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งเป็นการศึกษาโลหะในระบบ AgCuZnNi และมีการเพิ่มสัดส่วนของโลหะเงินเป็น 93.5 wt% และ 94.5 wt% ตามลำดับ พบว่าหลังหล่อค่าความแข็งโดยเฉลี่ยหลังหล่อมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 60-70 HV ซึ่งยังมีความแข็งไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน จึงปรับปรุงสมบัติของโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อนคือ การบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) จากการทดลองบ่มชิ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกัน พบว่ากระบวนการบ่มแข็งช่วยให้ค่าความแข็งสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 110-160 HV หลังจากการบ่มแข็ง จากกระบวนการ Homogenization ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 60 นาที จะทำให้ค่าความแข็งลดลงอยู่ที่ 50-60 HV แล้วทำการบ่มเพื่อเพิ่มความแข็งในงานวิจัยนี้อัลลอยแต่ละสูตรจะใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุดแตกต่างกัน ดังนี้

-Alloy SA (92.5Ag-7.5Cu) จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงที่สุดจาก 71.3 ± 1.1 HV เป็น 161.4 ± 2.4 HV เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที

-Alloy A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni) จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงที่สุดจาก 76.3 ± 0.5 HV เป็น 116.9 ± 8.8 HV เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 180 นาที

-Alloy B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงที่สุดจาก 67.6 ± 3.2 HV เป็น 119.7 ± 11.4 HV เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที

อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้สมบัติต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลธาตุสังกะสีและนิกเกิลที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิงในระบบ AgCuZnNi พบว่า

ทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นธาตุเจือหลักที่นิยมนำมาผสมในโลหะเงิน เพราะสามารถละลายเข้ากับเงินได้ดี และให้ผลดีในด้านความแข็ง เป็นธาตุที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงมากที่สุดในการบ่มแข็ง เนื่องจากการตกผลึกของเฟสทองแดงที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอเมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสม แต่การผสมทองแดงทำให้เกิดสนิมในโลหะเงินผสมได้อย่างรวดเร็วหรือที่เรียกว่าการหมอง สาเหตุมากจากการที่ทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็น CuO จึงต้องมีการผสมธาตุโลหะอื่นๆ เข้ามาเพื่อลดโอกาสในการเกิดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะ

สังกะสี (Zn) มีความสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน และมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าโลหะตัวอื่นๆ จึงช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวและทำให้น้ำโลหะสามารถไหลตัวได้ดีในขั้นตอนการหล่อ แต่เนื่องจากการที่สังกะสีเป็นธาตุที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำนั้น พลังงานขับเคลื่อน (Driving force) ก็ต่ำเช่นกัน ในกระบวนการบ่มแข็งจึงละลายผสมในเฟสของทองแดงไม่มีการเกิด nucleation ของ second phase หรือสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) ตกผลึกออกมา จึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมในระบบ AgCuZnNi

นิกเกิล (Ni) สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะเงินได้ จากสมบัติของตัวนิกเกิลเองที่ทำปฏิกิริยาและการที่นิกเกิลเข้าไปรวมตัวกับทองแดง ช่วยลดการเกิด CuO และการเติม Ni ประมาณ 0.1-1 wt% เข้าไปช่วยให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง เนื่องจาก Ni มีอะตอมขนาดเล็กกว่าโลหะเงิน สามารถเข้าไปแทรกตามโครงสร้างของเงินได้ดีทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอะตอม ทำหน้าที่คล้ายกับการเติม Cu ลงในโลหะเงินเพราะ Ni และ Cu มีขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเติมในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งลดลงซึ่งต่างกับ Cu ที่ยิ่งเติมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง เพราะ Ni มีความสามารถในการละลายในโลหะเงินต่ำ ถ้าผสมในปริมาณที่มากเกินไป Ni จะแยกเฟสออกจาก Ag อย่างชัดเจนแล้วไปจับตัวกับ Cu ที่มีความเสถียรมากกว่าแทน ซึ่ง Cu-Ni มีสมบัติเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (homogeneous solid solution) ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงแทน

จากการศึกษาค่าความแข็งร่วมกับโครงสร้างจุลภาค พบว่าลักษณะของโครงสร้างสอดคล้องกับค่าความแข็งที่วัดได้ โดยโลหะผสมในระบบ AgCu มีการเกิดเฟสที่สอง (second

phase) ของสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็ก (Precipitate) ของทองแดง (Cu) แยกตัวออกมา และกระจายอยู่ทั่วเนื้อโลหะเงิน เกิดการขัดขวางการเคลื่อนตัวของขอบเกรนของโลหะจากของเฟสทองแดงที่เกิดขึ้น ซึ่งโลหะเงินสเตอร์ลิงในระบบ AgCuZnNi จะให้ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ต่ำกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงในระบบ AgCu เพราะมีการเกิดเฟสที่สอง (second phase) น้อยกว่าและกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเท่ากับโลหะผสมในระบบ AgCu เนื่องจากสัดส่วนปริมาณทองแดงที่ลดลง และทองแดงบางส่วนมีการแยกตัวไปจับกับนิกเกิล ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า แต่โลหะผสมในระบบ AgCuZnNi สามารถต้านทานการหมองได้ดีกว่าโลหะผสมระบบ AgCu เนื่องจากมีการผสมทองแดงในปริมาณที่ลดลง และการเติมสังกะสี (Zn) มีความสามารถในการจับตัวกับ ซัลไฟด์ (sulfide) และออกไซด์ (oxide) ได้ดีกว่า ทองแดง (Cu) และการผสมนิกเกิลที่เข้าไปรวมตัวกับทองแดง จึงทำให้ทองแดงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ (sulfide) หรือออกไซด์ (oxide) และจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) พบว่า Alloy B มีเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างของค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุด คิดเป็น 21.85% รองลงมาคืออัลลอย A และ SA

ดังนั้นในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ต่อในเชิงพาณิชย์ พบว่า อัลลอย B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni) เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์มากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งและต้านทานการหมองได้ดี ช่วยยืดระยะเวลาในการสวมใส่หรือเก็บชิ้นงานไว้ได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น และใช้ระยะเวลาในการผลิตที่เหมาะสม บ่มในอุณหภูมิที่ไม่สูงมากและใช้เวลา 60 นาที สามารถเพิ่มความแข็งได้ถึง 119.7 HV สามารถนำเครื่องมือที่มีอยู่ภายในโรงงานมาประยุกต์ใช้ในการบ่มแข็งได้ และการเติมธาตุสังกะสีและนิกเกิลในโลหะเงินสเตอร์ลิง สามารถช่วยเพิ่มสมบัติทั้งทางกลและทางกายภาพ ให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานและพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์ สามารถผสมโลหะเงินที่ความบริสุทธิ์สูงขึ้นและลดปริมาณการใช้ทองแดงในการผสมแต่ยังคงสมบัติทางด้านความแข็งที่ดีให้แก่โลหะเงินสเตอร์ลิงได้ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาระหว่างการผลิต เช่น ฝ้าดำ-ฝ้าแดง (Fire strain) ซึ่งเป็นผลมาจากออกไซด์ของทองแดงที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะ

ข้อเสนอแนะ

สามารถศึกษาและพัฒนาต่อยอดอัลลอยโลหะเงินสเตอร์ลิงเพื่อให้ตอบโจทย์การใช้งานในอุตสาหกรรมมากที่สุด โดยศึกษาในแง่มุมอื่นเพิ่มเติม อาทิเช่น การนำอัลลอยกลับมาวนใช้ในการผลิต หรือ การแก้ปัญหาทางานหล่อที่เกิดขึ้น เช่น รูพรุน (porosity), ฝ้าแดง-ดำ (fire strain) และ การแตก (crack)

บรรณานุกรม

Advance Photo Systems Limited. (2024). *CIELAB color space*.

<https://advancedphotosystems.com/what-is-cielab/>

American Society for Testing and Materials. (2013). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. <https://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-E-8-yr-13.pdf>

Cableglan Center. (2563). รู้จักกับนิเกิล ประโยชน์ และการใช้งาน. <https://www.cableglan-center.com/nickel/>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition*. Wiley.

Corti, C. W. (2017). Basic Metallurgy of the Precious Metals: Part I. *Santa Fe Symposium*.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Lyman, C. E., Lifshin, E., & Michael, J. R. (2003). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. Plenum Publishers.

Lohwongwatana, B., Wirot, P., Yipyintum, C., Khamkongkaeo, O., Puncreobutr, C., Lothongkum, G., Nisaratanaporn, E., Vichaidith, T. E., Sriorathaikul, S., & Pornshalermpong, C. (2015). Comparative Tests for Identification of Silver Tarnishing. *Santa Fe Symposium*(249-279).

Praiphruk, S., Lothongkum, G., Nisaratanaporn, E., & Lohwongwatana, B. (2013a). Effects of Copper (Cu), Indium (In), Tin (Sn), Antimony (Sb) and Zinc (Zn) in Sterling Silver Alloys on Mechanical Properties Improvement. *Materials Testing*, 55(11-12), 819-823. <https://doi.org/doi:10.3139/120.110513>

Praiphruk, S., Lothongkum, G., Nisaratanaporn, E., & Lohwongwatana, B. (2013b). Investigation of supersaturated silver alloys for high hardness jewelry application. *J. Met. Mater. Miner*, 23.

Sakultanchareonchai, S., Chairuangri, T., & Nisaratanaporn, E. (2016). Microstructure and mechanical properties of as-cast and heat-treated 935AgCuBeSn alloys. 43, 206-214.

T MAX TECHNOLOGY. (2016). การทดสอบแรงดึงของโลหะ (*Tensile test of metal*).

<https://tmaxtech.co.th/blog/9-การทดสอบแรงดึงของโลหะ>

เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. (2549). เทคนิคการหล่อเครื่องประดับ. กรุงเทพฯ : โครงการเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันธุรกิจแฟชั่น สาขาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ภายใต้โครงการกรุงเทพฯ เมืองแฟชั่น กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ขจีพร วงศ์ปรีดี. (2551). การหล่อเครื่องประดับขั้นสูง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป.

ณัฐพล ชมแสง, ชุตินันต์ จันทร์เมือง, พรเกียรติ ชื่นจิตอภิรมย์, & สุทธาวัดย์ อิมอุไร. (2560). การปรับปรุงความแข็งโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับเทคนิคการฝังไร้หนาม.

ดลฤดี ไตเย็น. (2566). การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค *Energy Dispersive X-ray*

Spectroscopy (EDS). สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระชัย ลามอ. (2550). ความแข็ง (*Hardness*). กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2556). เงิน...โลหะมีค่าที่ไม่ควรมองผ่าน. <https://git.or.th/th/information-service/27/77/detail/887>

สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2565). ตรวจสอบโลหะมีค่า.

<https://git.or.th/th/service/263/96>



ภาคผนวก

ข้อมูลเพิ่มเติมจากภาพประกอบ 46 หน้า 52

1. ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ป้อนด้วยอุณหภูมิ 250°C ในเวลาที่ต่างกัน

Time (minute)	Alloy	Round 1 (HV)	Round 2 (HV)	Round 3 (HV)	Round 4 (HV)	Round 5 (HV)	Average (HV)	SD
5	SA	77.6	77.6	85.8	89.5	74.6	81.0	6.31
	A	49.7	57.0	56.7	56.0	48.1	53.5	4.25
	B	55.9	68.4	64.1	56.3	57.4	60.4	5.56
15	SA	89.3	86.7	84.0	91.2	81.2	86.5	4.01
	A	58.9	56.9	60.6	58.0	58.0	58.5	1.38
	B	58.9	58.8	67.2	59.6	58.7	60.6	3.68
30	SA	67.8	75.5	72.7	81.4	75.5	74.6	4.94
	A	60.2	62.6	61.4	64.8	63.1	62.4	1.74
	B	56.8	61.3	56.2	57.0	62.8	58.8	3.01
60	SA	159.5	165.3	162.1	160.7	159.2	161.4	2.48
	A	61.7	63.2	63.4	62.1	66.5	63.4	1.89
	B	61.2	62.0	65.3	57.6	60.8	61.4	2.76
120	SA	161.4	152.8	154.0	164.8	159.0	158.4	5.03
	A	77.7	68.3	75.1	66.2	73.7	72.2	4.80
	B	63.6	62.1	61.5	68.6	61.5	63.5	3.00
180	SA	168.2	151.1	160.6	165.2	146.1	158.2	9.38
	A	72.5	75.5	83.6	94.4	88.6	82.9	9.06
	B	58.0	58.9	59.0	60.0	57.2	58.6	1.06

2. ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ป้อนด้วยอุณหภูมิ 350°C ในเวลาที่ต่างกัน

Time (minute)	Alloy	Round 1 (HV)	Round 2 (HV)	Round 3 (HV)	Round 4 (HV)	Round 5 (HV)	Average (HV)	SD
5	SA	58.6	77.4	72.9	70.2	68.3	69.5	6.98
	A	59.5	60.5	58.0	62.5	72.5	62.6	5.77
	B	39.0	43.0	45.3	59.9	51.6	47.8	8.18
15	SA	83.2	76.0	67.9	85.1	80.7	78.6	6.88
	A	101.8	91.0	103.7	115.8	92.7	101.0	9.95
	B	91.7	93.3	86.8	82.1	90.5	88.9	4.48
30	SA	75.8	79.9	84.2	79.0	77.4	79.3	3.17
	A	97.3	97.2	104.5	97.5	109.8	101.3	5.69
	B	83.1	99.3	107.9	92.3	95.9	95.7	9.11
60	SA	154.9	151.1	135.0	156.4	144.1	148.3	8.83
	A	108.4	87.9	90.3	90.3	88.3	93.0	8.66
	B	110.6	130.2	133.5	115.2	108.9	119.7	11.41
120	SA	128.3	127.7	129.6	132.9	135.2	130.7	3.20
	A	112.0	93.3	116.0	97.8	94.9	102.8	10.45
	B	118.4	121.8	115.9	118.4	97.8	114.5	9.55
180	SA	143.0	125.5	128.9	133.6	147.2	135.6	9.22
	A	123.0	125.1	105.4	121.6	109.6	116.9	8.83
	B	106.7	116.2	115.1	126.1	104.0	113.6	8.73

3. ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ปั๊มด้วยอุณหภูมิ 450°C ในเวลาที่ต่างกัน

Time (minute)	Alloy	Round 1 (HV)	Round 2 (HV)	Round 3 (HV)	Round 4 (HV)	Round 5 (HV)	Average (HV)	SD
15	SA	122.5	139.7	110.3	105.0	119.0	119.3	13.34
	A	74.5	79.3	68.3	70.8	63.8	71.3	5.91
	B	51.1	63.0	55.7	60.6	55.4	57.2	4.69
30	SA	147.7	155.6	143.3	151.1	147.5	149.0	4.59
	A	106.2	114.9	109.2	107.2	103.6	108.2	4.24
	B	71.3	71.0	97.0	105.5	72.7	83.5	16.49
60	SA	133.1	142.9	137.7	148.5	134.8	139.4	6.30
	A	80.1	88.3	84.9	85.1	100.0	87.7	7.48
	B	82.7	91.5	96.7	107.0	89.2	93.4	9.10
120	SA	105.6	124.6	122.3	138.2	103.1	118.8	14.52
	A	97.1	97.3	104.0	104.2	97.6	100.0	3.71
	B	97.3	95.1	108.4	101.4	96.9	99.8	5.32
180	SA	114.6	107.0	105.7	107.3	95.4	106.0	6.88
	A	89.6	103.3	109.2	85.1	91.6	95.8	10.08
	B	80.3	91.2	96.7	100.3	90.8	91.9	7.58

4. ตารางแสดงค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการปั๊มแข็ง

Temp. (°C)	Alloy	Average Hardness (HV)					
		5 (min)	15 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)	180 (min)
250	SA (92.5Ag-7.5Cu)	81.0	86.5	74.6	161.4	158.4	158.2
	A(93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	53.5	58.5	62.4	63.4	72.2	82.9
	B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	60.4	60.6	58.8	61.4	63.5	58.6
350	SA (92.5Ag-7.5Cu)	69.5	78.6	79.3	148.3	130.7	135.6
	A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	62.6	101.0	101.3	93.0	102.8	116.9
	B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	47.8	88.9	95.7	119.7	114.5	113.6
450	SA (92.5Ag-7.5Cu)	100.5	119.3	149.0	139.4	118.8	106.0
	A (93.5Ag-5.0Cu-0.8Zn-0.7Ni)	58.0	71.3	108.2	87.7	100.0	95.8
	B (94.5Ag-4.3Cu-0.6Zn-0.6Ni)	55.1	57.2	83.5	93.4	99.8	91.9

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

พจนภา เด่นจากรูถ

