



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงความแข็งโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับเทคนิคการฝังไร้หนาม
Sterling Silver Hardness Improvement for Invisible Setting Technique

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล	ชมแสง	หัวหน้าโครงการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินันต์	จันทร์เมือง	ผู้ร่วมวิจัย
ดร.พรเกียรติ	ชื่นจิตตภิรมย์	ผู้ร่วมวิจัย
ดร.สุทธาวัลย์	อิมอุไร	ผู้ร่วมวิจัย

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

รหัสโครงการ 222733
สัญญาเลขที่ 161/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงความแข็งโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับเทคนิคการฝังไร้หมาม
Sterling Silver Hardness Improvement for Invisible Setting Technique

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล	ชมแสง	หัวหน้าโครงการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินันต์	จันทร์เมือง	ผู้ร่วมวิจัย
ดร.พรเกียรติ	ชื่นจิตอภิรมย์	ผู้ร่วมวิจัย
ดร.สุทธาวลัย	อิมอุไร	ผู้ร่วมวิจัย

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 161/2559

ขอขอบคุณ นางสาวฐิตารีย์ ชุ่มรอด และ นางสาวปราณี แซ่ล่าย สำหรับการช่วยงานวิจัยนี้ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับความช่วยเหลือในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ เจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง บริษัท คริสตี้เจมส์ จำกัด สำหรับเครื่องทดสอบสี่

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) และ โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม เทียบกับ โลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม ประกอบด้วย 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356), 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356), 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al, 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al, 93%Ag-7.0%Cu และ 93%Ag-7.0%Al หล่อด้วยกระบวนการสูญญากาศ หล่อที่อุณหภูมิ 1100°C และต่อมาบ่มที่ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง ชิ้นงานหลังหล่อและบ่มศึกษาองค์ประกอบเคมีด้วย Inductively couple plasma (ICP) และ ไทเตรชัน ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพร้อมติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์การกระจายตัวพลังงานรังสีเอ็กซ์ (EDS) ทดสอบการคงทนการหมอง แลวัดสีด้วยเครื่องวัดสี วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดจุลภาคแบบวิกเกอร์ ทดสอบความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ ผลการทดลองพบว่าองค์ประกอบทางเคมีหลังหล่อชิ้นงานไม่ต่ำกว่าโลหะเตรียมก่อนหล่อหลังตรวจสอบด้วย ICP ไทเตรชัน และ EDS สำหรับโครงสร้างชิ้นงาน หลังหล่อมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และพบเฟสที่มีลักษณะเป็นแท่งสีดำใน ตัวอย่างโลหะเงิน-อะลูมิเนียม หลังบ่มเกรนมีขนาดใหญ่และมีตะกอนขนาดเล็กเกิดขึ้น การทดสอบสี พบว่าโลหะเงินที่ผสมอะลูมิเนียมจะมีสีเทาเมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิง การเติมอะลูมิเนียมมีผลต่อการเพิ่มความแข็งและหลังจากบ่มมีความแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังหล่อ นอกจากนี้การทดสอบความต้านทานแรงดึงแสดงให้เห็นว่าเงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าโลหะเงินที่เติม อะลูมิเนียมในทุกตัวอย่าง หลังจากบ่มค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังหล่อ ขณะที่ค่าความยืดจะลดลงหลังจากการบ่มเนื่องจากโลหะมีความแข็งแต่เปราะมากขึ้น

Abstract

Silver-copper-aluminium (A356) and silver-copper-aluminium compared with silver-copper and silver-aluminium including 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356), 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) and 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356), 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al, 93%Ag-6%Cu-1%Al and 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al, 93%Ag-7.0%Cu and 93%Ag-7.0%Al was cast by vacuum casting machine. The samples were cast at 1100°C. Subsequently, all of samples were aged at 300°C for 1, 3, 6 and 9 hours. As-cast and aged samples were analyzed chemical composition with Inductively couple plasma (ICP) and titration. Microstructure was investigated with optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive x-ray spectrometer (EDS). Samples were tested tarnishing resistance and inspected color by colorimeter. Hardness of samples was tested by Vickers microhardness tester. Tensile samples were operated by universal tensile testing machine. After inspection chemical composition with ICP and titration, Ag element after casting was found in range of sterling silver standard. Microstructures of as-cast sample revealed dendrite of α -Ag rich phase. Moreover, black rod-shaped phase was found in Al-added sample. After ageing, grain growth and precipitate were found by OM and SEM, respectively. Color of Al-added sample

had gray color compared with sterling silver. Hardness was increased in Al-added samples and aged samples compared with as-cast samples. Moreover, sterling silver had shown tensile strength higher than that of silver added aluminium in all samples. Elongation of aged sample was decreased due to stiff behavior after ageing.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย	3
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	4
1.8 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย	7
1.9 งบประมาณของโครงการวิจัย	7
1.10 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยตามแผนการบริหารงาน และแผนการดำเนินงาน ตลอดแผนงานวิจัย	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	10
2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง	11
2.3 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อน	11
2.4 สมบัติต้านทานการดึง	13
2.5 การคำนวณปริมาณสัดส่วนของแข็ง	14
2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเตรียมชิ้นงานในการหล่อ	23
3.2 การหล่อด้วยกระบวนการสุญญากาศ	24
3.3 การบ่มแข็ง	27
3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย Inductively Couple Plasma (ICP) และ Potentiometric Titration	28

3.5	ตรวจสอบองค์ประกอบของเฟสด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)	29
3.6	การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง	29
3.7	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคแบบใช้แสง	30
3.8	การทดสอบความแข็ง	30
3.9	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงาน (EDS)	30
3.10	การทดสอบแรงดึง	31
3.11	การทดสอบการหมองและการวัดสี	33
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1	ชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อสุญญากาศ	34
4.2	การหาองค์ประกอบเคมีด้วย ICP และ Titration	36
4.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	36
4.4	โครงสร้างจุลภาคแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการตรวจวัดองค์ประกอบเคมีด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงาน (EDS)	45
4.5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)	50
4.6	ผลการทดสอบความแข็งจุลภาค	52
4.7	ผลการวัดสี a* และ b* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356)	57
4.8	ผลการวัดความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356)	61
4.9	ผลการวัดสี a* และ b* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม	66
4.10	ผลการวัดความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม	70
4.11	ผลการวัดสี a* และ b* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม	75
4.12	ผลการวัดความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม	76
4.13	ความต้านทานแรงดึงและความยืดของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) และ โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม เทียบกับ โลหะเงิน-ทองแดง	77
4.14	การทำเครื่องประดับ	80
บทที่ 5	สรุปผลวิจัย	
5.1	สรุปผล	81
5.2	ข้อเสนอแนะ	83
	เอกสารอ้างอิง	84
	ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	5
1.2	งบประมาณการวิจัยในปีงบประมาณ 2559	7
2.1	สภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะผสมเงิน	16
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง	24
4.1	เปรียบเทียบองค์ประกอบก่อนหล่อและหลังหล่อ	36
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของพื้นที่ที่มีเฟสของเงินเป็นส่วนผสมหลัก (α -rich phase) ตำแหน่งที่ 1 และ ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณเฟสยูเทคติก (Eutectic) ตำแหน่งที่ 2 ของทั้งสามองค์ประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	48
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของ 93%Ag-7.0%Cu และ 93%Ag-7.0%Al ตำแหน่งที่ 1 และ 2 บริเวณเฟสหลัก และ เฟสยูเทคติก	49
4.4	ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม (A356)	52
4.5	ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม	54
4.6	ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง และ เงิน-อลูมิเนียม	56
4.7	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356)	63
4.7	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) (ต่อ)	64
4.7	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) (ต่อ)	65
4.8	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al 93Ag-6.0Cu-1.0Al และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al	72
4.8	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al 93Ag-6.0Cu-1.0Al และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (ต่อ)	73
4.8	ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al 93Ag-6.0Cu-1.0Al และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (ต่อ)	74

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1	6
2.1	10
2.2	11
2.3	12
2.4	13
3.1	23
3.2	24
3.3	27
3.4	28
3.5	29
3.6	29
3.7	30
3.8	31
3.9	32
3.10	33
4.1	35
4.2	38
4.3	39
4.4	41
4.5	42

รูป		หน้า
4.6	ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม 3 องค์ประกอบหลังอบละลาย เฟสที่ 750°C และบ่มแข็งที่ 300°C เป็นเวลา 1 3 5 และ 9 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย จากเลนส์วัตถุ 5X	43
4.7	โครงสร้างของ 93%Ag-6%Cu-1%Al ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่อุณหภูมิ 9 ชั่วโมง จะพบการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็ก(precipitation)ทั่วเกรน กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20	44
4.8	ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงินผสมสำหรับอ้างอิง 1) 93%Ag-7%Cu 2) 93%Ag-7%Al ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20X หลังหล่อ	44
4.9	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินเป็นส่วนผสมหลัก(α -rich phase) ตำแหน่งที่ 1 หลังผ่านการ บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 1) 93%Ag-6.5% Cu-0.5% Al (A356) 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 3) 93%Ag-5.5% Cu-1.5%Al (A356)	46
4.10	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเฟสยูเทคติก (Eutectic) ตำแหน่งที่ 2 หลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 1) 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 3) 93%Ag-5.5%Cu-1.5% Al (A356)	47
4.11	โครงสร้างจุลภาคของ 1) 93%Ag-7.0%Cu และ 2) 93%Ag-7.0%Al หลังหล่อ และ วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2	49
4.12	แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานหลังหล่อ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356), 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)	50
4.13	แสดงผล XRD ของชิ้นงานหลังหล่อ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al, 93%Ag-6% Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al	51
4.14	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)	53
4.15	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al 93%Ag-6% Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al	55
4.16	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-7.0%Cu และ 93%Ag-7.0%Al	56
4.17	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ไม่ผ่านการทดสอบ ความหมอง	57
4.18	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 1 ชั่วโมง	58
4.19	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 3 ชั่วโมง	59
4.20	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 5 ชั่วโมง	60

รูป	หน้า	
4.21	ค่าการทดสอบความหมอง L* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356)	62
4.22	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม ที่ไม่ผ่านการทดสอบ ความหมอง	66
4.23	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 1 ชั่วโมง	67
4.24	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 3 ชั่วโมง	68
4.25	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบ ความหมอง 5 ชั่วโมง	69
4.26	ค่าการทดสอบความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม	70
4.27	ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 3 และ 5 ชั่วโมง	75
4.28	ค่าการทดสอบความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม	76
4.29	ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังหล่อและป้อนแข็ง	78
4.30	ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังหล่อ และป้อนแข็ง	78
4.31	เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังหล่อและป้อนแข็ง	79
4.32	เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังหล่อ และป้อนแข็ง	79
4.33	1) การทำเครื่องประดับฝังไ้หนาม 2) ตัวเรือนหลังหล่อเครื่องประดับฝังไ้หนาม และ 3) เครื่องประดับที่ฝังไ้หนามที่ฝังด้วยพลอยบุษราคัม (Yellow Sapphire)	80

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ยังคงเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่มียอดส่งออกสูงเป็นอันดับ 3 ของไทยรองจากอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องคอมพิวเตอร์ มีมูลค่าการส่งออกประมาณสี่แสนกว่าล้านบาทในปี 2555 จากปัจจัยที่ประเทศไทยมีความได้เปรียบทางด้านแรงงานฝีมือ คุณภาพของวัตถุดิบ และงบประมาณดำเนินการที่ยังได้เปรียบกว่าประเทศฝั่งตะวันตกซึ่งมีต้นทุนการผลิตสูงกว่ามาก ทำให้ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับอยู่ในลำดับต้นๆของโลก แต่อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมนี้ยังต้องการการพัฒนาเทคนิคและสินค้าใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดที่มีเพิ่มมากขึ้น

การฝังพลอยลงบนเครื่องประดับเป็นกระบวนการหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าสินค้าเครื่องประดับ วิธีการฝังพลอยมีหลายวิธีซึ่งมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน โดยวิธีที่นิยมโดยทั่วไปได้แก่ การฝังจิกไขปลา (Pave setting) การฝังหนามเตย (Prong setting) และการฝังหุ้ม (Bezel setting) นอกจากนี้มีวิธีการฝังไร้หนาม (Invisible setting) ที่เป็นวิธีการฝังที่โลหะไม่มาบดบังพลอยที่ฝังทำให้พลอยดูมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยพลอยจะถูกยึดจากด้านล่างซึ่งมีการเจาะร่องที่ฐานพลอยและทำรางสอดที่ตัวเรือนเพื่อให้พลอยสอดเข้าไปในร่องบาก แล้วจึงปิดปลายทั้งสองด้านของร่อง ซึ่งวิธีการนี้เป็นเทคนิคการฝังที่ยากกว่าวิธีอื่นๆ แต่มีข้อดีเหนือกว่าวิธีอื่นเพราะจะทำให้เครื่องประดับมีความสวยงามและดูหรูหรามากขึ้น โดยการฝังวิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยช่างฝังผู้มีความชำนาญ อย่างไรก็ตามเทคนิคการทำร่องสอดบนตัวเรือนในการฝังจริงต้องมีการแต่งเพื่อให้สอดพลอยเข้าไปได้พอดีร่อง แต่ผู้ประกอบการและช่างฝังจะพบปัญหาคือ โลหะเงินสเตอร์ลิงนั้นมีความอ่อนตัวมากเกินไปในขณะตกแต่งชิ้นงาน และหากโลหะไม่แข็งแรงเพียงพอก็อาจเกิดปัญหาไม่สามารถยึดจับพลอยให้แน่นอยู่ในร่อง ทำให้เม็ดพลอยหลุดออกจากรางทำให้พลอยหลุดทิ้งแฉวได้

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (Silver Sterling) เป็นโลหะที่นำมาใช้ทำตัวเรือนเครื่องประดับสำหรับงานฝังไร้หนามที่ประกอบด้วย 92.5%เงิน และ 7.5%ทองแดง โดยโลหะนี้สามารถผลิตในทางวิศวกรรมได้หลายวิธี เช่นการหล่อ (Casting) การรีด (Rolling) การปั๊มขึ้นรูป (Stamping) การดึงขึ้นรูป (Drawing) การฉีดขึ้นรูป (Extruding) การเชื่อม (Welding) การขึ้นรูปจากโลหะผง (Powder metallurgy) และการพ่นเคลือบ (Thermal spraying) [1] นอกจากนี้สามารถทำให้บ่มเพิ่มความแข็งแรงได้ หากเติมธาตุเจือบางชนิดที่สามารถละลายในเงินเหลวได้ดี

การปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติโลหะเงินโดยการเติมธาตุเจือ เช่น อะลูมิเนียม ซิลิกอน นิกเกิล สังกะสี เป็นต้น ในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้สมบัติของโลหะเงินดีขึ้น [2] นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพในโลหะเงินสเตอร์ลิงให้ดีขึ้นตามความต้องการทำได้โดยใช้การปรับปรุงด้วยความร้อน วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรง และลดความเค้นตกค้างในโลหะ การปรับปรุงด้วยความร้อนนั้นมีหลายวิธีแต่ในโลหะเงินหรือโลหะอื่นๆที่มีแผนภูมิวิภาคแบบเดียวกันนี้ จะเรียกการปรับปรุงด้วยความร้อนว่าการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitate hardening) หรือ การบ่มแข็ง (Age hardening) [3]

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติเหล่านี้หลังการหล่อและหลังผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน ซึ่งการวิจัยนอกจากสามารถส่งเสริมองค์ความรู้พื้นฐานของโลหะเครื่องประดับที่มีอยู่และการสร้างองค์ความรู้ใหม่ ในการเข้าใจถึงพฤติกรรมของโลหะสำหรับทำเครื่องประดับแล้ว ยังเป็นการพัฒนาศักยภาพทั้งทางวิชาการของกระบวนการผลิตโลหะมีค่า และส่งเสริมการพัฒนาในอุตสาหกรรมเครื่องประดับของไทยให้มีศักยภาพแข่งขันกับต่างประเทศ เพื่อนำไปสู่อุตสาหกรรมชั้นนำของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม
2. เพื่อพัฒนาโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมสำหรับเทคนิคการฝังแบบไร้หนามสำหรับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขยายต่อมซึ่งผลิตเครื่องประดับเงินของไทย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ตั้งแต่เดือนที่ 1-18 จะทำการศึกษาการออกแบบการทดลองและทดลองหล่อโลหะ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น สมบัติเชิงกล ทดสอบการหมอง การปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการบ่มแข็ง และการนำไปทดลองกับเครื่องประดับฝังไร้หนามร่วมกับผู้ประกอบการ และในช่วงที่ 2 ตั้งแต่เดือนที่ 19-24 จะเป็นการศึกษาโดยเน้นโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคขั้นสูงคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อทราบถึงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงในเชิงของผลึกศาสตร์ และการเปลี่ยนเฟสจากการบ่มแข็ง โดยมีขอบเขตการดำเนินงานรวมทั้งโครงการดังนี้

1. การหล่อโลหะ
 - หล่อด้วยวิธีเสียเทียนขี้ผึ้ง (lost-wax casting) ด้วยเครื่องหล่อโลหะแบบเหนียวน้ำ
 - สภาวะอากาศปกคลุมด้วยก๊าซอาร์กอน
2. ส่วนผสมโลหะ
 - โลหะผสมในระบบ Ag-Al, Ag-Cu-Al และ Ag-Cu-Al-Si-Mg
 - วัดส่วนผสมทางเคมีหลังหล่อด้วยเทคนิค ICP-MS
3. การทดสอบชิ้นงานหลังหล่อ
 - วัดความแข็งของโลหะผสมเงินที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดความแข็งหัวกดวิกเกอร์
 - วัดความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test)
 - วัดสีด้วยมาตรฐาน CIELAB และวัดความสามารถต่อการต้านทานการหมอง
4. การปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการบ่มแข็ง
 - ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบ่มแข็ง โดยใช้อุณหภูมิละลายที่ 700-800°C เวลา 1 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่ 300-500°C เวลา 0.5-4 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความแข็งสูงสุด (Peak age)

5. การตรวจสอบวัสดุภาคและโครงสร้างจุลภาค

- ตรวจสอบวัสดุภาคด้วยเทคนิค XRD
- ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานของวัสดุภาคในโลหะผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของวัสดุภาคด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ด้านวิชาการ

พัฒนาวัสดุโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงในระบบผสมด้วยอะลูมิเนียม โดยศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมและสภาวะในการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบ่มแข็ง เพื่อใช้สำหรับการฝังพลอยด้วยเทคนิคการฝังแบบไร้หนาม พร้อมทั้งการศึกษาโครงสร้างจุลภาคทั้งจากเครื่องมือเบื้องต้นเช่นกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการศึกษาเชิงโลหะวิทยาด้วยเครื่องมือขั้นสูงคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2. ด้านนโยบาย

งานวิจัยที่ได้เป็นการส่งเสริมการสร้างหน่วยงานในมหาวิทยาลัยให้เป็นองค์กรที่เป็นแหล่งรวมความรู้ด้านศาสตร์ต่างๆ เพื่อสนับสนุนนโยบายเพื่อให้มหาวิทยาลัยการเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้

3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

งานวิจัยนี้มีประโยชน์โดยตรงต่อธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งเป็นธุรกิจที่มีมูลค่าสูงและนำเงินเข้าประเทศในลำดับต้น

4. ด้านสังคมและชุมชน

สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรงทั้งในธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับขนาดใหญ่และวิสาหกิจชุมชนโดยเฉพาะกลุ่ม SME ผู้ประกอบกิจการด้านอัญมณีและเครื่องประดับ

5. หน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่จะนำผลงานไปใช้ประโยชน์

หน่วยงานภาครัฐที่สามารถนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์คือนิสิตนักศึกษาทั้งระดับอุดมศึกษาและบัณฑิตศึกษา ที่เปิดการเรียนการสอนด้านธรณี อัญมณีศาสตร์ และเทคโนโลยีเครื่องประดับ เช่น จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยบูรพา และมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาวิทยาลัยราชภัฏอื่นๆ รวมถึง สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับหน่วยงานเอกชนคือบริษัทผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ

1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

โครงการวิจัยนี้มีแผนการถ่ายทอดผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย 2 กลุ่มหลักคือ

1) กลุ่มงานวิจัย โดยการเผยแพร่เพื่อตีพิมพ์งานวิจัยในวารสารวิชาการทั้งระดับประเทศและระดับนานาชาติ โดยคาดว่าจะงานวิจัยนี้จะสามารถตีพิมพ์ด้านโลหะและโลหะผสม ดังนี้

- ผลของการเจืออะลูมิเนียมในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงสำหรับเครื่องประดับ ซึ่งคาดว่าจะสามารถตีพิมพ์ได้ในวารสาร Materials Science and Engineering A

- จุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงสำหรับเครื่องประดับ ซึ่งคาดว่าจะสามารถตีพิมพ์ได้ในวารสาร Journal of Alloys and Compounds

2) กลุ่มผู้ผลิต โดยการพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยสำหรับผู้สนใจหรือเกี่ยวข้องทั้งด้านอัญมณีและอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยการเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ลงในระบบอินเทอร์เน็ตและมีข้อมูลการวิจัยพร้อมรายละเอียดเพิ่มเติมใน <http://www.janburi.buu.ac.th/~gems/main.html> ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวมีแผนการเผยแพร่แก่ผู้สนใจทั่วไปโดยการเผยแพร่ในงานแสดงสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับ เช่น “เปิดโลกอัญมณีและของดีเมืองจันท” และ Bangkok Gems and Jewelry Fair ซึ่งคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ได้เข้าร่วมงานดังกล่าวเป็นประจำทุกปี เพื่อประชาสัมพันธ์หน่วยงานและจัดแสดงผลงานของนิสิต

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

เนื่องจากการคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา เป็นหน่วยงานที่มีการเรียนการสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ประชาชน พร้อมทั้งให้บริการแก่ภาคเอกชนอยู่แล้วนั้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ทางผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยโดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน เช่น เตาทหลอมโลหะ เตไฟฟ้าเพื่อบ่มแข็ง การทดสอบความแข็งจุลภาค และกล้องจุลทรรศน์แสงที่ติดตั้ง ณ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพาได้ ส่วนการทดสอบแรงดึง และการศึกษาโครงสร้าง สามารถดำเนินการ ณ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ คณะทันตแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล

1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

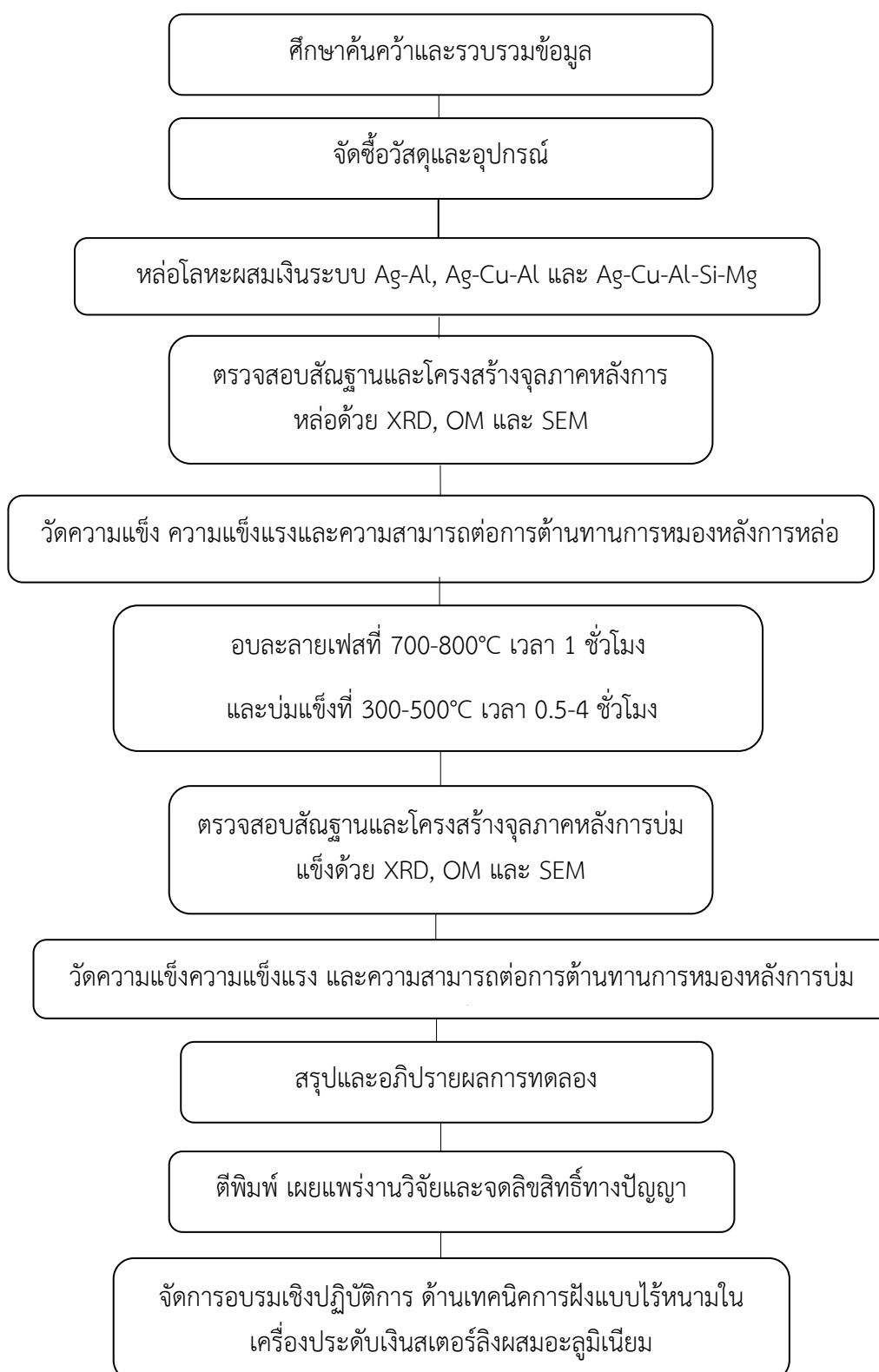
จะทำการศึกษาการออกแบบการทดลองและทดลองหล่อโลหะ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น สมบัติเชิงกล ทดสอบการหมอง การปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการบ่มแข็ง โดยมีขอบเขตการดำเนินงาน ปีที่ 1 ดังนี้

1. ศึกษาและค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง
3. ทดลองหาสภาวะหล่อที่แน่นอน
4. หล่อโลหะผสมเงินสำหรับเครื่องประดับในระบบสุญญากาศ ขององค์ประกอบ Ag-Al, Ag-Cu-Al และ Ag-Cu-Al-Si-Mg
5. วัดส่วนผสมทางเคมีหลังหล่อด้วยเทคนิค ICP
6. วัดความแข็งและความแข็งแรงของโลหะผสมเงินจากการหล่อที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดความแข็ง เครื่องทดสอบแรงดึง ตรวจสอบวัฏภาคด้วยเทคนิค XRD
7. ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานของวัฏภาคในโลหะผสม ด้วย OM และ SEM รวมถึงการตรวจสอบองค์ประกอบของวัฏภาคด้วยเทคนิค EDS

8. ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบ่มแข็ง โดยใช้อุณหภูมิละลายที่ 700-800°C เวลา 1 ชั่วโมง และบ่มที่ 300-500°C เวลา 0.5-4 ชั่วโมง
9. ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานของของวิภาคในโลหะผสมด้วย XRD, OM และ SEM และวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS
10. วัดความแข็งและความแข็งแรงชิ้นงานหลังการบ่มแข็ง
11. ทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองของโลหะหลังหล่อและหลังบ่มแข็ง ตามมาตรฐาน CIELAB
12. รวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลอง
13. นำผลการทดลองไปประยุกต์กับผู้ประกอบการผลิตเครื่องประดับฝังไต้หวันในปีที่ 2 ต่อไป สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล						
2. จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์						
3. ออกแบบและทดลองสภาวะหล่อ						
4. หล่อโลหะผสมในระบบต่าง ๆ ในระบบ สูญญากาศ						
5. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีชิ้นงานหลังหล่อด้วย ICP						
6. ตรวจสอบเฟสและโครงสร้างจุลภาคด้วย XRD, OM และ SEM ก่อนการบ่มแข็ง						
7. วัดความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังหล่อ						
8. ปรับปรุงคุณสมบัติโลหะผสมด้วยการบ่มแข็ง						
9. วัดความแข็งหลังการบ่มแข็ง						
10. ทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองในการหล่อที่ส่วนผสมต่าง ๆ						
11. ตรวจสอบเฟสและโครงสร้างจุลภาคด้วย XRD, OM และ SEM หลังการบ่มแข็ง						
12. เปรียบเทียบวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้						
13. เรียบเรียงผลงานเพื่อการตีพิมพ์						
14. จัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อเผยแพร่ความรู้แก่ผู้ประกอบการ						



รูปที่ 1.1 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย

1.8 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย

เนื่องจากการวิจัยโครงการนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อการพัฒนาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเหมาะสมสำหรับการฝังพลอยด้วยเทคนิคการฝังแบบไร้หนาม เพื่อเพิ่มศักยภาพของผู้ประกอบการธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม SMEs ของอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินของไทย โดยมีปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัยคือนักวิจัยมีศักยภาพทั้งมีความถนัดในด้านวัสดุศาสตร์ โลหะวิทยา การทดสอบวัสดุและความสามารถด้านการใช้เครื่องมือและการวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยเครื่องมือขั้นสูง โดยการวิจัยเบื้องต้น เช่น การหล่อโลหะ การวัดความแข็ง การวัดความสามารถต่อการต้านทานการหมอง การบ่มแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้น สามารถดำเนินการ ณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา การวัดความแข็งแรงโดยทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Tensile Test สามารถวัดได้ที่ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ดังนั้นการวิจัยโครงการนี้นับว่ามีปัจจัยที่เอื้อต่อการทำวิจัยครบทุกด้าน ทั้งด้านเครื่องมือทั้งเครื่องมือวิเคราะห์เบื้องต้นและเครื่องมือขั้นสูง อีกทั้งยังมีความพร้อมด้านบุคลากรซึ่งเป็นโครงการร่วมวิจัยระหว่างนักวิจัยผู้มีความรู้ ความชำนาญเฉพาะด้านทั้งวัสดุศาสตร์โดยความร่วมมือจากผู้ประกอบการ SMEs ในจังหวัดจันทบุรี ซึ่งยินดีนำโลหะที่ผ่านการวิจัยไปทดลองใช้ในการฝังพลอยแบบไร้หนาม จากปัจจัยดังกล่าวโครงการวิจัยนี้จึงมีปัจจัยที่เอื้อให้การทำงานสามารถดำเนินการได้ จึงคาดว่าโครงการจะสามารถบรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จด้วยประสิทธิภาพสูงสุด

1.9 งบประมาณของโครงการวิจัย

รวมตลอดโครงการ 550,000 บาท (ห้าแสนห้าหมื่นบาทถ้วน)

รายละเอียดงบประมาณการวิจัยจำแนกตามงบประมาณต่างๆ [ปีงบประมาณ 2559] โดยมีรายละเอียดงบประมาณ 2559 แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 งบประมาณการวิจัยในปีงบประมาณ 2559

รายการค่าใช้จ่าย	จำนวนเงิน (บาท)
1. งบบุคลากร	
- ค่าตอบแทนผู้วิจัย	55,000
- ค่าตอบแทนผู้ช่วยวิจัย	48,000
2. งบดำเนินการ	
2.1 ค่าตอบแทน ใช้สอยและวัสดุ	
2.1.1 ค่าใช้สอย เช่น	
1) ค่าใช้เครื่องมือและวิเคราะห์ตัวอย่าง Vicker hardness, XRD, และ SEM	70,000
2) ค่าเบี้ยเลี้ยง ค่าเช่าที่พัก ค่าพาหนะ	
3) ค่าจ้างเหมาบริการ	50,000
4) ค่าใช้สอยในการสัมมนาและฝึกอบรม	30,000
5) ค่ารับรองและพิธีการ	50,000

6) ค่าจัดทำรายงาน	15,000
7) ค่าใช้สอยอื่น ๆ	5,000
2.1.2 ค่าวัสดุ เช่น	10,000
1) ค่าวัสดุสำหรับการหล่อโลหะ ได้แก่ โลหะเงิน บริสุทธิ์ โลหะทองแดงบริสุทธิ์ โลหะ อะลูมิเนียม ซิลิกอนและแมกนีเซียม	90,000
2) ค่าวัสดุสิ้นเปลืองสำหรับเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ กระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ ผงขัดอะลูมินา ผง ขัดเพชร เรซิน เป็นต้น	20,000
3) ค่าสารเคมีในการกัดกรดเพื่อเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบการหมอง	5,000
4) วัสดุสำนักงาน	
5) วัสดุหนังสือ เอกสารและตำรา	5,000
6) วัสดุโฆษณา เผยแพร่และการตีพิมพ์และค่า ดำเนินการเพื่อจดลิขสิทธิ์ทางปัญญา	15,000
7) วัสดุอื่น ๆ	10,000
2.2 ค่าสาธารณูปโภค เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำประปา ค่าโทรศัพท์ ค่าไปรษณีย์ ค่าบริการด้านสื่อสารและโทรคมนาคม	15,000
2.3 ค่าสาธารณูปโภคให้กับมหาวิทยาลัย ๑๐% ของ งบประมาณ	2,000
	55,000
รวมงบประมาณโครงการ	550,000

1.10 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยตามแผนการบริหารงาน และแผนการดำเนินงาน ตลอดแผนงานวิจัย

การวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่เจือด้วยอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลให้โลหะมีความเหมาะสมสำหรับการฝังพลอยด้วยเทคนิคการฝังไร้หมาก ของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมของไทย โดยศึกษาถึงส่วนผสมที่เหมาะสม สภาวะในการบ่มแข็ง โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมอะลูมิเนียม ซึ่งคาดว่าผลสำเร็จของโครงการจะคุ้มค่าต่อการวิจัยเนื่องจากสามารถนำโลหะผสมที่ได้จากการวิจัย ไปใช้ในการผลิตเครื่องประดับเงินด้วยเทคนิคการฝังแบบไร้หมาก ซึ่งก่อประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ สามารถสร้างมูลค่าของเครื่องประดับเงินได้อีกมหาศาล ผลสำเร็จของงานวิจัยคาดว่าจะได้รับ คือ

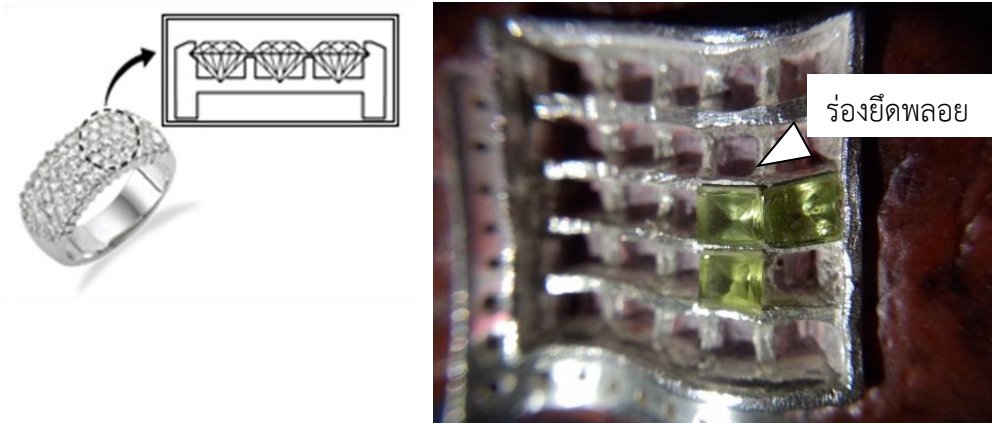
- 1) สามารถทราบถึงส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงเจืออะลูมิเนียม และการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีการบ่มแข็งเพื่อหาสภาวะที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะ ซึ่งเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่ได้จากการปรับปรุงโลหะผสมดังกล่าว ผลสำเร็จของการวิจัยระยะนี้เป็นผลสำเร็จเบื้องต้น (P)

- 2) จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องมือและเทคนิคขั้นสูง สามารถทำให้ทราบรายละเอียดเชิงฟิสิกศาสตร์และโลหะวิทยาของโลหะผสม และทราบถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงเจืออะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงความรู้กับองค์ความรู้พื้นฐานจากผลการวิจัยเบื้องต้น ผลสำเร็จของการวิจัยระยะนี้เป็นผลสำเร็จกึ่งกลาง (I)

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การฝังพลอยแบบไร้หมานั้นเป็นเทคนิคการฝังที่มีความสวยงามและสามารถเพิ่มมูลค่าของเครื่องประดับเนื่องจากสามารถเห็นเม็ดพลอยได้ชัดเจนโดยไม่มีเนื้อโลหะมาบดบัง โลหะที่ใช้ในการฝังแบบไร้หมานั้นจะต้องมีความแข็งแรงมากกว่าการฝังพลอยชนิดอื่นๆ เนื่องจากเม็ดพลอยจะถูกบากเป็นร่องในตำแหน่งด้านล่าง ในระดับต่ำกว่าผิวหน้าพลอยเล็กน้อย โลหะส่วนหนึ่งในการฝังวิธีนี้จะต้องสอดเข้าไปในรอยบากของเม็ดพลอยได้พอดี ดังรูปที่ 2.1 เพื่อทำหน้าที่จับยึดเม็ดพลอย และอีกส่วนหนึ่งทำหน้าที่เป็นฐานรองเม็ดพลอยทางด้านล่าง โลหะนี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอในการจับยึดเม็ดพลอย แต่จากการทำงานของผู้ผลิตเครื่องประดับเงินยังพบปัญหาสำคัญคือเงินสเตอร์ลิงที่ใช้โดยทั่วไปนั้นไม่มีความแข็งแรงที่เพียงพอ ดังนั้นเม็ดพลอยจึงมักมีการหลุดหรือเสียหายในระหว่างการใช้งาน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงในระบบที่มีการเจือด้วยอะลูมิเนียม คือ Ag-Al, Ag-Cu-Al และ Ag-Cu-Al-Si-Mg เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการพบว่าอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu ได้ อีกทั้งอะลูมิเนียมยังเป็นโลหะที่มีความขาว ดังนั้นนอกจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงแล้ว สีของโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Al ยังทำให้โลหะผสมเงินมีสีขาวสว่างมากขึ้นด้วย ดังนั้นโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ผสมด้วยอะลูมิเนียมจึงควรได้รับการศึกษาและวิจัยเพื่อประโยชน์สำหรับการผลิตเครื่องประดับโดยเฉพาะการฝังแบบไร้หมานั้น ตัวอย่างชิ้นงานเครื่องประดับที่ฝังด้วยเทคนิคการฝังไร้หมานั้นแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะการฝังไร้หมั้นโดยสอดพลอยไปตามร่องที่บากบนโลหะ



รูปที่ 2.2 ชิ้นงานเครื่องประดับจากการฝังด้วยเทคนิคฝังแบบไร้หนาม

2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

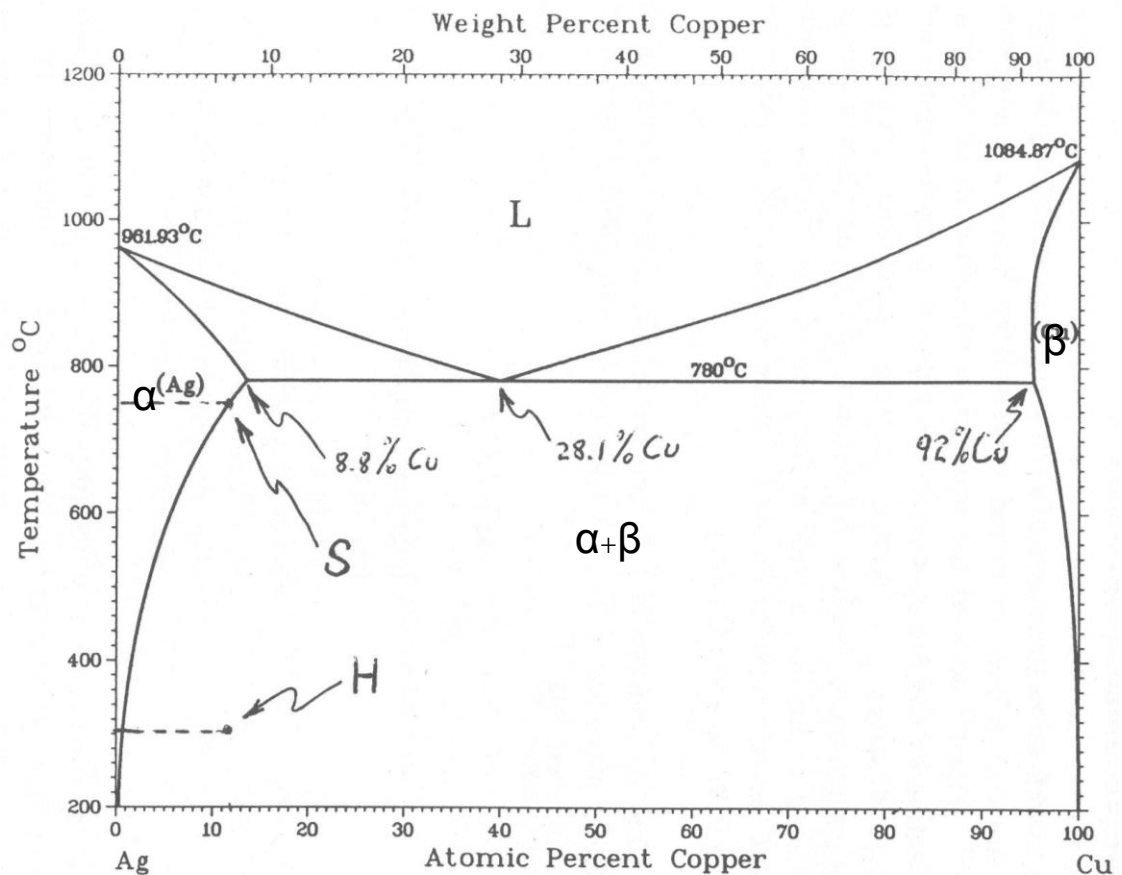
โลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงจะใช้แผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu ในการอธิบายถึงโครงสร้างหลังการแข็งตัว สำหรับแผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu แสดงดังรูปที่ 2.3 จากแผนภูมิ Ag จะแทนด้วยวัฏภาคอัลฟา และ Cu จะแทนด้วยวัฏภาคเบต้า ซึ่ง Cu สามารถละลายในเงินได้ไม่เกิน 8.8%Cu ระหว่างการแข็งตัว หากมากกว่านั้นจะเกินเป็นวัฏภาคเบต้า ในเงิน และที่ 28%Cu เมื่อโลหะเย็นตัวผ่านเส้นแบ่งระหว่างของแข็งและของเหลวที่อุณหภูมิ 780°C ก็จะเกิดวัฏภาคยูเทคติกระหว่างอัลฟาและเบต้า ทั้งนี้ กลไกการแข็งตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อ ที่องค์ประกอบ 8.8%Cu จะเกิดเดนไดรต์ของเงินก่อน เมื่อเย็นตัวลงมาถึงตามเส้น Solidus จนถึงอุณหภูมิประมาณ 780°C ก็จะเกิดยูเทคติกของ Cu-rich กับ Ag ในโลหะเหลวที่ยังเหลืออยู่ และเมื่อเย็นตัวลงอย่างสมบูรณ์ก็เกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติกกระจายตัวระหว่างเดนไดรต์

2.3 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อน

การปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพในโลหะเงินสเตอร์ลิงให้ดีขึ้นตามความต้องการทำได้โดยใช้การปรับปรุงด้วยความร้อน วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความลดความเค้นตกค้างในโลหะ การปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะเงินหรือโลหะอื่น ๆ ที่มีแผนภูมิวัฏภาคแบบเดียวกันนี้ จะใช้การปรับปรุงด้วยความร้อนที่เป็นการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitate hardening) หรือ การบ่มแข็ง (Age hardening) ซึ่งขั้นตอนการบ่มแข็งในโลหะผสมเงินจากการศึกษาของ Grimwade (Grimwade, 1991) มีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) หรือการอบละลาย (Solution treatment) โดยให้อุณหภูมิเหนือจุด S (Solvus temperature) ประมาณ 745°C ในรูปที่ 2.3 เพื่อให้ได้สารละลายของแข็งเนื้อเดียวกัน

- 2) ตามด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อป้องกันวัฏภาค Cu-rich กลับมาตกตะกอนหรือเกิดเป็นนิวเคลียสใหม่ จะได้วัฏภาคสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) ซึ่งไม่เสถียร
- 3) ให้ความร้อนกับวัฏภาคสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดอีกครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุด H ในรูปที่ 2.3 เรียกขั้นตอนนี้ว่าการบ่ม (Ageing) ที่อุณหภูมิต่ำๆ อะตอมของ Cu จะมารวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง การบ่มควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำและควรใช้เวลาในการบ่มนาน สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงใช้อุณหภูมิในการบ่มประมาณ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

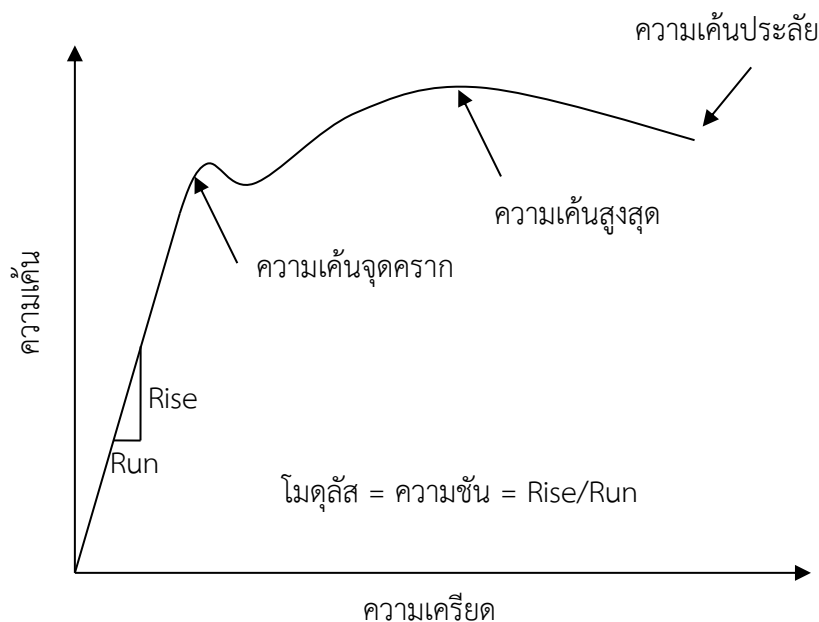


รูปที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลของ Ag-Cu (Aldo, 1997)

2.4 สมบัติด้านทานการดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบแบบทำลายโดยการดึงชิ้นงานให้ขาด โดยให้ความเร็วในการดึงแบบช้าและคงที่ การทดสอบนี้เป็นวิธีประเมินความแข็งแรงของโลหะ ซึ่ง จะแสดงคุณสมบัติ ความเค้นจุดคราก ความเครียด ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของความ ยืดหยุ่น ความเค้นประลัย และ ความเหนียว เป็น (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัยม, 2550)

- 1) ความเค้นจุดคราก (Yield strength) คือ ความเค้นที่โลหะเปลี่ยนแปลงรูปจากแบบ ยืดหยุ่น (Elastic) ไปเป็นแบบถาวร (Plastic) ตำแหน่งจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.2 การหาค่าความเค้นจุดครากที่ตำแหน่งแน่นอนบนกราฟเป็นไปได้ยากดังนั้นจึง กำหนดให้ลากเส้นตรงขนานกับเส้นกราฟช่วงเส้นตรงแรก โดยเริ่มที่ตำแหน่งเส้น ความเครียดประมาณ 0.2% เมื่อเส้นนี้ตัดกับเส้นกราฟก็จะได้จุดคราก หรือเรียกจุดที่ ได้นี้ว่าความเค้นพิสูจน์ ซึ่งความเค้นจุดครากมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตรหรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 2) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) หรือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ซึ่งแสดง ในรูปที่ 2.4 จะเกิดหลังจากที่โลหะเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหลังจุดคราก ความต้านทาน



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

แรงดึง เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะจะสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ในวัสดุที่เปราะค่าความเค้นสูงสุดจะเท่ากับค่าความเค้นจุดครากหรือความเค้นประลัย แต่จะมีค่าความเค้นเหล่านี้สูงกว่าวัสดุเหนียว มีหน่วยเดียวกันกับความเค้นจุดคราก

3) โมดูลัส (Modulus) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) เป็นความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะที่มีแรงมากระทำ และเมื่อเอาแรงที่กระทำออกโลหะจะกลับมาสู่สภาพเดิม เรียกว่าการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) โมดูลัสหาได้จากค่าความชันระหว่างความเค้นต่อความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร

4) ความเค้นประลัย (Fracture strength) เป็นความเค้นที่ทำให้โลหะแตกหัก เกิดที่ปลายกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในรูปที่ 2.4

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโลหะผสมเงินสำหรับเครื่องประดับโดยทั่วไปนั้น มีส่วนผสมระหว่างเงิน 92.5% และทองแดง 7.5%โดยน้ำหนัก การปรับปรุงด้วยกระบวนการผลิตแบบกึ่งของแข็งและการปรับปรุงความร้อนซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงศึกษาถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินหลังจากการหล่อกึ่งของแข็งและหลังการปรับปรุงด้วยความร้อน โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 700-800°C เวลา 1 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 0.5-4 ชั่วโมง และเปรียบเทียบผลการบ่มแข็งที่สภาวะต่าง ๆ

2.5 การคำนวณปริมาณสัดส่วนของแข็ง

ขณะเกิดกระบวนการแข็งตัวของโลหะ ปริมาณสัดส่วนของของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ขณะที่น้ำโลหะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งนั้น สามารถหาได้จาก Scheil Equation ดังสมการ 2.1

$$F_s^{Sch} = 1 - \left[\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right]^{-\frac{1}{k-1}} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า k มีค่าตามสมการที่ 2.2

$$k = \frac{C_s}{C_L} \quad (2.2)$$

เมื่อ T_L คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่วัดได้จากการทดลอง, องศาเซลเซียส

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะหลัก, องศาเซลเซียส

T คือ อุณหภูมิที่ต้องการสัดส่วนของของแข็ง

C_s คือ องค์ประกอบของแข็งในสภาวะกึ่งของแข็ง, ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะผสม

C_L คือ องค์ประกอบของเหลวในสภาวะกึ่งของเหลว, ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะผสม

2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจข้อมูลของกรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์ พบว่าตั้งแต่ปี 2553 ถึงปัจจุบัน สินค้าอัญมณีและเครื่องประดับเป็นสินค้าที่มีมูลค่าส่งออกอยู่ในอันดับ 3 ของสินค้าส่งออกของประเทศ (สินค้าส่งออก, 2557) ปัจจัยที่เป็นแรงหนุนให้สินค้ากลุ่มอัญมณีและเครื่องประดับเป็นสินค้าส่งออกสำคัญเนื่องจากความได้เปรียบหลายประการของไทย เช่น ความประณีตและแรงงานคุณภาพ รวมถึงความสามารถพิเศษในการปรับปรุงคุณสมบัติพลอย ให้สามารถเพิ่มความสวยงามและคุณค่า โดยนอกจากความสวยงามของอัญมณีที่นำมาผลิตเป็นเครื่องประดับแล้ว วัสดุที่นำมาผลิตเครื่องประดับก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำเครื่องประดับจัดเป็นเป็นโลหะมีค่า มีความสวยงาม และมีราคาสูง เช่น ทอง (Au) เงิน (Ag) แพลทินัม (Pt) และแพลเลเดียม (Pd) การวิจัยและพัฒนาโลหะมีค่าสำหรับเครื่องประดับจึงยังมีความสำคัญและความจำเป็นต่ออุตสาหกรรมนี้โดยไม่สามารถมองข้ามได้

โลหะเงินจัดเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีความต้องการและความนิยมในตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศสูง เนื่องจากโลหะเงินมีลักษณะสีเฉพาะตัวเป็นสีขาวเงิน มีน้ำหนัก และมีการสะท้อนแสงได้สูงถึง 95% จึงนับเป็นโลหะที่มีความสามารถในการสะท้อนแสงที่สูงที่สุด ทั้งยังมีความอ่อนตัวสามารถถักเป็นเส้นและขึ้นรูปได้ดี แต่เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์นั้นมีความอ่อนตัวมากเกินไป ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ จึงมีการปรับปรุงสมบัติของโลหะเงินให้เหมาะกับการทำเป็นเครื่องประดับมากขึ้น โดยโลหะเงินผสมนี้จะต้องมีปริมาณเงินไม่น้อยกว่า 92.5 %โดยน้ำหนัก และมีทองแดง (Cu) 7.5 %โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะด้านความแข็งแรงและความแข็งแรง เรียกว่าเงินสเตอร์ลิง (sterling silver) โดยการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงนั้น มีทั้งการปรับปรุงในขั้นตอนการหล่อเพื่อให้ได้โลหะหล่อ (as-cast) มีสมบัติที่ดีขึ้นและการปรับปรุงขึ้นงานหล่อด้วยกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) ด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Age-hardening หรือ Precipitation hardening) ซึ่งมุ่งปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนนั้นมักใช้กับชิ้นงานบางกลุ่มเนื่องจากมีต้นทุนด้านพลังงานและสิ้นเปลืองมากขึ้น

2.6.1 การหล่อโลหะเงินและการปรับปรุงด้วยความร้อน

โลหะเงินนั้นสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น วัสดุอุดฟันทางทันตกรรม ตัวประสานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องประดับ เป็นต้น ดังนั้นโลหะเงินหล่อจึงมีหลายองค์ประกอบแล้วแต่การนำไปใช้ อย่างไรก็ตามเอกสารสำหรับอ้างอิงทางโลหะวิทยาและสมบัติของโลหะเงินที่ใช้ทำเครื่องประดับยังมีไม่มากเมื่อเทียบกับโลหะเงินกลุ่มอื่นๆ จึงจำเป็นต้องรวบรวมเอกสารเพิ่มเติมด้านวิธีการหล่อและการปรับปรุงด้วยความร้อนจากโลหะเงินที่นำไปใช้งานด้านอื่น ซึ่งมีวิธีการหล่อหรือปรับปรุงด้วยความร้อนไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากมีโลหะเงินเป็นธาตุหลักเหมือนกัน อย่างไรก็ตามการหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงจะหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 990°C แต่การหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมแมงกานีส (Mn) เพื่อต้านทานการหมองและเพิ่มความแข็งแรง โดยจะหลอมที่ 1030°C เนื่องจากแมงกานีสมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า (Nisaratanaporn, 2007) นอกจากแมงกานีสแล้วยังมีธาตุเจืออื่นๆ

ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติในระหว่างการหล่อขึ้นรูปได้ อย่าง สังกะสี (Zn) ซิลิกอน (Si) เจอเมเนียม (Ge) อิริเดียม (Ir) และโบรอน (B) ภายหลังจากการหล่อแล้วสามารถนำโลหะเงินไปปรับปรุงด้วยความร้อน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่างๆให้ดีขึ้น ทำได้โดยการอบละลายหรืออบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตามด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารละลายของแข็งอิมพัลล์และชั้นตอนสุดท้ายคือการบ่มแข็ง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในโครงสร้างของโลหะเงิน กระบวนการปรับปรุงนี้ถือว่าสำคัญมากส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินโดยตรง มีผู้ทำการศึกษาสภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนทั้งอุณหภูมิและเวลาในโลหะเงิน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะผสมเงิน

ชิ้นงาน	การปรับปรุงด้วยความร้อน			อ้างอิง
	การอบละลาย	การทำให้เย็นตัว อย่างรวดเร็ว	การบ่ม	
Ag-8at%Cu	800°C 6 hrs.	เย็นตัวในอากาศ ที่อุณหภูมิห้อง	200, 250, 300, 350, 400 และ 500°C, 0- 5hrs.	Youssef (Youssef, 1996)
Ag-Cu-Zn-Cd	400-460°C 6-8 hrs.	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	Dev และ คณะ (Dev, 1996)
Ag-Mn Ag-Mn- 5at%Au Ag-Mn- 5at%Pd	900°C 2 hrs.	เย็นตัวในน้ำแข็ง	300, 400 และ 500°C, ไม่ระบุเวลา	Kawashima และ คณะ (Kawashima,1998), (Kawashima, 2000)
Ag-4wt%Er	750°C 25 hrs.	เย็นตัวในอากาศ อย่างช้าๆ	ไม่ระบุ	Herman และ คณะ (Herman D.M., 2008)
Ag-Pd-Cu-Au-	750-900°C	เย็นตัวในน้ำเกลือเย็น	350, 400, 450และ	Seol และ

Zn-Sn-Ir	15-30 min		550°C,	คณะ (Seol H.J.,2005), (Seol H.J., 2006)
Ag-Cu-Zn-Cd	ในอาร์กอน		0-27days	
Ag-Pd-Cu-Au- Zn-Ir-In	700°C 5 min ในอาร์กอน	เย็นตัวในน้ำเกลือเย็น	350 และ 400°C, 0-27days	Yu และ คณะ (Yu C.H., 2008)
Ag-Pd-Au-In- Zn	750°C 30 min ในอาร์กอน	เย็นตัวในน้ำเกลือเย็น	350, 400 และ 450°C, 0-27days	Lee และ คณะ (Lee H.K., 2004)

จากการศึกษากลไกการตกตะกอนในโลหะเงิน Ag-8wt%Cu พบโครงสร้างผลึกที่มีทวิน (Twin) แต่ยังไม่เกิดการตกตะกอนภายหลังจากการอบอ่อน และเมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400°C โครงสร้างภายในจะประกอบด้วย ชั้นของสารละลายของแข็ง Ag-rich และ สารละลายของแข็ง Cu-rich (Hamana D., 2009) ขณะที่โลหะเงินที่มีองค์ประกอบของ Pd, Cu และ Au มีโครงสร้างที่ซับซ้อนภายหลังจากการบ่มแข็ง จากโครงสร้าง Ag-rich α_1 และ สารละลายของแข็ง Cu-rich α_1 ที่มี Pd หลังจากการอบละลาย และเปลี่ยนเป็น Ag-rich α_1 , Cu-rich α_1 , CuPd และ AuCu หลังการบ่มแข็ง (Seol H.J., 2006) แต่กรณีของโลหะเงินที่เติม เออเปียม (Er) จากการศึกษโดย Herman และคณะ (2008) นั้นจะเป็นเนื้อเดียวกันได้เมื่ออบที่อุณหภูมิ 750°C และต้องเย็นตัวอย่างช้าๆก็จะหลีกเลี่ยงองค์ประกอบระหว่างโลหะ Ag₅₁Er₁₄ ในสารละลายของแข็งที่มีผลทำให้สมบัติทางกลลดลง การเกิดการตกตะกอนนั้นสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ได้หลายเทคนิคเช่น DSC, dilatometer, resistivity, XRD, SEM และ TEM เป็นต้น

2.6.2 สมบัติทางกลของโลหะเงิน

โลหะเงินสเตอร์ลิงหลังการหล่อยังมีสมบัติทางกลที่ยังไม่ดีมากนักหากต้องการนำไปขึ้นรูปความแข็งโดยทั่วไปอยู่ประมาณ 60-70 HV (Nisaratanaporn, 2007), (Colombo S., 2007) ภายหลังจากผ่านการบ่มแข็งแล้วค่าความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นสามารถเปรียบเทียบได้จากโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีเติม Cu และ Mn ความแข็งหลังหล่อ อยู่ที่ 50-65 HV ขึ้นกับอัตราส่วนของ Mn ถ้าเติมมากทำให้ค่าความแข็งลดลง เนื่องจาก Mn จะไปรวมตัวกันในยูเทคติกมากกว่าในวัฏภาคหลัก (Nisaratanaporn, 2007) แต่จากการศึกษาโดย Kawashima และคณะ (2000) โลหะเงินที่เติม Mn เมื่อผ่านการปรับปรุงทางความร้อนจนถึงขั้นตอนการบ่มแข็ง ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าตัว และยังชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาในการบ่มมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็ง การบ่มแข็งที่ 300-400°C จะได้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันแต่จะใช้เวลาที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นนั้นไม่เท่ากัน ที่ 400°C ความ

แข็งสูงสุดจะใช้เวลาน้อยกว่าถึง 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการบ่มที่ 300°C และเมื่อใช้เวลาบ่มนานขึ้น ค่าความแข็งจะลดลงในทุกอุณหภูมิการบ่ม เนื่องจากการรวมตัวของตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือเรียกว่าการบ่มเกิน (Over ageing) ซึ่งความแข็งของโลหะเงินทางทันตกรรมที่มีธาตุหลัก ได้แก่ Ag, Pd, Cu และ Au ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ช่วงอุณหภูมิ 350-450°C ก็สามารถเพิ่มความแข็งได้สูงถึง 300 HV (Seol H.J., 2005), (Seol H.J., 2006), (Yu C.H., 2008), (Lee H.K., 2004) นอกจากอุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อความแข็งแล้วธาตุเจือที่เติมก็มีอิทธิพลด้วยเช่นกัน ความแข็งสูงสุดของโลหะเงิน Ag-Mn ที่เจือ Au ใช้อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 400°C ต่ำกว่าเจือด้วย Pd บ่มที่อุณหภูมิ 500°C และการบ่มแข็งที่ 300-400°C ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ เนื่องจากพลังงานที่จะทำให้อนุภาคมาเกิดการตกตะกอนไม่เพียงพอ (Kawashima, 2000)

ความสามารถต้านทานแรงดึงในโลหะเงินเป็นสมบัติที่สำคัญที่จะบอกถึงสามารถในการขึ้นรูป เพื่อผลิตเป็นเครื่องประดับ โลหะเงิน Ag-Cu-Mn หลังการหล่อจะมีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 100-200 MPa (Nisaratanaporn, 2007) โลหะเงินที่มีองค์ประกอบ Ag-16wt%Cu-20wt%Zn-20wt%Cd สำหรับงานเชื่อมเป็นองค์ประกอบที่พัฒนาเปรียบเทียบกับทางการค้า โดยโลหะเงินนี้เมื่อผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400-460°C มีค่าความต้านทานสูงถึง 400 MPa มากกว่าทางการค้า 50 Mpa (Dev, 1996) ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นมาจากสภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อน นอกจากนี้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดเกรนและอุณหภูมิการเสียรูปในช่วง 27-190°C ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงในโลหะเงิน Ag-4.4wt%Cu ที่ผ่านการขึ้นรูป เมื่อเพิ่มขนาดเกรนและอุณหภูมิการเสียรูปทำให้ความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำจากเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะลดความเค้นภายในโครงสร้างของโลหะเงิน ซึ่งการศึกษานี้ไม่ได้มีการบ่มแข็งโลหะเงินเพิ่มเติม

2.6.3 การปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินหลังหล่อ

ดังที่ได้กล่าวข้างต้น โลหะเงินบริสุทธิ์นั้นมีความแข็งสูง มีความอ่อนตัวสูง สามารถดึงขึ้นรูปได้ง่าย แต่ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้ผลิตเป็นเครื่องประดับ โดยโลหะเงินบริสุทธิ์ในสภาวะอบอ่อนมีความแข็งเพียงประมาณ 30HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับโลหะทองแดงบริสุทธิ์ในสภาวะอบอ่อน (Metal hardness., 2557) การปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแก่โลหะนี้สามารถทำได้โดยการเติมโลหะบางชนิดเพื่อให้เกิดเป็นโลหะผสม (alloys) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ โดยอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนั้นกำหนดให้มาตรฐานโลหะผสมเงินหรือโลหะเงินเจือในการทำเป็นเครื่องประดับต้องมีปริมาณเงินไม่น้อยกว่า 92.5% โดยน้ำหนัก หรือเรียกว่าเงินสเตอร์ลิง ซึ่งธาตุที่นิยมเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ แก่โลหะเงิน เช่น การเติมทองแดง (Cu) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง การเติมสังกะสี (Zn) หรือฟอสฟอรัส (P) เพื่อช่วยกำจัดออกซิเจนในน้ำโลหะเหลว เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของผิวชิ้นงานหล่อและช่วยให้สามารถหล่อได้เต็มแบบ การเจือด้วยซิลิกอน (Si) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมอง การเจือธาตุโบรอน (B) และอิริเดียม (Ir) เพื่อลดขนาดเกรนในการหล่อ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะผสมเงินชนิดใหม่ในปัจจุบันนี้ได้รับการพัฒนาให้มีการเจือด้วยธาตุต่างๆ เหล่านี้ เพื่อให้มีสมบัติด้านความแข็ง มีความต้านทานการหมองที่ดีและสามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย (Fischer-Buehner, 2003) โดยโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงสำหรับเครื่องประดับที่มีส่วนผสมของทองแดง 7.5 % โดยน้ำหนัก ในสภาวะหลังหล่อ (as-cast sterling-

silver alloy) ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 60-70 HV เนื่องจากเอกสารและงานวิจัยในโลหะสำหรับเครื่องประดับนั้นมีย่อย จึงได้รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมเงินที่ใช้งานเฉพาะในด้านอื่น ๆ ด้วย เช่น โลหะผสมเงินทางทันตกรรม โลหะผสมเงินทางอุตสาหกรรม และทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งกรรมวิธีในการปรับปรุงโลหะผสมเงินในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ อาศัยหลักการเดียวกัน จึงสามารถเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับโลหะผสมเงินในงานเครื่องประดับได้เช่นกัน การควบคุมสมบัติของโลหะผสมเงินนั้นมีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายประการ เช่น ส่วนผสม สภาวะและอุณหภูมิในการหล่อ รวมถึงการควบคุมโครงสร้างจุลภาคโดยผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งภายหลังการหล่อ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อความแข็งของโลหะผสมเงิน นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานของเฟสที่เกิดในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ก็มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะต้องควบคุมสภาวะของอุณหภูมิ เวลาและอัตราในการเย็นตัว (quenching) เพื่อให้โลหะเกิดเฟสเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการบ่มแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงนั้น (McFarland, 1934) ทำการอบให้ละลายที่อุณหภูมิ 732°C เวลา 30 นาที และบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที ในขณะที่ (Colombo, 2007) อบให้เฟสเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 745°C เวลา 60 นาที และอบบ่มที่อุณหภูมิ 140-347°C เวลาไม่เกิน 25 นาที เพื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งในสภาวะต่างๆ พบว่าค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นความแข็งจะลดลงเนื่องจากตะกอนของทองแดงมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้การศึกษาการเปลี่ยนเฟสและโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการบ่มของโลหะผสมในระบบ Ag-Pd-Cu-Au โดยการใช้เทคนิค XRD และ SEM (Yu, 2008) พบว่าในโลหะผสมเงินที่ผ่านอุณหภูมิปรับปรุงทางความร้อนที่ 700°C และอบบ่มที่อุณหภูมিরะหว่าง 350-400°C นั้นจะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความแข็งก็จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ความแข็งที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกนี้คาดว่าเนื่องจากการตกผลึกของอนุภาคที่มีทองแดงผสมอยู่ในปริมาณสูง เมื่อเพิ่มเวลาของการอบบ่มมากขึ้น อนุภาคที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักนี้ จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้นการทำให้เกิดเฟสเป็นเนื้อเดียวกันจึงเป็นผลดีต่อสมบัติของโลหะเงินมากที่สุด จึงได้มีการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการป้องกันการตกผลึกของทองแดงในลักษณะดังกล่าว โดยอาศัยการวัดการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุในสภาวะอบบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยศึกษาถึงสภาวะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและการตกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเทอร์โมไดนามิกและจากการตรวจสอบเฟสในชิ้นงานก่อนการอบบ่มด้วยเทคนิค XRD, SEM และ EDS สามารถยืนยันการเกิดนิวเคลียสของผลึกที่มีปริมาณทองแดงสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 μ m เกิดขึ้นในเฟสหลักซึ่งเป็นเงิน นิวเคลียสดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นแบบมีเนื้อสม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มเวลาในการอบบ่มมากขึ้น ผลึกดังกล่าวนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการแพร่มารวมตัวกันของทองแดงซึ่งผสมอยู่ในเนื้อโลหะเงินซึ่งเป็นเฟสหลัก ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับการผสมโลหะออกไซด์ (metal oxide) เช่น CdO, SnO₂ และ ZnO ในโครงสร้างหลักของเงิน (Herman, 2008) พบว่าออกซิเจน (O) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเงินจะเคลื่อนที่มารวมตัวกันด้วยกลไกการแพร่ โดยอาศัยทั้งการแพร่ตามแนวแลตทิซของเงิน รวมถึงแพร่ตามความบกพร่อง (defect) ของผลึก โดยในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ออกซิเจนจะแพร่ผ่านโครงสร้างเงินโดยกลไกการแพร่แบบแทรกที่ (interstitial mechanism) ผ่านบริเวณที่มีความต้านทานการแพร่ต่ำ เช่น รอยต่อเกรน (grain boundary) และบริเวณผิวอิสระ (free surface) ในขณะที่การแพร่ใน

สภาวะอุณหภูมิสูง อะตอมของออกซิเจนจะแพร่ออกไปสู่ระนาบที่มีดัชนีต่ำลง (low indexed planes) ดังนั้นในสภาวะนี้อะตอมของออกซิเจนจะสามารถแพร่เข้าไปแทนที่ (substitute) ในตำแหน่งของอะตอมของเงินได้ ในกระบวนการแพร่แบบหลังนี้จะเกิดโครงสร้างเป็นลักษณะชั้นๆ (lamellar microstructure) ในโครงสร้างหลักของเงินได้ โดยโลหะผสมในระบบ Ag-4wt%Er พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน (anneal) ตั้งแต่ 400-700°C ในอากาศ จะเกิดโครงสร้างแบบเป็นชั้นๆ ดังกล่าวนี้นี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบอ่อนวัสดุในระบบนี้ไม่ควรเกิน 300°C ในการศึกษาเงินผสมในระบบ Ag-Pd-In-Sn เพื่อวัสดุทางทันตกรรม (Guo, 2003) พบโครงสร้างขนาดเล็กลักษณะเป็นชั้นๆ เกิดขึ้นในโลหะหลังการหล่อเช่นเดียวกัน และหลังจากการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน พบว่าโครงสร้างนี้มีการตกผลึกใหม่เป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ความแข็งของโลหะผสมเพิ่มขึ้น

2.6.4 การปรับปรุงสมบัติด้านการหมองของโลหะเงินผสม

โลหะผสมเงินมีคุณสมบัติที่คล้ายกับโลหะผสมทั่วไป เช่น ทองเหลือง บรอนซ์ และทองกระรัตต่ำ (8-10 กระรัต) คือสามารถเกิดปัญหาเนื่องจากความหมองและจุดดำดำเหมือนการเกิดสนิมเนื่องจากโลหะเงินเกิดออกไซด์ได้ง่ายโดยการสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ซึ่งจะทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลหรือเฉดสีต่าง ๆ เช่น น้ำเงิน เหลือง เขียว และดำขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งการเกิดการหมองในโลหะเจือนี้เกิดจากกระบวนการที่ซับซ้อนจากปัจจัยทางเคมีและฟิสิกส์ ยากที่จะระบุได้แน่นอน แต่ปัจจัยหนึ่งที่แน่นอนในการเกิดปฏิกิริยานี้ คือมีความสัมพันธ์กับสารเคมีที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน ซึ่งเกี่ยวเนื่องอย่างมากกับสภาพแวดล้อมในเขตอุตสาหกรรมและเขตเมือง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าปัจจุบันยังไม่สามารถค้นพบวิธีที่จะป้องกันการเกิดการหมองได้อย่างสมบูรณ์ แต่การประสบความสำเร็จในการพัฒนาโลหะผสมเงินที่มีสมบัติพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถต่อการต้านทานการหมองโดยการเจือด้วย Ge ในเงินสเตอร์ลิง เป็นโลหะผสมในระบบ Ag-Cu-Ge ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Argentium[®] ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่าเป็นโลหะผสมเงินที่สามารถต้านทานการหมองได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมเงินในระบบอื่นๆ (Grimwade, 2009) (Basso, 2010) โดยธาตุเจือดังกล่าวนี้มีความสามารถในการดูดซับออกซิเจนได้ดีกว่าทองแดงและเงิน ทั้งในสภาวะของเหลวขณะหล่อและในสภาวะของแข็งในชิ้นงานหลังหล่อ โดย Ge จะสามารถละลายอยู่ทั้งในเฟส Ag-rich และ Cu-rich โดยเกิดเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ (intermetallic) ของ Cu₅Ge กระจายตัวอยู่ในสารละลายของแข็งในเฟสที่มีทองแดงสูง ในขณะที่เดียวกันสามารถเกิดเป็นชั้นฟิล์มป้องกัน (passivation film) ของ GeO_x ซึ่งเป็นฟิล์มบางใสและมีความหนาในระดับนาโนเมตรปกคลุมบริเวณผิวของโลหะผสม (Johns, 1997) จากการศึกษาถึงความสามารถในการต้านทานการหมองโดยพิจารณาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) พบว่า Cu, Zn และ Sn สามารถเกิดเป็นชั้นออกไซด์บริเวณผิวโลหะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีบริเวณพื้นผิวโลหะ ในขณะที่ Ge, Si และ B จะเกิดชั้นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและชั้นออกไซด์ดังกล่าวนี้จะไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในสภาวะร่วมกับ H₂S นอกจากนี้จากการทดลองคุณสมบัติด้านการต้านทานการหมองยืนยันว่าออกไซด์เจือมาเนียมที่เกิดบนผิวของโลหะ Argentium[®] นี้สามารถป้องกันการหมองได้ดีที่สุด (Davis, 2007) และจากการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงพบว่าเงินสเตอร์ลิงโดยทั่วไปมีความแข็งต่ำ คือ

ประมาณ 60 HV การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนด้วยการการตกตะกอนหรือการบ่มแข็ง (Precipitation hardening หรือ Age-hardening) โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 750-760°C เวลา 30 นาที และการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที สามารถเพิ่มค่าความแข็งของโลหะดังกล่าว ให้มีเป็นประมาณ 120 HV (Grimwade, 1991) สาเหตุของการหมองในเงินเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของ โลหะกับก๊าซที่อยู่ในบรรยากาศ เกิดการกัดกร่อนขึ้นเป็นฟิล์มออกไซด์บริเวณผิวของโลหะ ชั้นฟิล์มนี้มีความหนาประมาณ 10-20 นาโนเมตร (Frey, 2003) ซึ่งนอกจากในโลหะเงินแล้ว การหมองยังสามารถเกิดในโลหะทองแดง ทองเหลืองและอะลูมิเนียม ได้เช่นกัน แต่ในโลหะเงินผสมนั้น ออกไซด์จะอยู่ในรูปของสารประกอบคลอไรด์ สารประกอบซัลไฟด์และซัลเฟอไรด์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) เป็นต้น งานวิจัยเกี่ยวกับการกันหมองและการกัดกร่อนของเงินในระบบ Ag-Pd และ Ag-Cu (Joska, 2005) (Zaky, 2006) ยืนยันการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อโลหะผสมอยู่ภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบสำหรับการป้องกันการหมองในโลหะผสมเงินที่ใช้เป็นเครื่องประดับนั้น ปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การชุบด้วยโลหะเงินบริสุทธิ์ การชุบด้วยโรเดียม (Rd) การเคลือบสารเคมีกันหมอง และการพัฒนาโลหะผสมของเงิน เป็นต้น

งานวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการหมองนั้นส่วนมากนิยมใช้การเคลือบป้องกันการหมอง ดังนั้นจึงมีวิธีการในการป้องกันการหมองหลากหลาย เช่น มีการพัฒนาระบบการเคลือบด้วย plasmopolymer (Frey, 2003) เพื่อใช้ในการผลิตเงินในการทำเครื่องประดับขึ้นในประเทศเยอรมัน พบว่าชั้นฟิล์มที่เคลือบบนตัวเรือนเครื่องประดับนั้น สามารถป้องกันการหมองได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถป้องกันการขีดข่วนที่เกิดขึ้นตอนการบรรจุได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการป้องกันการหมองด้วยการเคลือบด้วยฟิล์มของ poly (amino-triazole) และ hexadecane-thiol (Bernard, 2005) โดยการใช้กระบวนการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี การวิเคราะห์ฟิล์มที่เคลือบโดยการวัดการสะท้อนแสง และการทดสอบด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่าฟิล์มที่เกิดมีลักษณะใส ไม่มีสี แต่ฟิล์มของ thiol จะมีการหลุดลอกได้ง่ายเมื่อโดนความร้อนจากการทดลองหล่อโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Al, Ag-Cu-Al และ Ag-Cu-Al-Si-Mg ในห้องปฏิบัติการหล่อโลหะ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา พบว่าโลหะอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความแข็งให้กับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงได้ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้เป็นเพียงการทดลองเบื้องต้นเพื่อต้องการทราบความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้แก่โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง จึงจำเป็นต้องมีการทดลองหาส่วนผสมและสภาวะที่เหมาะสมกับการหล่อและกระบวนการบ่มแข็งต่อไป การวิจัยและพัฒนาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงเพื่อให้มีความแข็งแรงเพียงพอและเหมาะสมสำหรับการฝังแบบไร้หมาก โดยความร่วมมือจาก 3 ภาคส่วนคือ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ร่วมกับผู้ผลิตเครื่องประดับเงินซึ่งเป็นผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม จึงเป็นโครงการที่ควรได้รับการสนับสนุนเนื่องจากความจำเป็นและต้องการวัสดุที่มีส่วนผสมเฉพาะที่มีความแข็งแรง สามารถยึดจับเม็ดพลอยได้ดี และสามารถนำงานวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์ได้จริงในภาคการผลิตสำหรับการฝังไร้หมาก งานวิจัยดังกล่าวนี้จึงนอกจากจะเป็นการส่งเสริมองค์ความรู้พื้นฐานทางโลหะวิทยาสำหรับเครื่องประดับและสร้างองค์ความรู้ใหม่ๆ แล้ว คณะผู้วิจัยยังคาดหวังให้เกิดการสร้างเครือข่ายเพื่อการวิจัยและพัฒนา

ศักยภาพทั้งทางวิชาการและนำผลงานจากการวิจัยเผยแพร่สู่ภายนอก เพื่อส่งเสริมการพัฒนา
อุตสาหกรรมเครื่องประดับทั้งในประเทศไทยและระดับนานาชาติอีกด้วย

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นงานในการหล่อ

การทดลองการหล่อโลหะเงินผสมเพื่อการฝังไร้หมาม มีขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. ออกแบบชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $10 \times 10 \times 3$ มม. และชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 6871 จากนั้นนำแบบยางไปฉีดเทียนแล้วแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อย จากรูปที่ 3.1 (1)

2. นำชิ้นงานที่แต่งเสร็จแล้วไปติดต้นเทียน โดยการใช้หัวแร้งให้ความร้อนเพื่อเชื่อมชิ้นงานกับต้นโดยนำต้นเทียนจะเสียบอยู่กับฐานยาง จากรูปที่ 3.1 (2)

3. นำฐานยางที่มีต้นเทียนครอบด้วยกระบอกล่อ ปิดด้วยพลาสติกห่อแล้วรัดด้วยหนังยางเพื่อไม่ให้ปูนไหลออก จากรูปที่ 3.1 (3)

4. ผสมปูนกับน้ำตามอัตราส่วนของผู้ผลิตปูน ใช้ปูน 100 กรัม ต่อ น้ำ 40 มิลลิลิตร การทดลองนี้ใช้ปูน 600 กรัม ต้องใช้น้ำ 240 มิลลิลิตร เมื่อผสมแล้วนำไปดูฟองอากาศออก ประมาณ 2 นาที พร้อมกับเปิดระบบการสั่น เพื่อให้ฟองอากาศลอยตัวขึ้นที่ผิวหน้าของน้ำปูน จากนั้นเทปูนลงในกระบอกล่อสำหรับหล่อ นำกระบอกล่อไปดูฟองอากาศออกใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที โดยไม่ต้องเขย่า ทั้งปูนให้แข็งตัวประมาณ 1-2 ชั่วโมง แกะฐานยางออกก่อนนำเข้าเตาอบเผา



รูปที่ 3.1 การเตรียมชิ้นงาน 1.) ชิ้นงานที่ 2.) ต้นเทียน และ 3.) นำกระบอกล่อปูนครอบฐานยาง

5. จากนั้นเทปูนโดยวนรอบๆต้นเทียนโดนไม่ให้โดนต้นเทียนเพื่อป้องกันไม่ให้ต้นเทียนหัก โดยผสมปูนเสร็จควรนำมาเทในกระบอกล่อก่อนที่ปูนจะแห้ง นำไปดูฟองอากาศ ด้วยเครื่องดูอากาศ ประมาณ 2 นาที โดยเปิดเครื่องสั่น เพื่อให้ฟองอากาศหลุดออกมา

6. ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อปูนแห้งพอปูนแห้งแล้วแกะฐานยางออกจากกระบอกล่อ

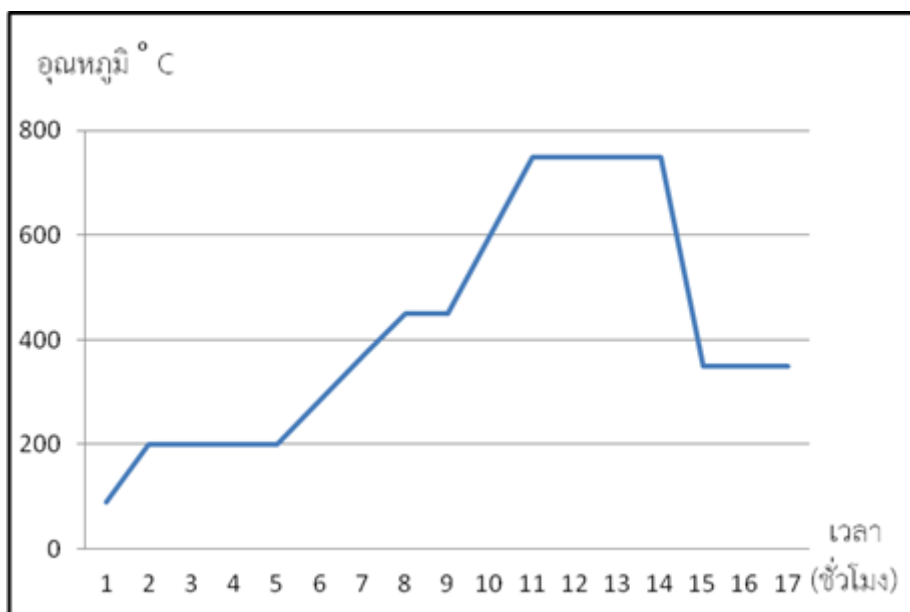
7. จากนั้นนำกระบอกล่อไปเข้าเตาอบโดยตั้งอุณหภูมิในการอบเผาปูนดังนี้

- ปรับระดับอุณหภูมิ ชั่วโมงแรกให้อุณหภูมิ 90°C ใช้เวลา 5 นาที จากอุณหภูมิห้อง เพื่อไล่ความชื้นจากปูน

- เพิ่มเป็น 200°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเย็นอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง เพื่อละลายเทียนออกจาก

เผา

- หมด ชั่วโมง
- เพิ่มอุณหภูมิเป็น 450°C 3 ชั่วโมงแล้วเย็นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เทียนเผาไหม้ออกจนหมด
 - เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 750°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เพื่อให้ปูนสุกแล้วเย็นอุณหภูมิไว้อีก 3 ชั่วโมง
 - ลดอุณหภูมิเป็น 650°C เพื่อเป็นอุณหภูมิเข้าที่พร้อมสำหรับการหล่อ จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปขั้นตอนการเย็นอุณหภูมิของการอบเข้าปูน

3.2 การหล่อด้วยกระบวนการสุญญากาศ

1. ส่วนผสมของการทดลองหล่อด้วยระบบสุญญากาศโดยมีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง

รหัสชิ้นงาน	องค์ประกอบเคมี (%โดยน้ำหนัก)				
	Ag	Cu	Al	Si	Mg
AgCu	93	7	-	-	-
AgAl	93	-	7	-	-
Ag0.5AlMg	93	6.5	0.5*		
Ag1.0AlMg	93	6.0	1.0*		
Ag1.5AlMg	93	5.5	1.5*		
Ag0.5Al	93	6.5	0.5	-	-
Ag1.0Al	93	6.0	1.0	-	-

Ag1.5Al	93	5.5	1.5	-	-
---------	----	-----	-----	---	---

หมายเหตุ *อะลูมิเนียมผสม A356 (Al-7Si-0.3Mg)

ขั้นตอนการคำนวณโลหะ

1. ชั่งน้ำหนักฐานยางก่อนติดต้นเทียน แล้วจากนั้นจตน้ำหนักฐานยาง
2. ชั่งน้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียนแล้ว โดย น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน - น้ำหนักฐานยาง
3. คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของโลหะที่จะใช้ (ค่าความถ่วงจำเพาะของเงิน 10.53)
4. คำนวณน้ำหนักโลหะ = (ถ.พ.ของโลหะ x น้ำหนักของต้นเทียน)
5. เพื่อน้ำหนักของโลหะ 10 wt% = (ถ.พ.ของโลหะ x น้ำหนักของต้นเทียน) x 10/100
6. น้ำหนักโลหะทั้งหมด = (ถ.พ.ของโลหะ x น้ำหนักของต้นเทียน) + (ถ.พ.ของโลหะ x น้ำหนักของต้นเทียน) x 10/100

ตัวอย่างการคำนวณหาโลหะผสมในชิ้นงานจริง

$$\begin{aligned}
 &1. \text{ องค์ประกอบ Ag 93 wt\%, Cu 6.5 wt\% และ Al(A356) 0.5 wt\%} \\
 &\text{น้ำหนักต้นเทียน} = (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\
 &= (184.85 - 179.59) = 5.26 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)} \\
 &\text{น้ำหนักโลหะ} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน}) \\
 &= (10.53 \times 5.26) = 55.39 \\
 &\text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 10wt\%} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 10/100 \\
 &= (10.53 \times 5.26) \times 10/100 = 111.54
 \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93 wt%, Cu 6.5 wt% และ Al(A356) 0.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93 \times 55.39}{100} = 103.73 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 55.39}{100} = 7.25 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

$$\text{Al} = \frac{0.5 \times 55.39}{100} = 0.56 \text{ กรัม น้ำหนัก Al A356}$$

$$\begin{aligned}
 &2. \text{ องค์ประกอบ Ag 93 wt\%, Cu 6 wt\% และ Al(A356) 1 wt\%} \\
 &\text{น้ำหนักต้นเทียน} = (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\
 &= (171.93 - 166.78) = 5.15 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)} \\
 &\text{น้ำหนักโลหะ} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน}) \\
 &= (10.53 \times 5.15) = 54.22 \\
 &\text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 10wt\%} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 10/100 \\
 &= (10.53 \times 5.15) \times 10/100 = 109
 \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93 wt%, Cu 6 wt% และ Al(A356) 1 wt% ที่จะนำไป

หล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93 \times 54.22}{100} = 101.37 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6 \times 54.22}{100} = 6.54 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

$$\text{Al} = \frac{1 \times 54.22}{100} = 1.09 \text{ กรัม น้ำหนัก Al A356}$$

3. องค์ประกอบ Ag 93 wt% ,Cu 5.5 wt% และ Al(A356) 1.5 wt%

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักต้นเทียน} &= (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\ &= (180.46 - 175.23) = 5.23 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะ} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน}) \\ &= (10.53 \times 5.23) = 55.07 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 10wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 10/100 \\ &= (10.53 \times 5.23) \times 10/100 = 109.8 \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93 wt% , Cu 6 wt% และ Al(A356) 1 wt% ที่จะนำไป

หล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93 \times 55.07}{100} = 102.11 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{5.5 \times 55.07}{100} = 6.04 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

$$\text{Al} = \frac{1.5 \times 55.07}{100} = 1.65 \text{ กรัม น้ำหนัก Al A356}$$

7. ชั่งโลหะตามน้ำหนักที่คำนวณได้

8. การหล่อโลหะด้วยเครื่องหล่อสูญญากาศยี่ห้อ INDUTHERM รุ่น CV-400 กระบวนการหล่อเปิดเครื่องทำความเย็นทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นก็เปิดเครื่องหล่อแล้วตั้งอุณหภูมิในการหล่อที่ 1100°C เมื่ออุณหภูมิถึงประมาณ 800°C นำโลหะเงิน,ทองแดงและอลูมิเนียม(A356) ที่ชั่งไว้ใส่ลงในเบ้าแกรไฟต์ เพื่อจะหลอมโลหะทั้งสามให้ละลายเข้ากัน เมื่อหลอมละลายแล้วจึงใช้แท่งเหล็กคนให้เข้ากัน จากนั้นคืบนำเบ้าปูนที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 300°C ออกมาแล้วใส่ลงในกระบอบอกเครื่องหล่อ

9. จากนั้นเมื่อโลหะละลายหมดแล้วจึงกดปุ่มเทน้ำโลหะ ลงไปยังเบ้าแกรไฟต์

10. เมื่อหล่อเสร็จแล้วทิ้งเบ้าปูนไว้ 5 นาที จากนั้นนำเบ้าปูนที่ทิ้งไว้ไปเขย่าในถังน้ำที่เตรียมไว้จนปูนหลุดออกหมด

11. จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำความสะอาดให้เรียบร้อย

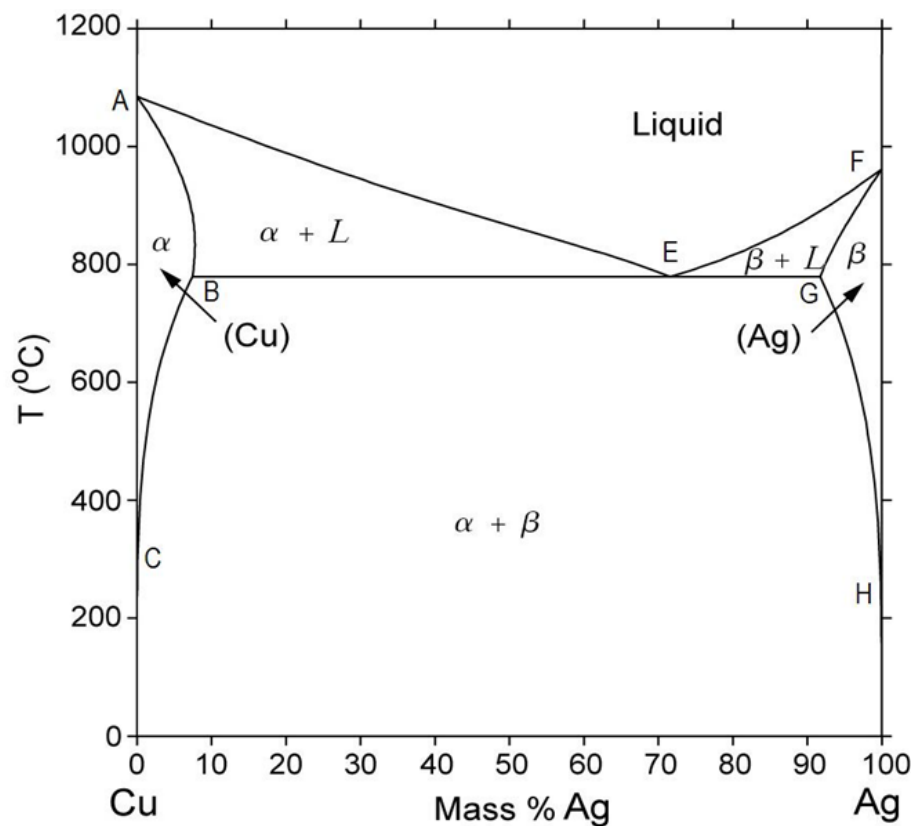
12. จากนั้นตัดชิ้นงานออกจากต้น และนำไปแต่งให้ได้ขนาด $10 \times 10 \times 3$ มม. จากนั้นชิ้นงานไปบ่มแข็ง ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็งในขั้นต่อไป จากรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัดชิ้นงานออกจากต้น

3.3 การบ่มแข็ง

1. นำชิ้นงานที่หล่อทุกองค์ประกอบมาแบ่งอย่างละ 5 ตัวอย่าง
2. นำชิ้นงาน 3 ตัวอย่างไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็ง
3. นำชิ้นงาน 12 ตัวอย่างไปทำการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิห้องจากนั้นนำไปบ่มความแข็งใช้อุณหภูมิในการบ่มแข็งที่ อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิห้องจากนั้นจึงนำไปศึกษาโครงสร้างและความแข็งเป็นขั้นต่อไป โยการบ่มแข็งจะดูที่เฟสไดอะแกรม Ag-Cu



รูปที่ 3.4 เฟสไดอะแกรมที่มีส่วนผสมของเงินและทองแดงเพื่อใช้เลือกอุณหภูมิในการอบละลายเฟสและบ่มแข็ง

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย Inductively Couple Plasma (ICP) และ Potentiometric Titration

1. นำชิ้นงานหลังหล่อส่งสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยการหาปริมาณธาตุ อะลูมิเนียม ทองแดง ซิลิกอน และ แมกนีเซียม จะใช้เทคนิค ICP โดยใช้น้ำหนักโลหะในการวิเคราะห์ประมาณ 0.1-0.2 กรัม

2. กรณีหาปริมาณองค์ประกอบเคมีของโลหะเงินใช้เทคนิค Potentiometric Titration โดยใช้น้ำหนักโลหะในการวิเคราะห์ประมาณ 1.5 กรัม



รูปที่ 3.5 1) เครื่อง Inductively couple plasma (ICP) และ 2) เครื่อง Auto titration (สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ, 2018)

3.5 ตรวจสอบองค์ประกอบของเฟสด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

นำชิ้นงานหลังหล่อไปตรวจหาเฟสด้วยเครื่อง XRD ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ใช้เครื่อง XRD รุ่น X'pert ผู้ผลิต Philips แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ เป็น $\text{Cu K}\alpha$ มุม 2θ ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง $20-130^\circ$ ขนาดตัวอย่าง 10×10 มม.

3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

1. นำชิ้นงานที่ทำการบ่มแข็งแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่หยาบที่สุด ไปจนถึงละเอียดที่สุด ตามลำดับดังนี้ 180 600 และ 1000

2. จากนั้นนำชิ้นงานที่ขัดกระดาษทรายเบอร์ 1000 เสร็จแล้ว นำมาขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เพื่อลบรอยขีดจากกระดาษทราย จนผิวชิ้นงานมีความมันวาวจากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างและความแข็งเป็นขั้นต่อไป



รูปที่ 3.6 ขัดชิ้นงาน 1) ขัดกระดาษทราย และ 2) ขัดผ้าสักหลาด

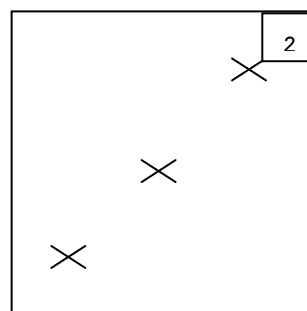
3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคแบบใช้แสง

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงาทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อกำจัดคราบไขมันที่ติดอยู่บนผิวหน้าชิ้นงาน จากนั้นนำไปกัดด้วยกรดซัลฟิวริก 1 มิลลิตร และกรดโครมิก 1 กรัม ผสมด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิตร โดยกัดชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 2-3 วินาที ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 4-5 วินาที จากนั้นล้างทำความสะอาดกรดออกให้หมด

2. เมื่อกัดกรดเสร็จก็นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดนใช้กำลังขยายที่ 5X และ 20X ปรับให้ภาพชัดเจน จากนั้นจึงถ่ายภาพโครงสร้าง

3.8 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวจนเรียบ มาทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ ESEWAY รุ่น 400 series แสดงดังรูปที่ 3.7 (1) ใช้น้ำหนักกด 200 กรัม เวลากด 10 วินาที โดยมีการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ชิ้นงานละ 5 ครั้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.16 (2)



รูปที่ 3.7 การทดสอบความแข็ง 1) เครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ และ
2) ตำแหน่งการกด 5 ตำแหน่ง

3.9 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงาน (EDS)

นำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งของทุกๆองค์ประกอบ ทั้ง 11 ชิ้นงาน ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 ชั่วโมง เพื่อนำมาถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) โดยใช้กำลังขยายในการถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000X จากนั้นจึงนำโครงสร้างจุลภาคที่เราสนใจ ไปวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงาน (EDS) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของโลหะเงินสเตอร์ลิงในพื้นที่ที่สนใจ



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM รุ่น Tabletop Microscope TM3030Plus

3.10 การทดสอบแรงดึง

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 6871 ปลายทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร และ ขนาดพื้นที่ดึงเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 มิลลิเมตร

2. การทดสอบแรงดึงจะใช้เครื่องทดสอบ รุ่น Instron 5566 ผู้ผลิต Instron Ltd. ที่คณะทันตแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล

3. สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยกำหนดอัตราเร่ง 2 มิลลิเมตร ต่อ นาที ใช้ Load Cell 10 KN



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Instron 5566 ผู้ผลิต Instron Ltd.

3.11 การทดสอบการหมองและการวัดสี

การเตรียมสารละลายทดสอบการหมอง โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เข้มข้น 0.1% ใช้ปริมาณ 1.875 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในขวด Flask 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มในสารละลาย เป็นเวลา 1 3 5 และ 9 ชั่วโมง โดยแยกชิ้นงานใส่แต่ละขวด หลังจากทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบการหมอง

การวัดค่า L^* a^* b^* คือ L^* แทนค่าสำหรับความสว่างถ้าหากชิ้นงานมีค่าความสว่างมากค่าตัวเลขในการวัดชิ้นงานจะมีค่าเป็นบวกและมีตัวเลขที่มาก หากว่าค่าความสว่างมีน้อยตัวเลขในการวัดผลก็จะมีค่าที่เข้าใกล้กับศูนย์ ส่วน a^* เป็นการแทนค่าของสีแดงและสีเขียว คือ หากตัวเลขมีค่าติดลบ แสดงว่าสีของชิ้นงานมีสีที่ออกไปทางสีน้ำเขียว แต่ถ้าหากว่าค่าของตัวเลขมีค่าที่เป็นไปในทางบวก แสดงว่าสีของชิ้นงานออกไปทางสีแดง และ b^* เป็นการแทนค่าของสีเหลืองและสีน้ำเงิน คือ หากตัวเลขมีค่าติดลบสีของชิ้นงานจะออกไปทางสีน้ำเงิน แต่ถ้าหากตัวเลขมีค่าเป็นบวกสีของชิ้นงานจะออกไปทางสีเหลือง ในการแสดงค่า a^* และ b^* เป็นผลกราฟ a^* แทนแกน X และ b^* แทนแกน Y การใช้เครื่อง Konica Minolta 700d วัดค่าสีและความสว่าง ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดสี Konica Minolta 700d

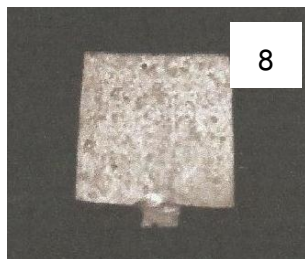
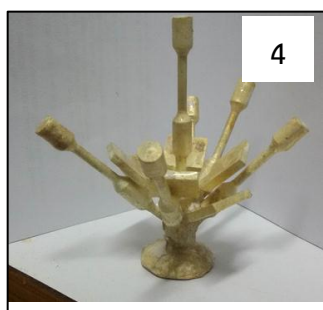
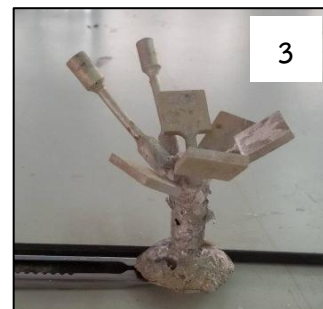
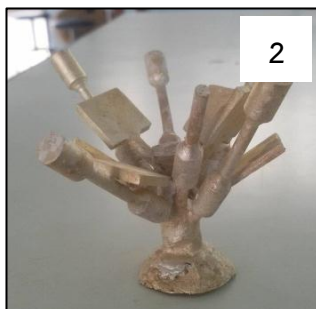
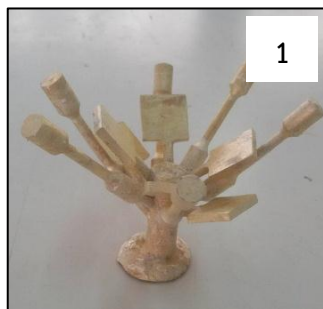
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อสุญญากาศ

หลังจากหล่อชิ้นงานด้วยกระบวนการสุญญากาศดังรูปที่ 4.1 (1) - 4.1 (3) พบว่าต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag0.5AlMg (93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356)) เมื่อหล่อเสร็จสีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองเหลือเศษโลหะติดเบา 4.37 g. ส่วนต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag1.0AlMg (93%Ag-6%Cu-1%Al (A356)) เมื่อหล่อเสร็จแล้วมีสีของต้นโลหะเป็นออกสีเหลืองเช่นเดียวกัน แต่มีความเข้มของสีเหลืองน้อยกว่าต้นโลหะที่ใส่ Cu1.5% เพียงเล็กน้อยเหลือเศษโลหะติดเบา 3.98 g. และต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag1.5AlMg (93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356)) เมื่อหล่อเสร็จมีสีของต้นชิ้นงานเป็นสีเทา มีสีเหลืองบนเล็กน้อยเหลือเศษโลหะติดเบา 4.25 g. ในการหล่อต้นโลหะที่ผสม Cu 6.5% ต้นโลหะไม่เต็มแบบ เกิดปัญหาเนื่องจากเครื่องหล่อสุญญากาศมีปัญหา จากสีของต้นโลหะหลังหล่อทำให้สรุปได้ว่าการเติมโลหะผสมลงไปโลหะเงิน ส่งผลต่อสีของชิ้นงานโลหะ โดยต้นโลหะที่มีสีเหลืองเข้มที่สุด เป็นต้นโลหะที่เติม Cu6.5% และสีเหลืองอ่อนรองลงมาคือต้นโลหะที่เติม Cu6% ต้นโลหะที่เติม Cu5.5% จะพบว่าต้นโลหะมีความเหลืองน้อยที่สุด จะมีสีออกเป็นสีเทาเพราะมี Al มากที่สุดอยู่ที่ 1.5%

ชิ้นงานหลังหล่อ รูปที่ 4.1 (4) - 4.1 (6) พบว่าต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag0.5Al (93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al) เมื่อหล่อเสร็จสีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองเข้มเหลือเศษโลหะติดเบา 1.97 g. ส่วนต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag1.0Al (93%Ag-6%Cu-1%Al) เมื่อหล่อเสร็จแล้วมีสีของต้นโลหะเป็นออกสีเหลืองเช่นเดียวกัน แต่มีความเข้มของสีเหลืองน้อยกว่าต้นโลหะที่ใส่ Cu1.5% เพียงเล็กน้อยเหลือเศษโลหะติดเบา 3.05 g. และต้นโลหะรหัสชิ้นงาน Ag0.5Al (93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al) เมื่อหล่อเสร็จมีสีของต้นชิ้นงานเป็นสีเหลืองเช่นเดียวกันแต่มีความเหลืองน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอีกสององค์ประกอบและมีสีเทาบนเล็กน้อยเศษโลหะติดเบา 5.07 g. จากสีของต้นโลหะหลังหล่อทำให้สรุปได้ว่าการเติมโลหะผสมลงไปโลหะเงิน ส่งผลต่อสีของชิ้นงานโลหะ โดยต้นโลหะที่มีสีเหลืองเข้มที่สุด เป็นต้น

ชิ้นงานหลังหล่อ รูปที่ 4.1 (7) เป็นชิ้นงานที่มีส่วนผสมระหว่างเงินและทองแดงตามมาตรฐานเงินสเตอร์ลิงซึ่งสีโลหะจะหมองเล็กน้อยจากที่โลหะสัมผัสกับอากาศ จากรูปที่ 4.1 (8) เป็นชิ้นงานที่ผสมระหว่างเงินและอะลูมิเนียม สีที่พบด้วยตาเปล่าจะขาวเงาว่าผสมทองแดง นอกจากนี้ จากการสังเกตด้วยตาพบว่าชิ้นงานหล่อทุกชิ้นค่อนข้างสมบูรณ์ พบตามดแบบฟองอากาศอยู่โดยทั่วไป



รูปที่ 4.1 รูปชิ้นงานหลังหล่อ 1) Ag0.5AlMg , 2) Ag1.0AlMg , 3) Ag1.5AlMg , 4) Ag0.5Al , 5) Ag1.0Al , 6) Ag1.5Al , 7) AgCu และ 8) AgAl

4.2 การหาองค์ประกอบเคมีด้วย ICP และ Titration

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของทุกตัวอย่างหลังหล่อด้วยวิธี ICP และ Titration แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบก่อนหล่อและหลังหล่อ

ชิ้นงาน	องค์ประกอบเคมีก่อนหล่อ (%โดยน้ำหนัก)					องค์ประกอบเคมีหลังหล่อ (%โดยน้ำหนัก)				
	Ag	Cu	Al	Si	Mg	Ag	Cu	Al	Si	Mg
AgAl	93	-	7	-	-	93.19	-	6.57	-	-
Ag0.5AlMg	93	6.5	0.46	0.035	0.0015	93.88	6.46	0.39	0.03	N.D.
Ag1.0AlMg	93	6.0	0.93	0.07	0.003	93.66	6.17	0.77	0.06	N.D.
Ag1.5AlMg	93	5.5	1.39	0.11	0.0045	93.53	5.43	1.17	0.07	N.D.
Ag0.5Al	93	6.5	0.5	-	-	93.05	6.67	0.47	-	-
Ag1.0Al	93	6.0	1.0	-	-	93.19	6.20	0.99	-	-
Ag1.5Al	93	5.5	1.5	-	-	94.53	6.39	1.59	-	-

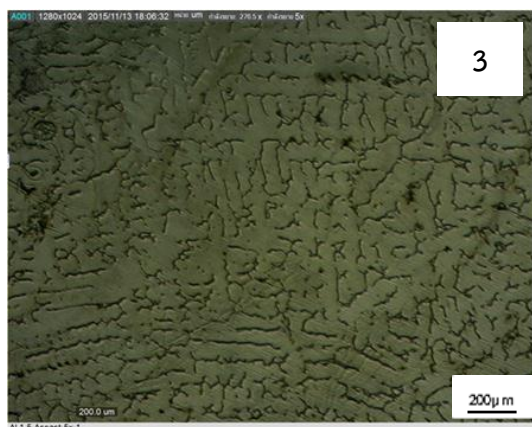
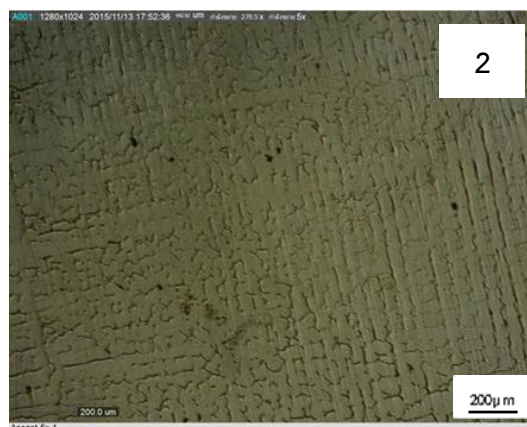
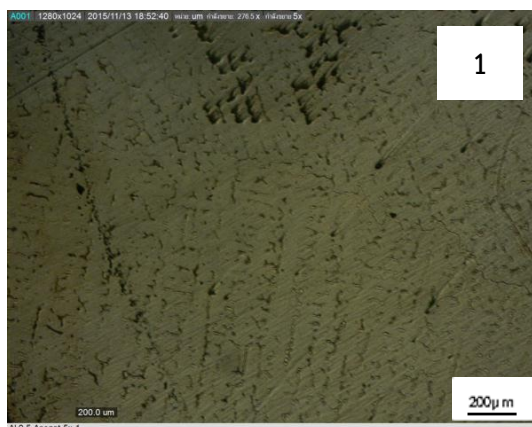
N.D. Not detected

จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังหล่อพบว่าปริมาณซิลิกอนในโลหะผสมเงิน อะลูมิเนียม ซิลิกอนหลังหล่อต่ำกว่าตอนผสมเนื่องจากซิลิกอนอาจไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับโลหะเงิน

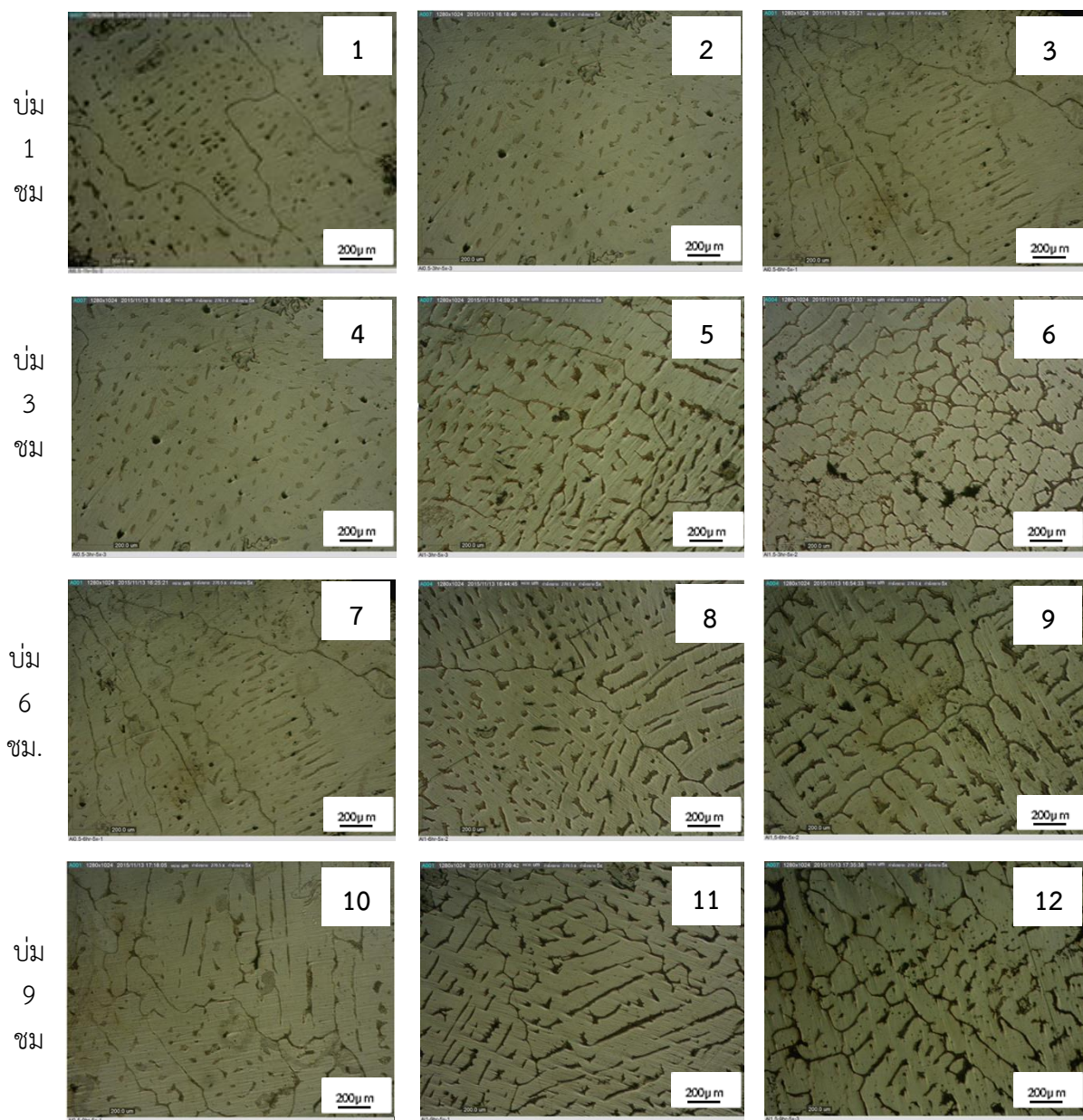
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าโครงสร้างชิ้นงานหลังหล่อด้วยกระบวนการสุญญากาศทุกองค์ประกอบมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่มี (จากรูปที่ 4.2) ลักษณะโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) พบว่าขาหลักของเดนไดรต์มีขนาดขาที่ใหญ่กว่าอีกสององค์ประกอบ และพบว่ามียูเทคติกกรอบเดนไดรต์อยู่ตามช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ โครงสร้างหลังหล่อโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) เดนไดรต์มีลักษณะที่ยาวและเล็กแล้วยังพบว่ามีเฟสที่อยู่เทคติกกรอบเดนไดรต์ ส่วนโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356) พบว่าลักษณะของเดนไดรต์มีขาค่อนข้างสั้นและมีขนาดขาของเดนไดรต์ที่ใหญ่กว่าอีกสององค์ประกอบ โดยรอบๆเดนไดรต์พบยูเทคติกหลังจากหล่อชิ้นงานแล้ว พบได้ว่าทั้งสามองค์ประกอบจะพบลักษณะโครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์ในทุกๆ องค์ประกอบ และทุกๆองค์ประกอบยังพบได้ว่าเดนไดรต์จะมีเฟสยูเทคติกล้อมรอบเดนไดรต์ ถ้าสังเกตโครงสร้างหลังหล่อจะพบได้ว่าเดนไดรต์ขององค์ประกอบทั้งสามจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป จากการใช้โปรแกรมอิมเมจในการคำนวณเฟสและยูเทคติกโครงสร้างโลหะผสม องค์ประกอบ 93%Ag-

6.5%Cu-0.5%Al (356) พบเฟสเงินที่เป็นส่วนผสมหลัก 94.1% เฟสยูเทคติก 0.69% องค์กรประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (356) พบเฟสเงินที่เป็นส่วนผสมหลัก 84.8% เฟสยูเทคติก 1.62% และ องค์กรประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356) พบเฟสเงินที่เป็นส่วนผสมหลัก 75% เฟสยูเทคติก 25% จากเปอร์เซ็นต์ของทั้งสามองค์กรประกอบจะพบได้ว่าองค์กรประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356) มีเปอร์เซ็นต์ของเฟสยูเทคติกมากที่สุดอยู่ที่ 25% ซึ่งองค์กรประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356) เป็นองค์กรประกอบที่มีการเติม Al (A356) มากที่สุด ซึ่งในการคำนวณเปอร์เซ็นต์โปรแกรมอิมเมจ เจ ทำให้ทราบได้ว่าในการเติม Al(A356) ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ของยูเทคติกมีมากขึ้นถ้าเมื่อเติม Al(A356) จากเปอร์เซ็นต์จะเห็นได้ว่าจำนวนเฟสยูเทคติกจะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของ Al (A356) ที่เพิ่มมากขึ้น องค์กรประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) เฟสยูเทคติก 0.69% องค์กรประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (356) เฟสยูเทคติก 1.62% และ องค์กรประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (356) เฟสยูเทคติก 25% ตามลำดับ



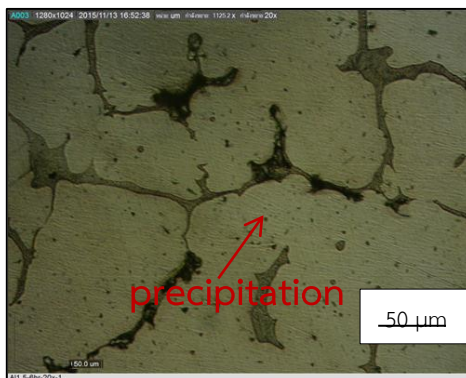
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม (A356) หลังหล่อ 1) 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) และ 3) 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 5X หลังหล่อ



93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) 93%Ag-6.5%Cu-1.0%Al(A356) 93%Ag-6.5%Cu-1.5%Al(A356)

รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม(A356) 3 องค์ประกอบหลังอบละลายเฟสที่ 750°C และบ่มแข็งที่ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 5X

จากการศึกษาโครงสร้างที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง พบว่าไม่เกิดลักษณะโครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์ (จากรูปที่ 4.3) โดยในโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปมีลักษณะเกรนที่คล้ายคลึงกันหลังผ่านการบ่มแข็งทุกเวลาในการบ่มแข็ง กล่าวคือโครงสร้างที่ได้มีลักษณะเกรนที่มีขนาดใหญ่ จะประกอบด้วยเฟสอัลฟาของเงินเป็นเฟสหลัก (Ag-rich phase) และพบเฟสยูเทคติก (Eutectic phase) ในเกรนพบได้ว่าจะมีการเกิดตะกอนขนาดเล็ก (precipitation) กระจายตัวอยู่ทั่วเกรนของชิ้นงานเกรนขององค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) หลังบ่มทุกเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง พบว่ามีเฟสยูเทคติกกระจายอยู่ในเฟสหลัก ส่วนโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) พบว่ามีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) ในทุกเวลาหลังบ่มแข็ง 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าในเฟสอัลฟาของเงินเป็นเฟสหลัก (Ag-rich phase) ขององค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) จะมีการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกที่มากกว่าองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) และยังพบได้ว่าในเกรนจะมีการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็ก (precipitation) เช่นเดียวกันกับองค์ประกอบแรก ส่วนโครงสร้าง 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) จะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างไปจากสององค์ประกอบที่ได้กล่าวมา โดยโครงสร้างจะมีลักษณะที่ค่อนข้างกลมแต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เป็น 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง ตามลำดับ เกรน 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) จะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปมากขึ้นคือเกรนที่มีลักษณะค่อนข้างกลมในช่วงเวลา 1 และ 3 ชั่วโมงแรกเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งที่เพิ่มมากขึ้นในช่วง 6 และ 9 ชั่วโมง เกรนขององค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) จากเกรนที่มีลักษณะที่ค่อนข้างกลมในช่วงเวลาแรกที่ 1 และ 3 ชั่วโมง จะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจากการสังเกตเกรนของโลหะ จะมีลักษณะที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งและยังพบการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็ก (precipitation) จากโครงสร้างของทั้งสามองค์ประกอบจะพบได้ว่าจะมีการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็กในทุกๆ องค์ประกอบ (รูปที่ 4.3) โครงสร้างของชิ้นงานที่มี Al (A356) มากที่สุดอยู่ 1.5% จะพบว่ามีตามมดอยู่ในโครงสร้างมากที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นงานที่เติม Al (A356) ที่ 1% และแทบไม่พบตามดเลย คือชิ้นงานที่เติม Al (A356) 0.5% ตามดที่เกิดขึ้นเกิดจากอลูมิเนียมที่ผสมลงไป เพราะอลูมิเนียมจะดูดซับเอาก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนไว้ทันที การเทน้ำโลหะให้เกิดการไหลวนและการไหลของน้ำโลหะไปตามทางเข้าก็จะช่วยให้น้ำโลหะทำปฏิกิริยากับก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงทำให้มีตามดเกิดขึ้น

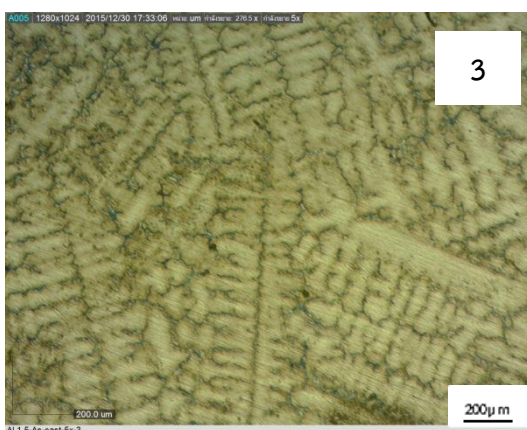
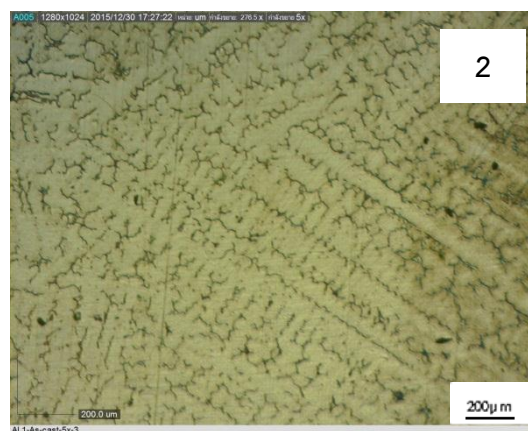
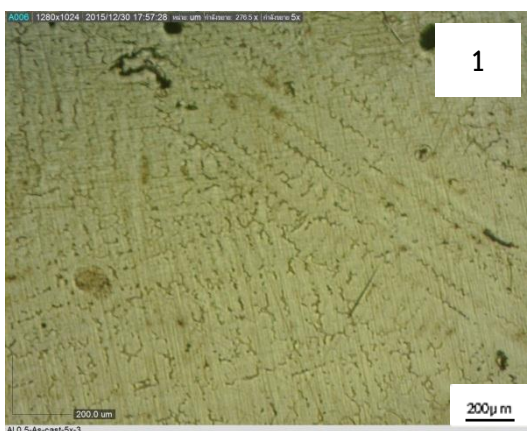


รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็ก(precipitation) ทั่วเกรน กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20X

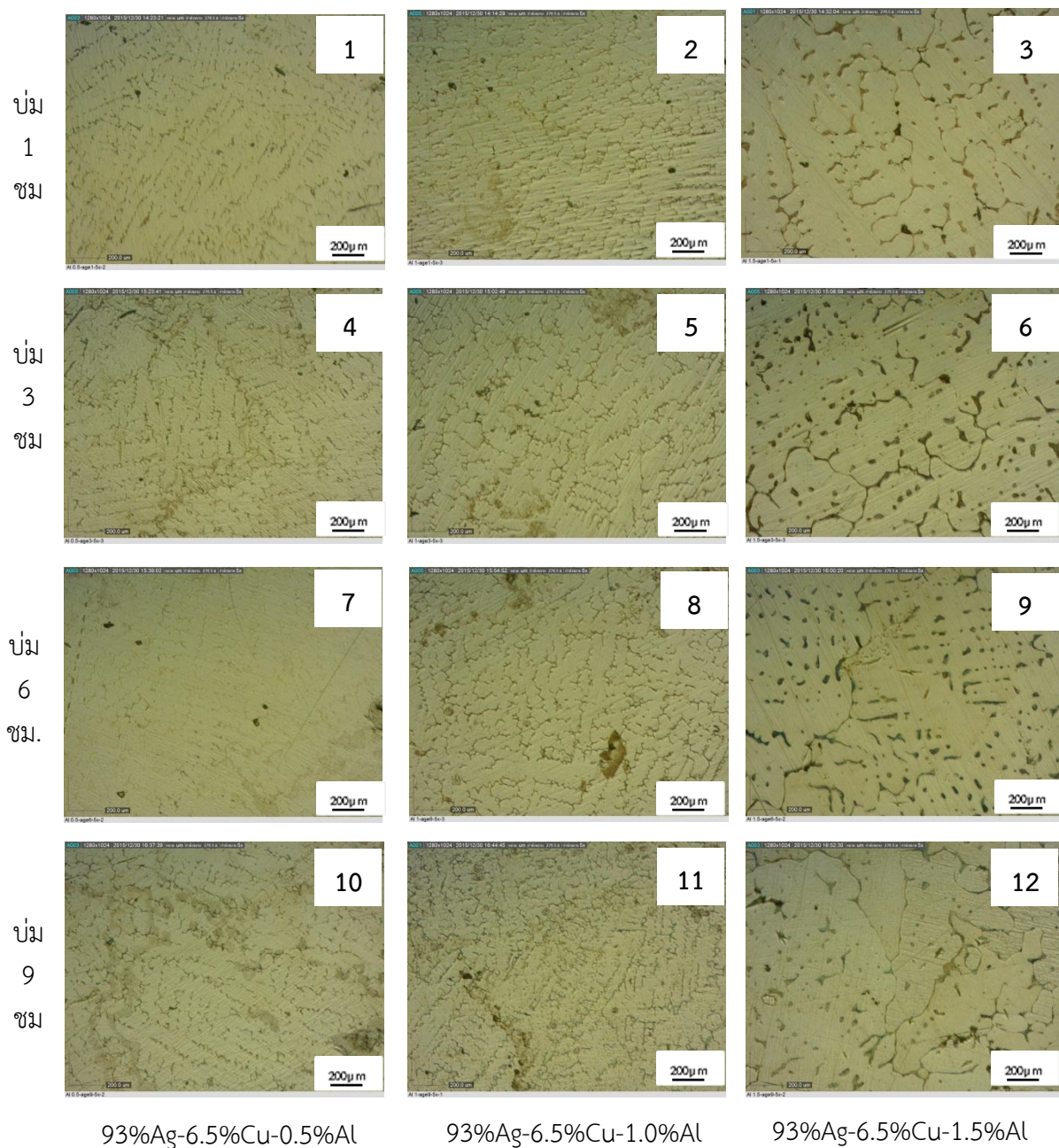
ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าโครงสร้างชิ้นงานหลังหล่อด้วยกระบวนการสูญญากาศทุกองค์ประกอบมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่มี (รูปที่ 4.5) ลักษณะโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al พบว่าขาหลักของเดนไดรต์มีขนาดขาที่ค่อนข้างเล็กและพบมียูเทคติกกรอมรอบเดนไดรต์อยู่ตามช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เป็นจำนวนที่ไม่มาก โครงสร้างหลังหล่อโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al เดนไดรต์มีลักษณะที่ยาวและใหญ่แล้วยังพบว่ามีเฟสที่ยูเทคติกกรอมรอบเดนไดรต์ ส่วนโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al พบว่ากิ่งที่แตกออกมาจากขาหลักของเดนไดรต์มีลักษณะกิ่งที่ใหญ่ และพบว่ารอบๆเดนไดรต์มีเฟสยูเทคติกเป็นจำนวนมากอย่างเห็นได้ชัด จากชิ้นงานหลังหล่อสิ่งที่สังเกตเห็นได้คือ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมจะพบลักษณะเป็นเดนไดรต์ทุกองค์ประกอบ และพบเฟสยูเทคติกอีกด้วย

ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าโครงสร้างชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง โครงสร้างของชิ้นงานการบ่มแข็งทุกอุณหภูมิจะพบเฟสยูเทคติก(Eutectic phase) ล้อมรอบเฟสหลัก (Ag-rich phase) ลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al พบว่าลักษณะโครงสร้างทุกอุณหภูมิในการบ่มแข็ง มีลักษณะที่คล้ายครั้งกับเดนไดรต์และพบเฟสยูเทคติกล้อมรอบกับเกรน (จากรูปที่ 4.6) จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างของ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al บ่มที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 6 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทคติกที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการบ่มแข็งที่เวลา 1 3 และ 9 ชั่วโมง ในองค์ประกอบเดียวกัน ลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al พบว่าโครงสร้างทุกชั่วโมงในการบ่มแข็งมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายครั้งเดนไดรต์เช่นเดียวกับ องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al แต่จะพบได้ว่าโครงสร้างของ 93%Ag-6%Cu-1%Al จะมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างมนกว่า (รูปที่ 4.6) จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่อุณหภูมิ 9 ชั่วโมง จะมีการกระจายตัวของตะกอนเล็กๆ (precipitation) เป็นจำนวนมากอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.7) โดยตะกอนที่กระจายตัวทั่วเกรนจะมีลักษณะที่รียาว ลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al พบว่าลักษณะโครงสร้าง

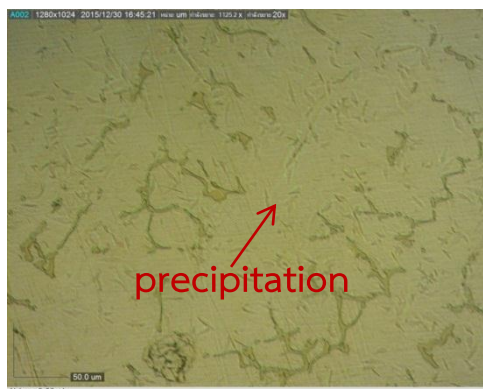
ทุกๆอุณหภูมิในการบ่มแข็ง มีลักษณะที่คล้ายครั่งกันในทุกๆการบ่มแข็ง โดยโครงสร้างมีขนาดใหญ่และพบการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกทั่วเฟสหลัก



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียมหลังหล่อ 1) 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 3) 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Alที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 5X หลังหล่อ

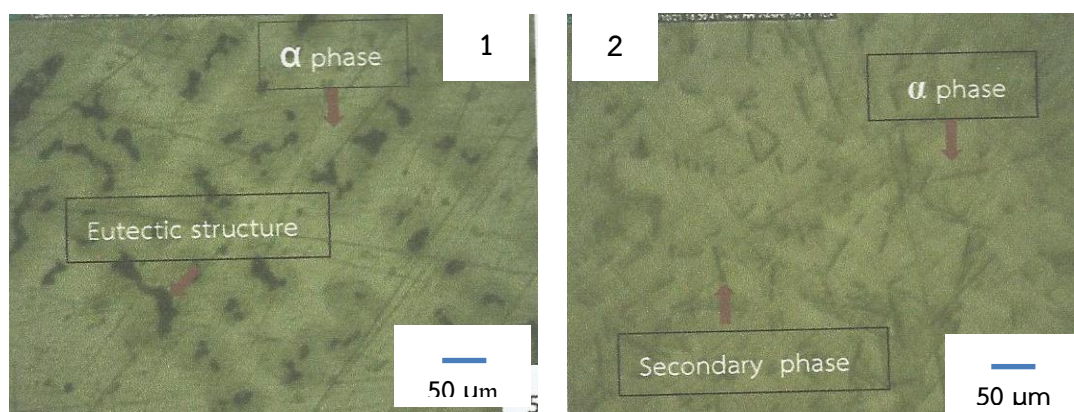


รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม 3 องค์ประกอบหลังอบละลายเฟสที่ 750°C และบ่มแข็งที่ 300°C เป็นเวลา 1 3 5 และ 9 ชั่วโมง ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 5X



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของ 93%Ag-6%Cu-1%Al ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่อุณหภูมิ 9 ชั่วโมง จะพบ การกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็ก(precipitation)ทั่วเกรน กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20

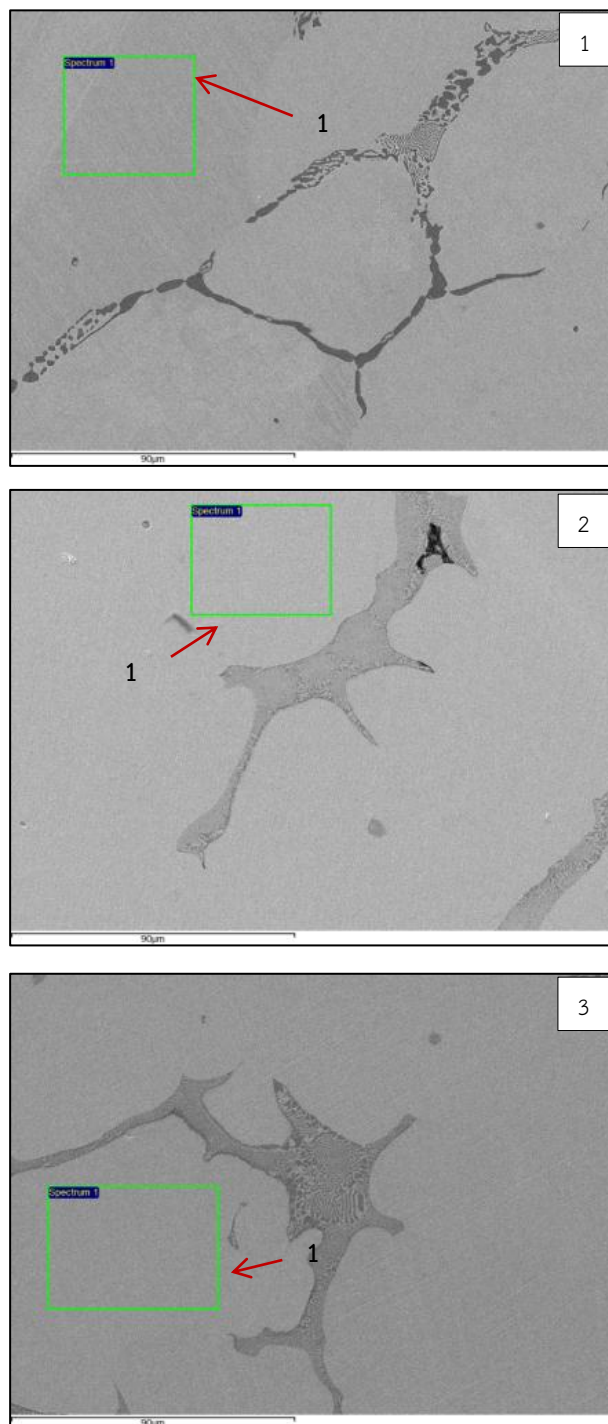
ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ของโลหะผสมสำหรับอ้างอิงพบว่าโครงสร้างชิ้นงานหล่อด้วยกระบวนการสูญญากาศทุกๆองค์ประกอบ (รูปที่ 4.8) มีลักษณะโครงสร้างโลหะผสม 93Ag-7Cu พบว่าขาหลักของเดนไดรต์และพบมียูเทคติกล้อมรอบเดนไดรต์อยู่ตามช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เป็นจำนวนที่ไม่มาก โครงสร้างหล่อโลหะผสม 93Ag-7Al พบเฟสที่แตกต่างไปจากเดนไดรต์และยูเทคติก มีลักษณะเป็นแท่งสี่ด้านกระจายตัวในโครงสร้างหลักของเงิน จากการใช้โปรแกรมอิมเมจในการคำนวณเฟสและยูเทคติกโครงสร้างโลหะผสม องค์ประกอบ 93Ag-7Cu พบเฟสหลัก 87.3% และโลหะผสมองค์ประกอบ 93Ag-7Al พบมีเปอร์เซ็นต์ของเฟสหลักอยู่ 97.7%



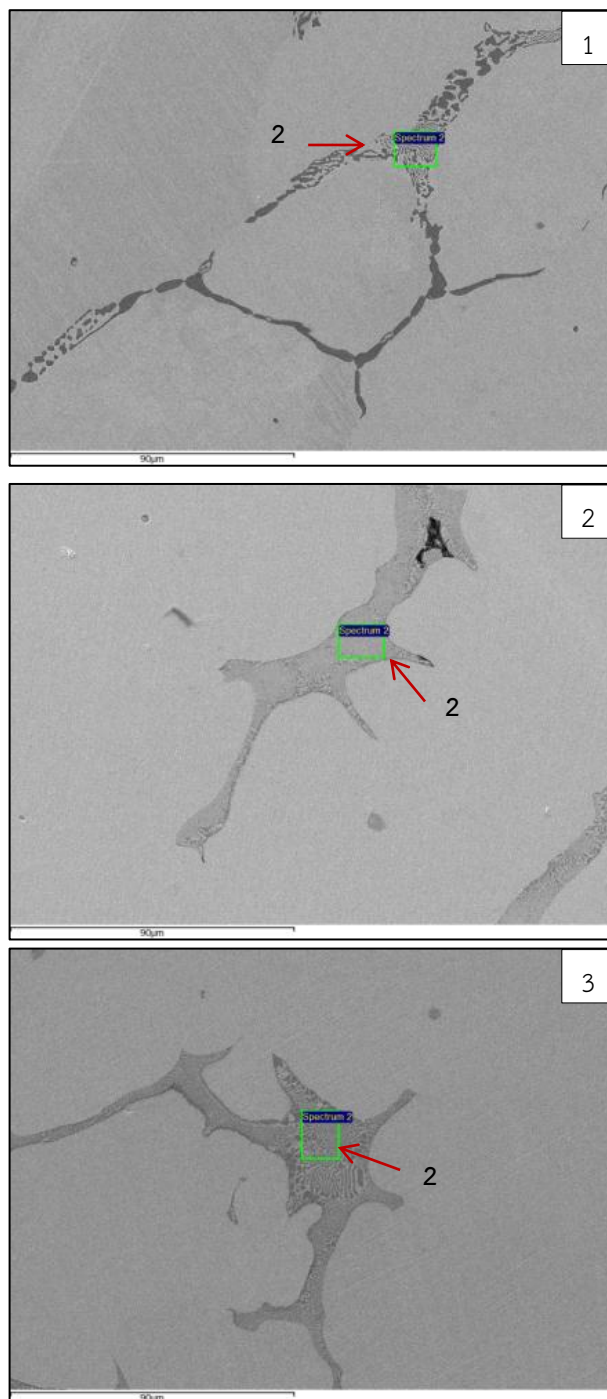
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างของโลหะเงินผสมสำหรับอ้างอิง 1) 93%Ag-7%Cu 2) 93%Ag-7%Al ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20X หลังหล่อ

4.4 โครงสร้างจุลภาคแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการตรวจวัดองค์ประกอบเคมีด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงาน (EDS)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 ชั่วโมง ของทั้งสามองค์ประกอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000X ดัง(รูปที่ 4.9) เมื่อทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 ในการทดลองได้วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) รูปที่ 4.9 (1) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้นที่มีเฟสของเงินเป็นส่วนผสมหลัก (α -rich phase) ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 93.026 ธาตุทองแดงร้อยละ 6.129 และธาตุแมกนีเซียมร้อยละ 0.335 โดยน้ำหนัก และตำแหน่งที่ เป็นบริเวณเฟสยูเทคติก รูปที่ 4.9 (1) ตำแหน่งที่ 2 ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 72.440 ธาตุทองแดงร้อยละ 23.138 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 0.768 และธาตุซิลิกอนร้อยละ 0.270 โดยน้ำหนัก สำหรับส่วนผสมทางเคมีองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) รูปที่ 4.9 (2) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้นที่มีเฟสของเงินเป็นส่วนผสมหลัก (α -rich phase) ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 92.152 ธาตุทองแดงร้อยละ 6.823 และธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 0.516 โดยน้ำหนัก และตำแหน่งที่ เป็นบริเวณเฟสยูเทคติก รูปที่ 4.10 (2) ตำแหน่งที่ 2 ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 57.146 ธาตุทองแดงร้อยละ 36.140 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 2.588 และธาตุซิลิกอนร้อยละ 0.450 โดยน้ำหนัก และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) รูปที่ 4.10 (3) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้นที่มีเฟสของเงินเป็นส่วนผสมหลัก(α -rich phase) ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 92.037 ธาตุทองแดงร้อยละ 6.458 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 0.823 และธาตุแมกนีเซียมร้อยละ 0.225 โดยน้ำหนัก และตำแหน่งที่ เป็นบริเวณเฟสยูเทคติก รูปที่ 4.10 (3) ตำแหน่งที่ 2 ประกอบด้วยธาตุเงินร้อยละ 52.252 ธาตุทองแดงร้อยละ 39.603 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 3.208 และธาตุซิลิกอนร้อยละ 0.484 โดยน้ำหนัก จากการวัดค่าความแข็งของทั้งสามองค์ประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าความแข็งที่แข็งที่สุดอยู่ที่องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) โดยการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่าส่วนผสมทางเคมีธาตุทองแดงมีปริมาณที่มากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 6.823 โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) มีความแข็งที่สุดในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินเป็นส่วนผสมหลัก(α -rich phase) ตำแหน่งที่ 1 หลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 1) 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 3) 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)

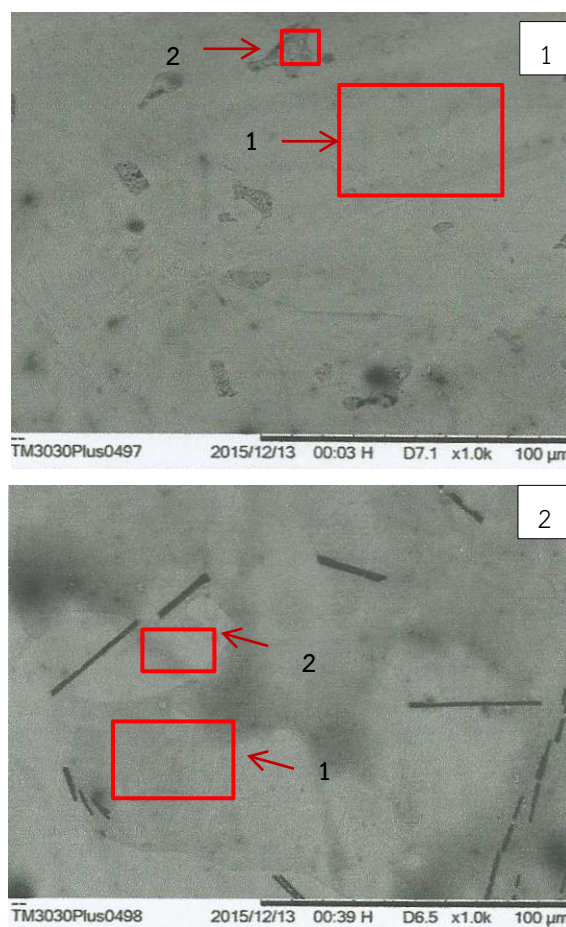


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเฟสยูเทคติก (Eutectic) ตำแหน่งที่ 2 หลังผ่านการ บ่มแข็งที่ อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 1) 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) 2) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 3) 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของพื้นที่ที่มีเฟสของเงินเป็นส่วนผสมหลัก (α -rich phase) ตำแหน่งที่ 1 และ ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณเฟสยูเทคติก (Eutectic) ตำแหน่งที่ 2 ของทั้งสามองค์ประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

องค์ประกอบ	ตำแหน่ง	Ag	Cu	Al	Mg	Si
93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356)	ตำแหน่งที่ 1	93.026	6.129	-	0.335	-
	ตำแหน่งที่ 2	72.440	23.138	0.768	-	0.270
93%Ag-6%Cu-1%Al(A356)	ตำแหน่งที่ 1	92.152	6.823	0.516	-	-
	ตำแหน่งที่ 2	57.146	36.140	2.588	-	0.450
93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(356)	ตำแหน่งที่ 1	92.037	6.458	0.823	0.252	-
	ตำแหน่งที่ 2	52.252	39.603	3.208	-	0.484

จากโลหะผสมอ้างอิง 93%Ag-7.0%Cu พบโครงสร้างเดนไดรต์ และ ยูเทคติกเฟส ซึ่งองค์ประกอบเคมี สูงกว่าก่อนหล่อเนื่องจากการละลายของโลหะอาจไม่สม่ำเสมอ และ โลหะผสมอ้างอิง 93%Ag-7.0%Al ที่ผสมอะลูมิเนียม ตัวอย่างนี้จะพบลักษณะของเฟสที่มีรูปร่างเป็นเส้นสีดำที่พบในการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แต่เบื้องต้นไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีได้เนื่องจากขนาดของลำอิเล็กตรอนของ EDS มีขนาดใหญ่กว่าเฟสที่พบ ควรใช้เทคนิคอื่นในการวิเคราะห์หาโครงสร้างอย่าง TEM องค์ประกอบเคมีของเงินในตัวอย่างนี้สูงกว่าก่อนหล่อซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับตัวอย่าง 93%Ag-7.0%Cu



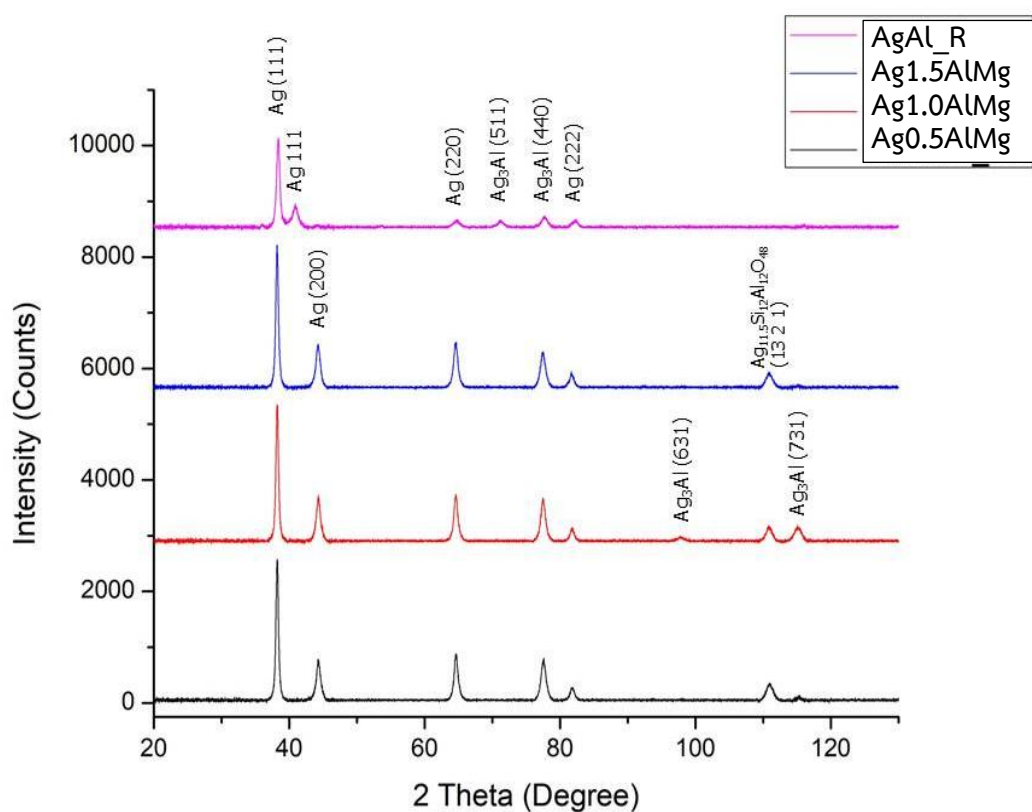
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของ 1) 93%Ag-7.0%Cu และ 2) 93%Ag-7.0%Al หลังหล่อ และ วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของ 93%Ag-7.0%Cu และ 93%Ag-7.0%Al ตำแหน่งที่ 1 และ 2 บริเวณเฟสหลัก และ เฟสยูเทคติก

องค์ประกอบ	ตำแหน่ง	Ag	Cu	Al
93%Ag-7.0%Cu	ตำแหน่งที่ 1	95.539	4.461	-
	ตำแหน่งที่ 2	94.978	5.022	-
93%Ag-7.0%Al	ตำแหน่งที่ 1	94.921	-	5.079
	ตำแหน่งที่ 2	95.866	-	4.134

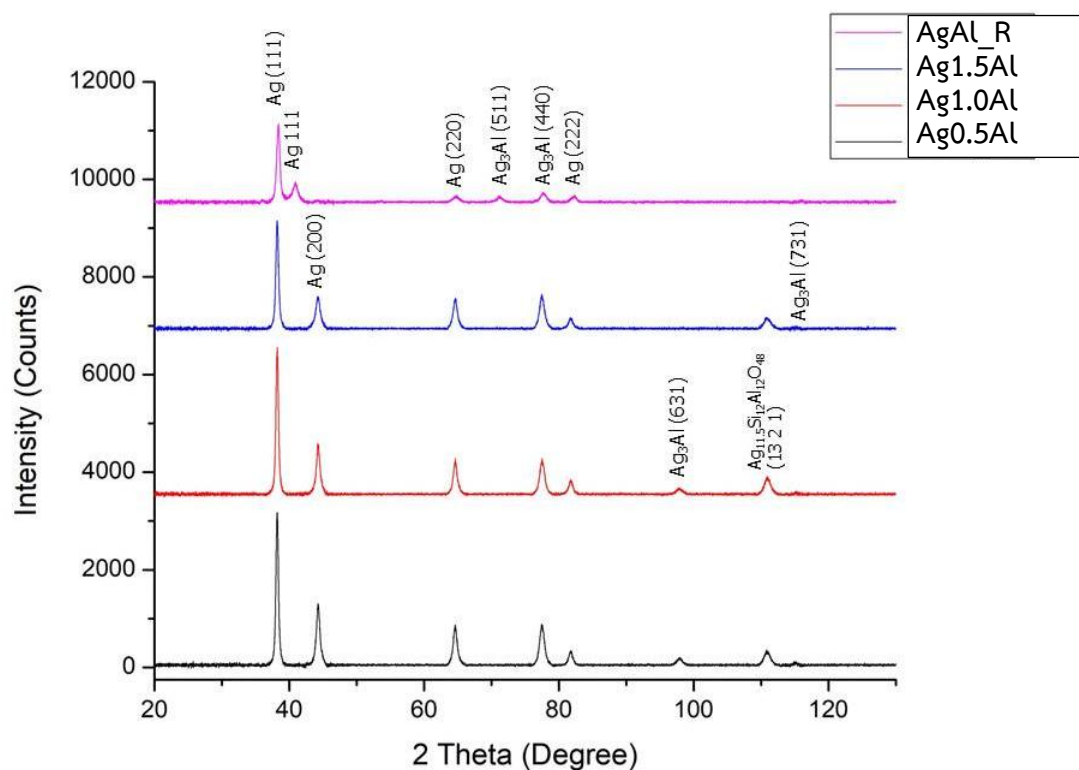
4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

จากผลการวิเคราะห์ XRD โลหะผสมหลังหล่อของ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356), 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) แสดงดังรูปที่ 4.12 พบเฟสของเงิน ในระนาบ (111) (200) (220) และ (222) ของโลหะเงินผสม A356 ทั้งสามองค์ประกอบ และพบในโลหะผสมอ้างอิง AgAl และพบเฟสสารประกอบ Intermetallic ของ Ag_3Al ในโลหะผสมทั้งสามองค์ประกอบ เทียบกับโลหะอ้างอิง โลหะผสมที่เติม Al A356 พบเฟสสารประกอบ Intermetallic $Ag_{11.5}Si_{12}Al_{12}O_{48}$ ที่ตำแหน่ง 110 องศา ซึ่งโลหะที่เติมมีผลต่อการเกิดตะกอนหลังการบ่มแข็ง



รูปที่ 4.12 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานหล่อ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356), 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)

93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al, 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al แสดงดังรูปที่ 4.13 พบเฟสของเงิน ในระนาบ (111) (200) (220) และ (222) ของโลหะเงินผสม A356 ทั้งสามองค์ประกอบ และพบในโลหะผสมอ้างอิง AgAl และพบเฟสสารประกอบ Intermetallic ของ Ag_3Al ในโลหะผสมทั้งสามองค์ประกอบเทียบกับโลหะอ้างอิง โลหะผสมที่เติม Al พบเฟสสารประกอบ Intermetallic $Ag_{11.5}Si_{12}Al_{12}O$ ซึ่งโลหะที่เติมมีผลต่อการเกิดตะกอนหลังการบ่มแข็ง



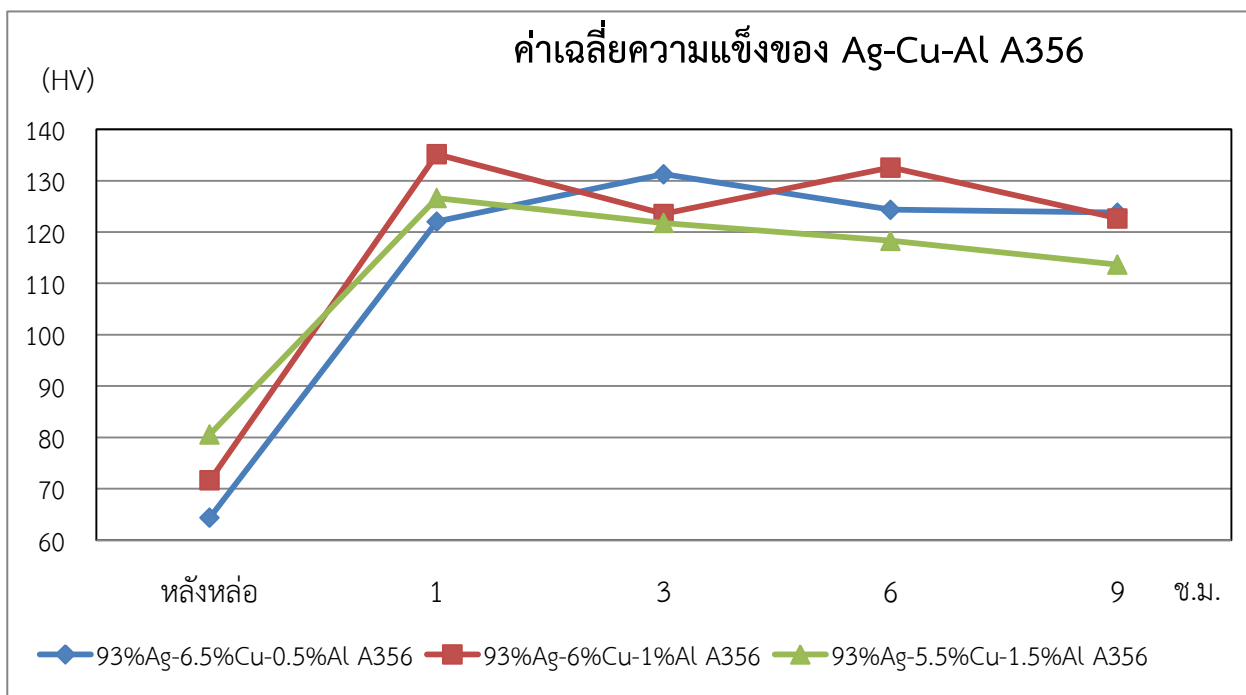
รูปที่ 4.13 แสดงผล XRD ของชิ้นงานหลังหล่อ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al, 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al

4.6 ผลการทดสอบความแข็งจุลภาค

จากการทดสอบความแข็งจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม (A356) (ตารางที่ 4.4) พบว่าความแข็งขององค์ประกอบหลังหล่อ ที่มีความแข็งสูงสุดจะเป็นองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) เป็นองค์ประกอบที่เติม Al (A356) มากที่สุด 1.5% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 80.58 วิกเกอร์ รองลงมาคือองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) ที่เติม Al (A356) ที่ 1% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 71.63 วิกเกอร์ ส่วนความแข็งของโลหะผสมหลังหล่อที่ต่ำ คือโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) ที่เติม Al(A356) ที่ 0.5% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 64.39 วิกเกอร์ หลังจากบ่มแข็งชิ้นงานโลหะความแข็งของโลหะผสมทั้ง 3 องค์ประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) มีความแข็งหลังบ่มแข็งสูงสุดอยู่ที่ เวลาบ่ม 3 ชั่วโมง โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 131.26 วิกเกอร์ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาบ่มแข็งความแข็งจะลดต่ำลง ส่วนโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) มีความแข็งสูงสุดหลังบ่ม 1 ชั่วโมง โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 135.16 วิกเกอร์ โดยเป็นความแข็งที่สูงที่สุดของการทดลอง ส่วนโลหะผสม 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356) มีความแข็งสูงสุดหลังการบ่มแข็งที่เวลา 1 ชั่วโมง โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 122.04 วิกเกอร์ หลังจากเพิ่มเวลาในการบ่มแข็ง ความแข็งขององค์ประกอบที่เติม Al(A356) 1.5% มีความแข็งที่ลดต่ำลงเมื่อเพื่อเวลาในการบ่ม (รูปที่ 4.13) ทำให้พบว่าเมื่อบ่มเป็นเวลา 9 ชั่วโมงขึ้นไปความแข็งของทั้ง 3 องค์ประกอบจะมีความแข็งที่ลดลง

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม (A356)

เวลา (ชั่วโมง)	ความแข็งเฉลี่ย (HV)		
	93%Ag-6.5% Cu-0.5%Al(A356)	93%Ag-6% Cu-1%Al(A356)	93%Ag-5.5% Cu-1.5%Al(A356)
หลังหล่อ	64.39	71.63	80.58
1	122.04	135.16	126.61
3	131.26	123.53	121.76
6	124.36	132.59	118.31
9	123.8	122.68	113.67



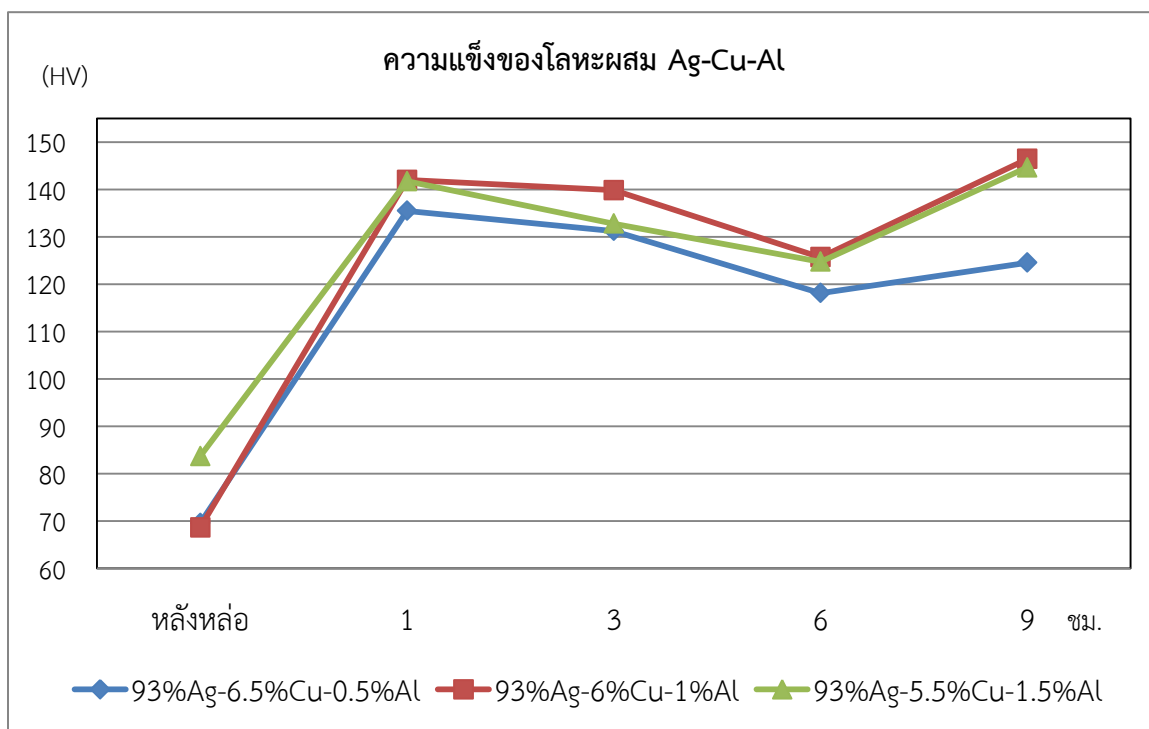
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al (A356) 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al (A356)

จากการทดสอบความแข็งจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม (ตารางที่ 4.5) พบว่าความแข็งขององค์ประกอบหลังหล่อ ที่มีความแข็งสูงสุดจะเป็นองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al เป็นองค์ประกอบที่เติม Al มากที่สุด 1.5% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 83.67 วิกเกอร์ รองลงมาคือองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al ที่เติม Al ที่ 0.5% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 69.57 วิกเกอร์ ส่วนความแข็งของโลหะผสมหลังหล่อที่ต่ำ คือโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al ที่เติม Al ที่ 1% โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 68.6 วิกเกอร์ หลังจากบ่มแข็งชิ้นงานโลหะความแข็งของโลหะผสมทั้ง 3 องค์ประกอบชิ้นงาน ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 1 ชั่วโมง องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al มีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน คือ 141.97 วิกเกอร์ และ 141.7 วิกเกอร์ ตามลำดับ ส่วนความแข็งที่ต่ำที่สุดในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิที่ 1 ชั่วโมงคือ องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al โดยมีความแข็งอยู่ที่ 135.47 วิกเกอร์ ส่วนความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง มีความแข็งจุลภาคที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al แข็งที่ 131.2 วิกเกอร์ 93%Ag-6%Cu-1%Al แข็งที่ 139.8 วิกเกอร์ และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al แข็งที่ 132.77 วิกเกอร์ ส่วนความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al เป็นองค์ประกอบที่มีความแข็งต่ำที่สุดจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 6 ชั่วโมง ส่วนอีกสององค์ประกอบคือ 93%Ag-6%Cu-1%Al และ

93%Ag-5.5% Cu-1.5%Al มีความแข็งที่ใกล้เคียงกันคือ 125.67 วิกเกอร์ และ 124.73 วิกเกอร์ ตามลำดับ ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al เป็นองค์ประกอบที่มีความแข็งต่ำที่สุดจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 9 ชั่วโมง ส่วนอีกสององค์ประกอบคือ 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al มีความแข็งที่ใกล้เคียงกันคือ 146.4 วิกเกอร์ และ 144.63 วิกเกอร์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.3) จากกราฟจะพบว่าชิ้นหลังหล่อชิ้นงานที่มีความแข็งที่สุดคือ องค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al โดยมีความแข็งอยู่ที่ 83.67 วิกเกอร์ เมื่อบ่มแข็งชิ้นงานที่ 1 ชั่วโมง จะสังเกตได้ว่าความแข็งของชิ้นงานจะมีความแข็งที่เพิ่มมากขึ้น หลังจากชิ้นงานผ่านการบ่ม 1 ชั่วโมง จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าความแข็งจะลดต่ำลงที่เวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มเวลาบ่มแข็งขึ้นไปอีกเป็น 6 ชั่วโมง จะสังเกตได้ว่าความแข็งของชิ้นงานจะมีความที่ลดต่ำลงมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งเป็น 9 ชั่วโมง ปรากฏว่าความแข็งของทุกๆ องค์ประกอบกลับมีความแข็งที่เพิ่มขึ้นมาก อย่างไม่เห็นได้ชัดเจน โดยความแข็งของชิ้นงานที่แข็งที่สุดในเวลาบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง ที่องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al โดยความอยู่ที่ 146.4 วิกเกอร์

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อลูมิเนียม

เวลา (ชั่วโมง)	ความแข็งเฉลี่ย (HV)		
	93%Ag-6.5% Cu-0.5%Al	93%Ag-6% Cu-1%Al	93%Ag-5.5% Cu-1.5%Al
หลังหล่อ	69.57	68.6	83.67
1	135.47	141.97	141.7
3	131.2	139.8	132.77
6	118.1	125.67	124.73
9	124.53	146.4	144.63

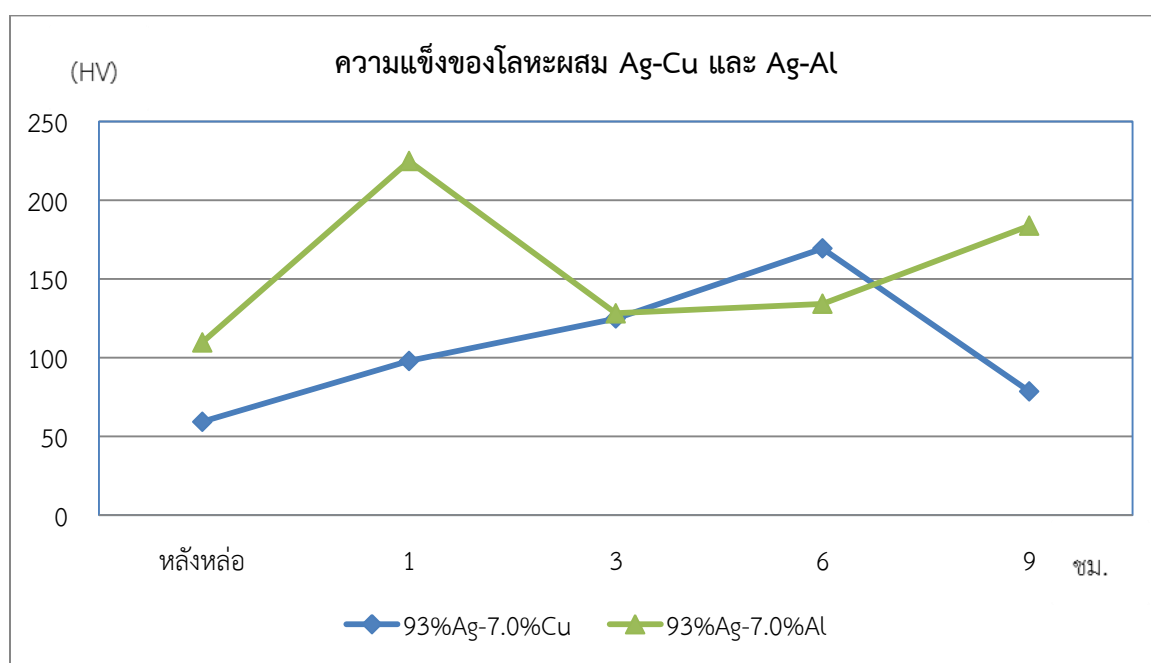


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al 93%Ag-6%Cu-1%Al และ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al

จากการทดสอบความแข็งจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง และ เงิน-อลูมิเนียม เป็นโลหะอ้างอิง (ตารางที่ 4.6) พบว่าความแข็งขององค์ประกอบหลังหล่อ ที่มีความแข็งสูงสุดจะเป็นองค์ประกอบ 93%Ag-7.0%Al เป็นองค์ประกอบที่เติม Al โดยวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 109.72 วิกเกอร์ หลังจากบ่มแข็งชิ้นงาน ความแข็งของโลหะผสม ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง องค์ประกอบ 93%Ag-7.0%Cu มีความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 169.25 วิกเกอร์ ความแข็งที่ต่ำที่สุดในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิที่ 9 ชั่วโมง โดยมีความแข็งอยู่ที่ 78.62 วิกเกอร์ ซึ่งเกิดจากตะกอนเปลี่ยนแปลงเป็นขนาดใหญ่และไม่มีพันธะกับโลหะพื้นหลัก สำหรับชิ้นงาน 93%Ag-7.0%Al ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 1 ชั่วโมง มีความแข็งจุลภาคมากที่สุดที่ 224.72 วิกเกอร์ สำหรับโลหะผสมอ้างอิงทั้งสองชนิด พบว่า โลหะผสมเงิน-ทองแดง มีค่าหลังหล่อน้อยกว่าโลหะผสม โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม และ โลหะผสมเงิน-อะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าหลังจากการเติมโลหะผสมนอกเหนือจากทองแดงทำให้โลหะผสมเงินมีความแข็งมากขึ้น และ เมื่อทำการบ่มแข็งทำให้ความแข็งสูงขึ้นด้วยเช่นกันหลังจากการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสมเงิน-ทองแดง และ เงิน-อลูมิเนียม

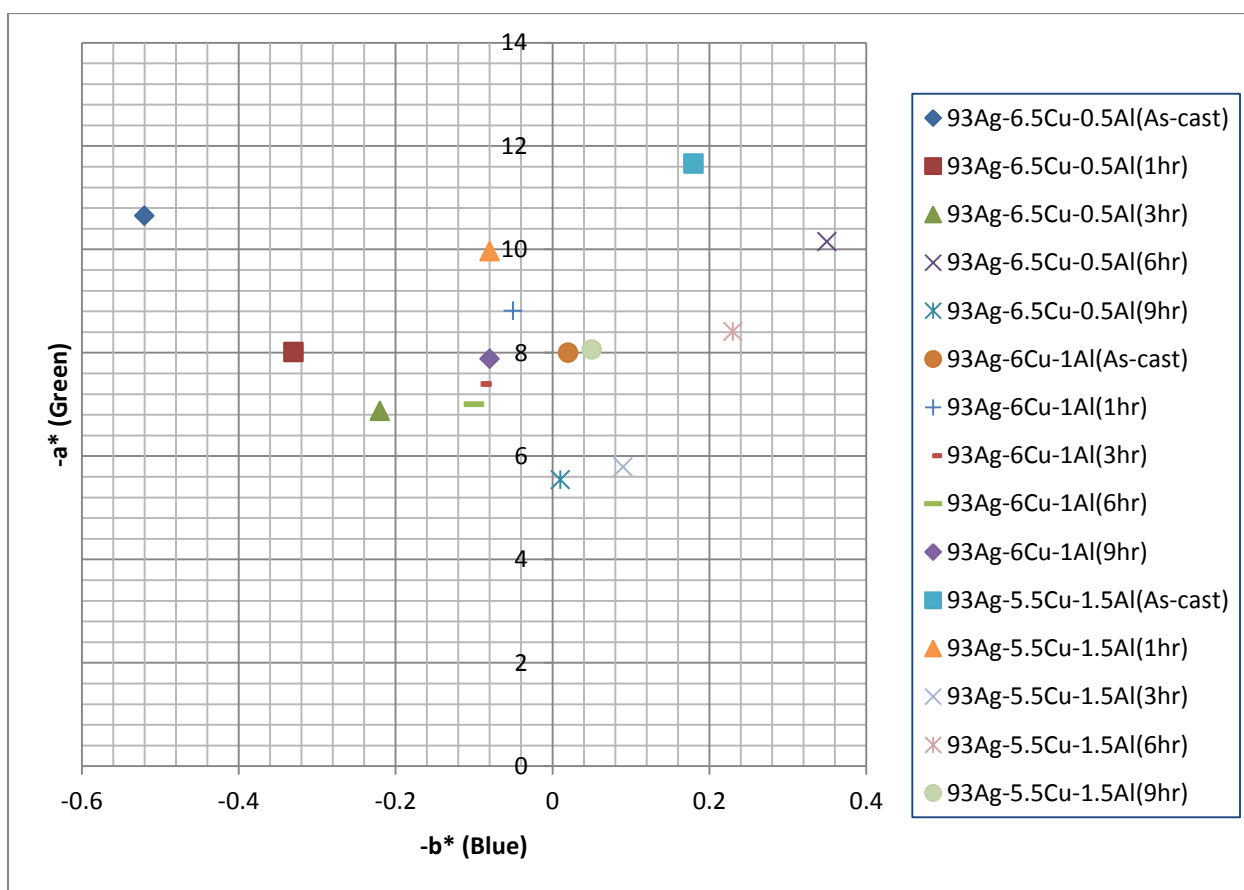
เวลา (ชั่วโมง)	ความแข็งเฉลี่ย (HV)	
	93%Ag-7.0%Cu	93%Ag-7.0%Al
หลังหล่อ	59.33	109.72
1	97.93	224.72
3	124.78	128.15
6	169.25	134.12
9	78.62	183.71



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของโลหะผสม 93%Ag-7.0%Cu และ 93%Ag-7.0%Al

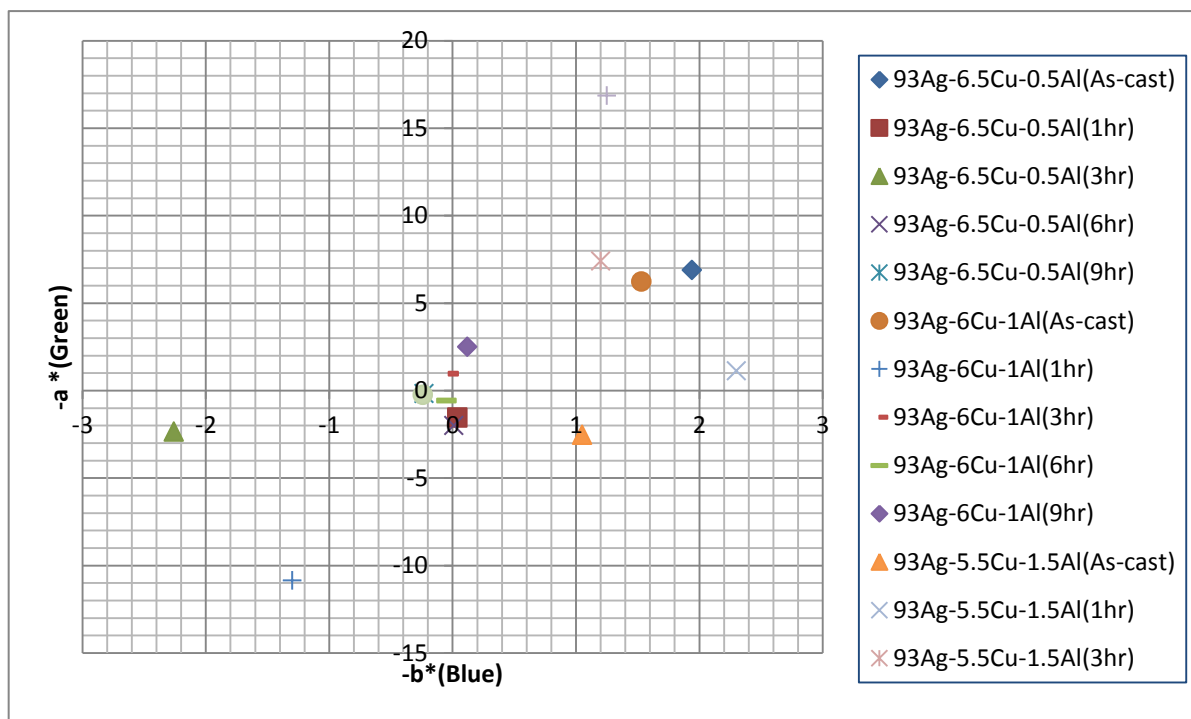
4.7 ผลการวัดสี a^* และ b^* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356)

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง (รูปที่ 4.17) คือ ค่า a^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง มีชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีแดงมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีสีออกทางสีเขียวมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบกันหมอง จากกราฟจะเห็นได้ว่าทุกๆชิ้นงานมีค่าเป็นบวก กล่าวคือ b^* ของชิ้นงานจะมีสีออกไปทางสีเหลืองทุกๆชิ้นงาน จากค่าวัดสีของ b^* จะพบได้ว่าชิ้นงาน 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีสีเหลืองที่เข้มสุดคือ 11.66 ส่วนชิ้นงาน 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง มีสีเหลืองที่น้อยสุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองคือ 5.54



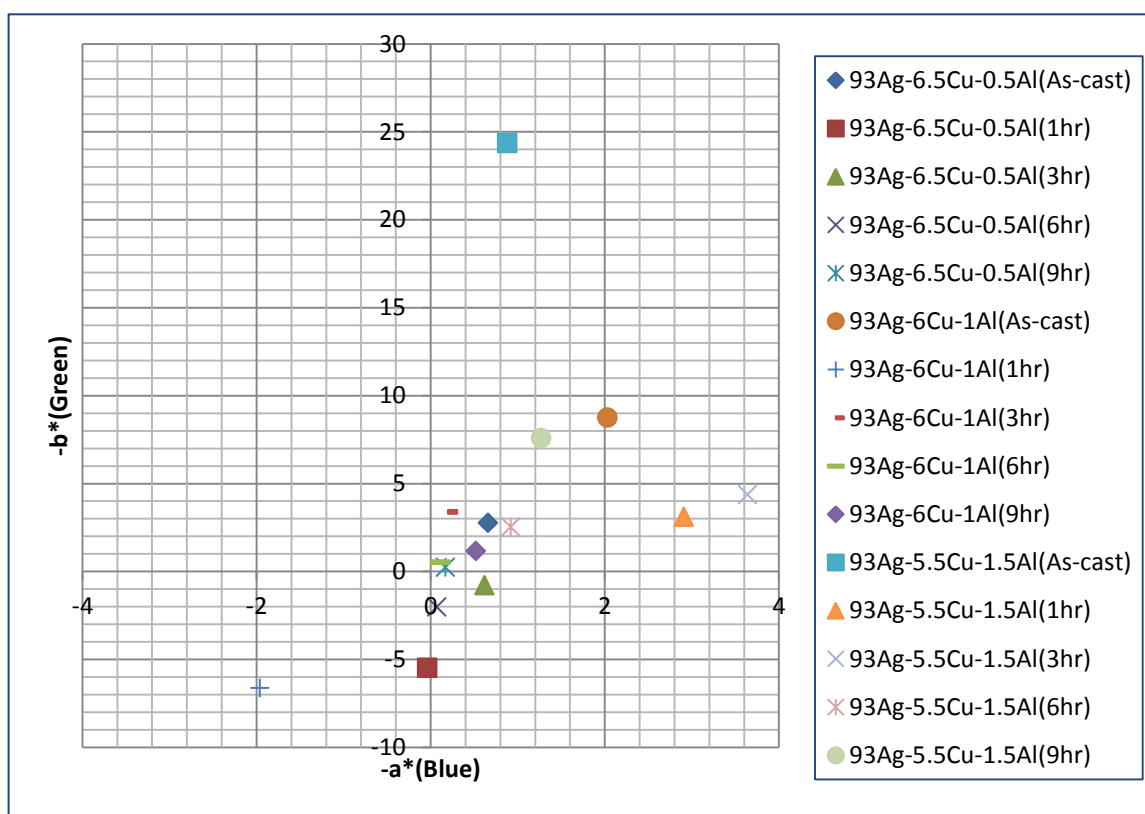
รูปที่ 4.17 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (รูปที่ 4.18) คือ ค่า a^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง มีชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 9 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีแดงมีทั้งหมด 9 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 6 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีเขียวมีทั้งหมด 6 ชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีค่า a^* เป็นบวกมากที่สุดคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีค่า a^* เท่ากับ 1.94 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีออกไปทางสีแดงมากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่เหมือนกัน แต่ในขณะเดียวกันชิ้นงานที่มีองค์ประกอบที่เหมือนกันแต่ผ่านเวลาการบ่มแข็งมาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง กลับมีค่าที่เป็นลบมากที่สุดคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (356) ที่บ่มแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่า a^* คือ -2.26 ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีเหลืองมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีน้ำเงินมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 9 ชั่วโมง เป็นชิ้นงานที่มีค่าบวกมากที่สุดอยู่ที่ 16.85 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีออกสีเหลืองมากที่สุด แต่จะมีอีก 1 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน กลับมีค่าของ b^* ที่ติดลบมากที่สุดคือองค์ประกอบ 93Ag-6Cu-1Al (356) ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่า b^* คือ -10.85 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีเป็นสีน้ำเงินมากที่สุด เมื่อเทียบกับเวลาในการทดสอบความหมองในเวลาเดียวกัน



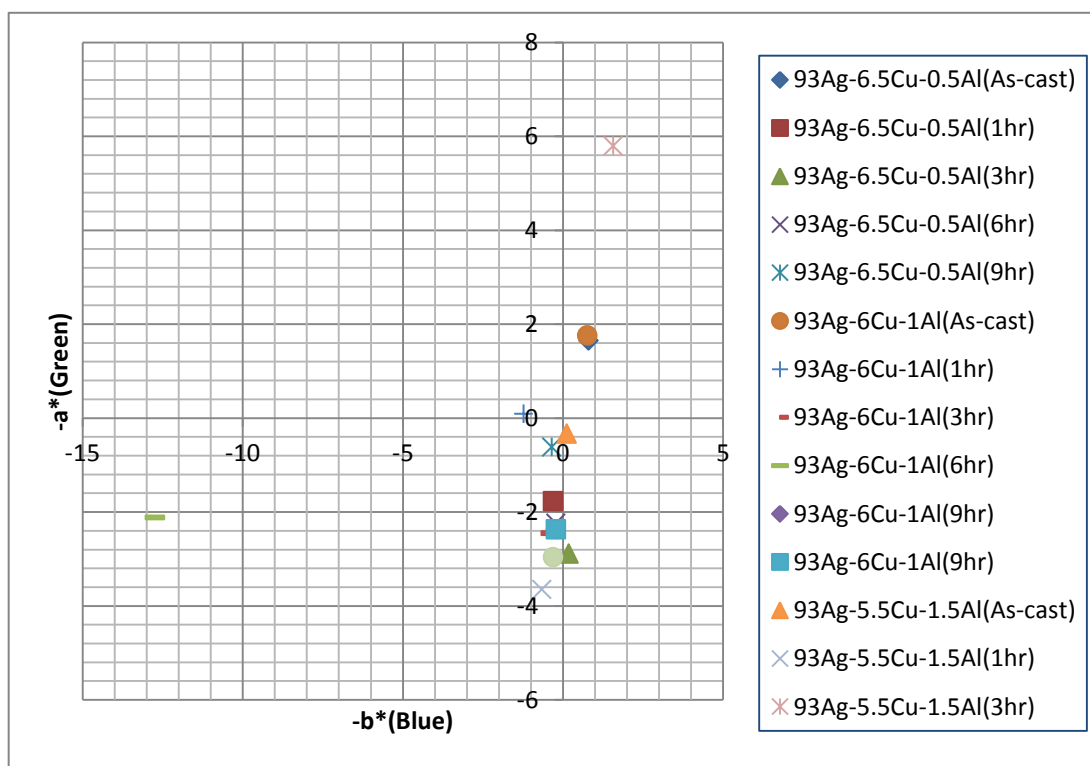
รูปที่ 4.18 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 ชั่วโมง

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.19) ค่า a^* ของชิ้นงานที่ผ่านงานทดสอบความหมองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีค่า a^* เป็นค่าบวก โดยมีชิ้นงานที่มีค่า a^* ที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่า a^* เท่ากับ 2.91 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้เป็นชิ้นงานที่มีสีออกสีแดงมากที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองในเวลาเดียวกัน แต่ในการทดสอบความหมองจะมี 2 ชิ้นงานที่มีค่า a^* เป็นลบคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) และ 93Ag-6Cu-1Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 11 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีเหลืองมีทั้งหมด 11 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีเพียงทั้งหมด 4 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีน้ำเงินมีทั้งหมด 4 ชิ้นงาน โดยจะมีชิ้นงานที่มีค่าบวกที่มากที่สุดอย่างเห็นได้ชัดเจนคือองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีค่า b^* เท่ากับ 24.36 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้มีสีที่ออกเป็นสีเหลืองมากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองในเวลาเดียวกันที่ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบความหมอง 3 ชั่วโมง

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 5 ชั่วโมง (รูปที่ 4.20) ค่า a^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง มีชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 5 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีแดงมีทั้งหมด 5 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 10 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีเขียวมีทั้งหมด 10 ชิ้นงาน ในการทดสอบความหมองที่ 5 ชั่วโมงจากกราฟจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีค่า a^* ที่เป็นลบ ในชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 5 ชั่วโมงมีชิ้นงานที่เป็นองค์ประกอบ $93Ag-6Cu-1Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีค่าที่ติดลบมากที่สุด โดยมีค่า a^* อยู่ที่ -12.73 ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 4 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีเหลืองมีทั้งหมด 4 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีเพียงทั้งหมด 11 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีน้ำเงินมีทั้งหมด 11 ชิ้นงาน เมื่อดูจากกราฟจะเห็นได้ว่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ส่วนใหญ่มักจะมีค่าที่เป็นลบ กล่าวคือชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีสีที่ออกเป็นสีน้ำเงินเป็นส่วนมาก จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่ามี 1 ชิ้นงานที่มีค่าบวกมากอย่างเห็นได้ชัดคือ ชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ $93Ag-5.5Cu-1.5Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีค่า b^* อยู่ที่ 5.79 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้มีสีที่ออกเป็นสีเหลืองมากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองในเวลาเดียวกัน

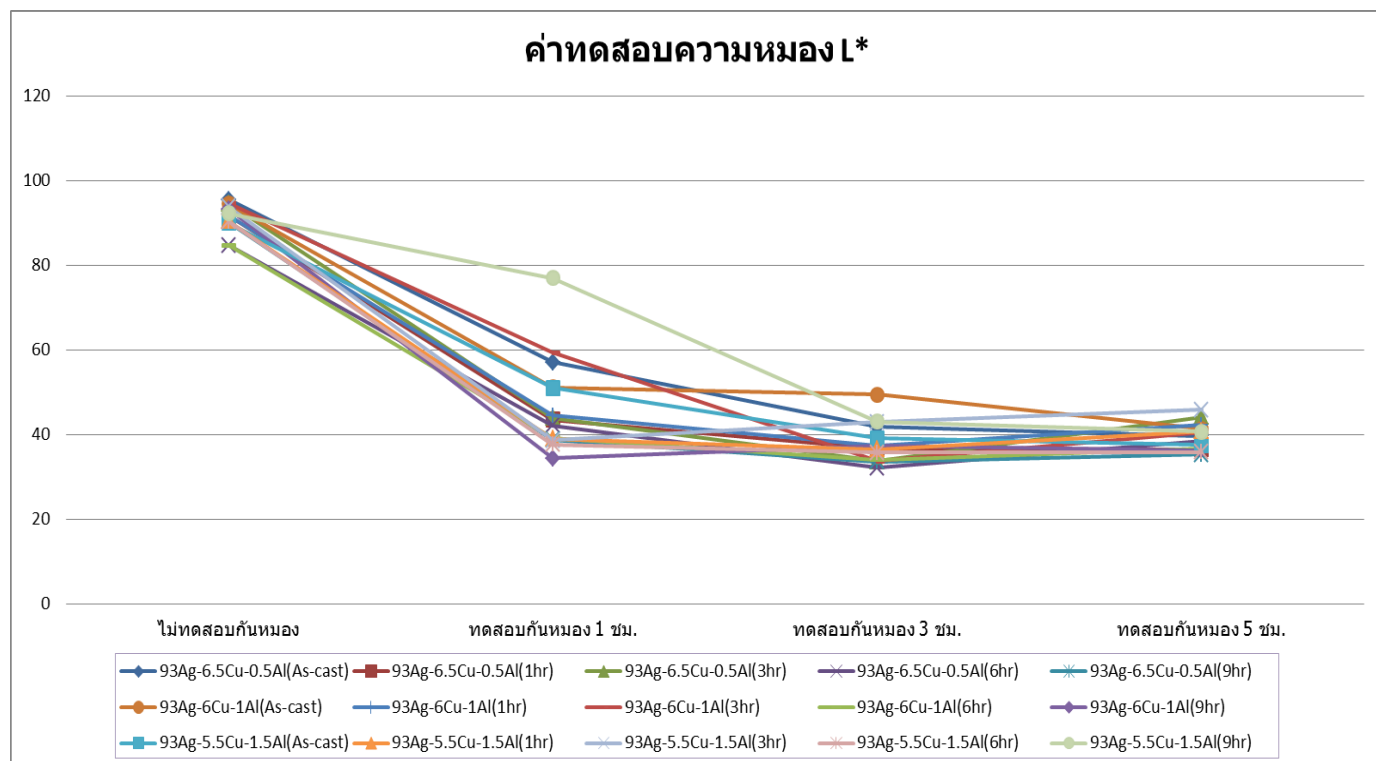


รูปที่ 4.20 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) ที่ผ่านการทดสอบความหมอง 5 ชั่วโมง

4.8 ผลการวัดความหมอง L^* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356)

การวัดค่า L^* เป็นการวัดค่าความสว่างของชิ้นงานจะมีค่าสูงสุดตั้งแต่ 100 จนถึง 0 กล่าวคือ ชิ้นงานที่มีค่าความสว่างที่มากจะค่าใกล้เคียงกับ 100 ส่วนชิ้นงานที่มีความสว่างน้อยค่าของการวัด จะมีค่าที่เข้าใกล้กับ 0 ในการวัดความหมองของชิ้นงานเงินผสม ถ้าหากชิ้นงานมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 0 มากขึ้นเท่าไร ชิ้นงานชิ้นนั้นก็จะมีความหมองมากขึ้นเท่านั้น จากการวัดผล L^* (รูปที่ 4.21) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองจะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยชิ้นงานที่มีค่าความสว่างมากที่สุดคือ องค์กรประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง โดยมีค่า L^* สูงสุดอยู่ที่ 95.55 ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองที่มีค่าความสว่างต่ำสุดคือชิ้นงานองค์กรประกอบ 93Ag-6Cu-1Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 84.82 สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบความหมอง ส่วนค่า L^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานองค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 76.98 เมื่อทดสอบความหมองแล้วจะเห็นได้ว่าเป็นชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองมากที่สุดใน 1 ชั่วโมงแรก ชิ้นงานที่ทนทานต่อความหมองน้อยที่สุดใน 1 ชั่วโมง แรกคือองค์กรประกอบ 93Ag-6Cu-1Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง มีค่าอยู่ที่ 34.48 จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นงานองค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง มีความทนต่อการทดสอบความหมองเป็นอย่างมาก เมื่อทดสอบที่ความหมองที่ 1 ชั่วโมง มีความหมองเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับชิ้นงานอีกสององค์กรประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งที่เวลา 9 ชั่วโมงที่เหมือนกัน สำหรับชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองใน 3 ชั่วโมงที่ทนทานต่อความหมองมากที่สุด คือ องค์กรประกอบ 93Ag-6Cu-1Al (A356) ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีค่า L^* อยู่ที่ 49.51 และ L^* ของชิ้นงานที่ทนทานต่อความหมองน้อยที่สุดในการทดสอบความหมองที่ 3 ชั่วโมง คือองค์กรประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 32.18 ส่วนชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองใน 5 ชั่วโมง ที่ทนทานต่อความหมองมากที่สุด คือ องค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 45.86 และชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองน้อยที่สุดในระยะเวลา 5 ชั่วโมงคือองค์กรประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 35.35 จากกราฟที่แสดงค่าของ L^* ของชิ้นงานทุกๆ องค์กรประกอบ คือ 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356), 93Ag-6Cu-1Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง โดยการทดสอบความหมองที่เวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่องค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง เป็นชิ้นงานที่ทนทานต่อการทดสอบความหมองมากที่สุดตั้งแต่ในการทดสอบความหมองใน 1 ชั่วโมง แรกที่ทำการทดสอบ จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาเป็นทดสอบความหมองอีก 3 ชั่วโมงจากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานโลหะเงินผสมชิ้นนี้ ยังคงทนทานต่อการทดสอบความหมองได้ดีอยู่เมื่อเทียบกับชิ้นงานชิ้นอื่นๆ โดยมีค่า L^* เป็นลำดับที่สองจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่เวลา 3 ชั่วโมงเหมือนกัน และเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบความหมองเป็น 9 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นงานชิ้นนี้ยังคง

มีค่าของ L^* ที่อยู่ในลำดับต้นๆอยู่เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่เวลา 9 ชั่วโมงเหมือนกัน



รูปที่ 4.21 ค่าการทดสอบความหมอง L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356)

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของค่า L* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356)

องค์ประกอบ	เวลาในการบ่ม	เวลาทดสอบกันหมอง	L*
93Ag-6.5Cu-0.5Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.55
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	57.15
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	41.85
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	39.73
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	91.72
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	43.51
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	36.71
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.57
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.67
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	44.01
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	33.8
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	44.24
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	84.82
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	42.16
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	32.18
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	38.47
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	90.24
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	38.85
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	33.66
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	35.35

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) (ต่อ)

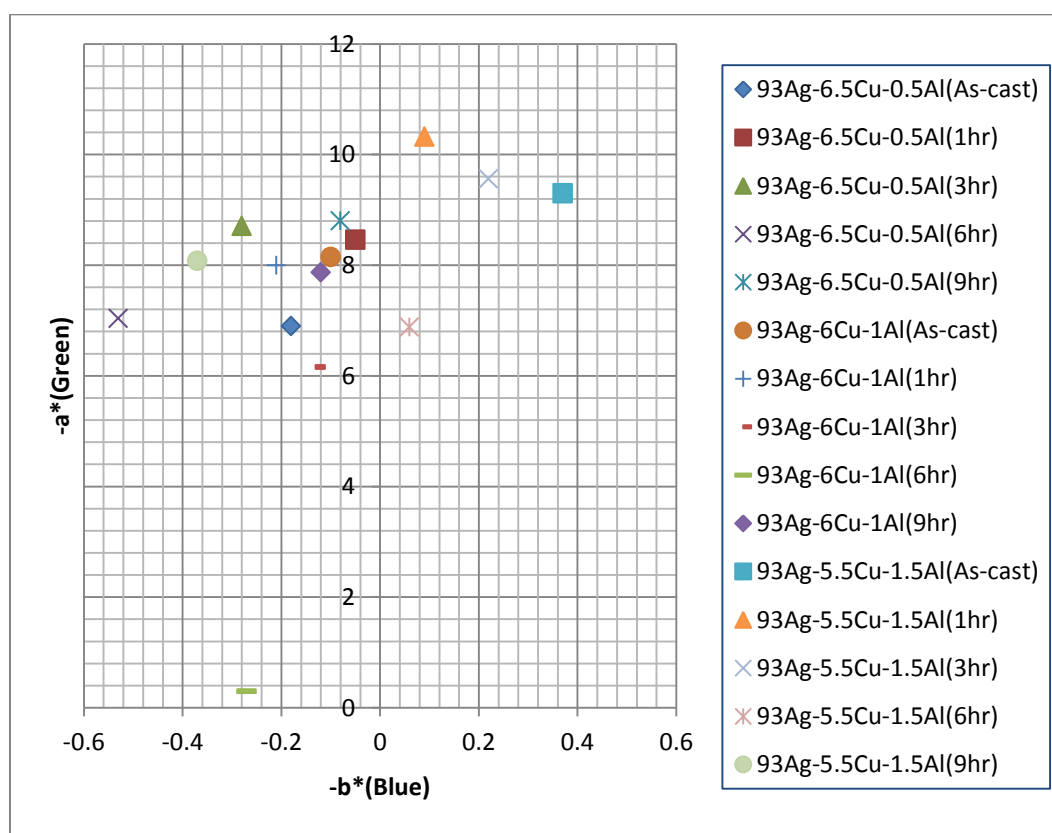
องค์ประกอบ	เวลาในการบ่ม	เวลาทดสอบกันหมอง	L^*
93Ag-6Cu-1Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.52
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	51.22
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	49.51
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	41.4
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	91.72
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	44.52
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	37.3
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	42.34
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.67
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	59.34
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	33.8
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	40.63
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	84.82
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	39.25
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	34.06
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.8
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	93.3
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	34.48
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	37.47
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.3

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al (A356) 93Ag-6.0Cu-1.0Al (A356) และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (A356) (ต่อ)

องค์ประกอบ	เวลาในการป้อน	เวลาทดสอบกันหมอง	L^*
93Ag-5.5Cu-1.5Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	90.08
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	51.02
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	39.2
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	37.57
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	90.54
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	38.99
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	36.62
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	40.89
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	93.88
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	38.68
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	43.01
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	45.86
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	90.35
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	37.67
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	35.83
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	35.85
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	92.26
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	76.98
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	43.05
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	40.71

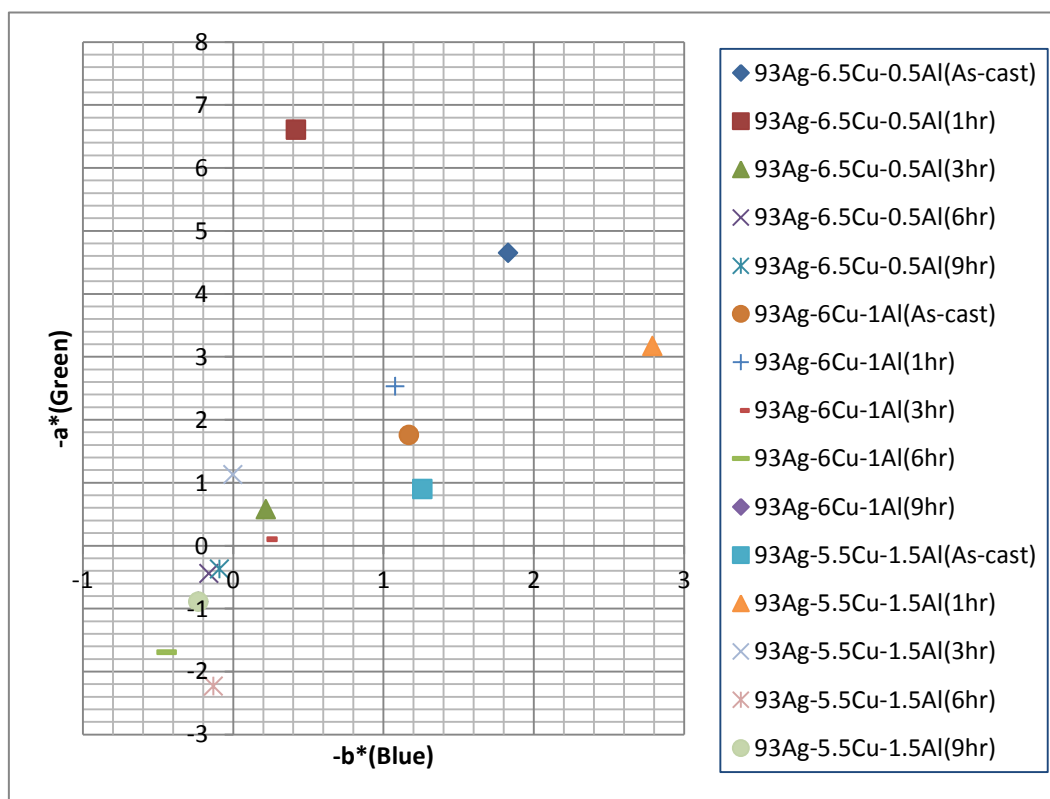
4.9 ผลการวัดสี a^* และ b^* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม

จากผลของกราฟ (รูปที่ 4.22) จะแสดงให้เห็นว่าค่า a^* ของชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีค่าที่ติดลบ กล่าวคือสีของชิ้นงานมีสีออกไปทางสีเขียว และมีชิ้นงานสีขึ้นที่มีค่า a^* เป็นค่าบวกคือ ชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง, ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง, ผ่านการบ่มแข็ง 3 ชั่วโมง และ ผ่านการบ่มแข็ง 6 ชั่วโมง กล่าวคือสีของชิ้นงานจะออกไปทางสีแดง ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบกันหมอง จากกราฟจะเห็นได้ว่าทุกๆชิ้นงานมีค่าเป็นบวก กล่าวคือ b^* ของชิ้นงานจะมีสีออกไปทางสีเหลืองทุกๆชิ้นงาน จากค่าวัดสีของ b^* จะพบได้ว่าชิ้นงาน 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง มีสีเหลืองที่เข้มสุดคือ 10.32 ส่วนชิ้นงาน 93Ag-6Cu-1Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง มีสีเหลืองที่น้อยสุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองคือ 0.3



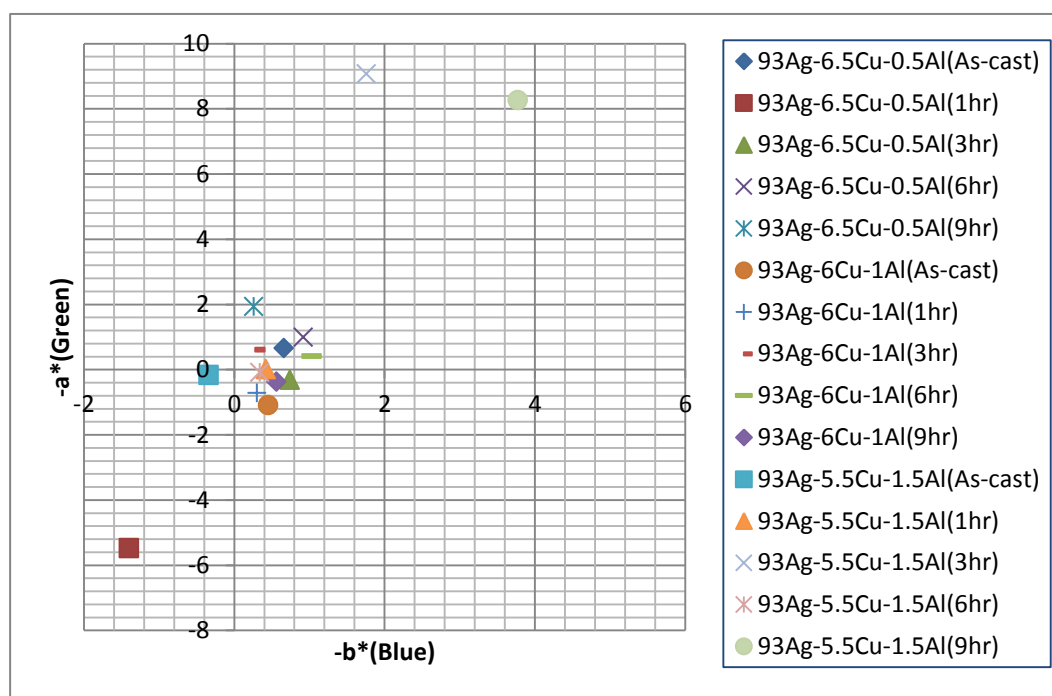
รูปที่ 4.22 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม ที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 ชั่วโมง(รูปที่ 4.23) คือ ค่า a^* ของทุกๆ องค์ประกอบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง, ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง, ชิ้นงานที่ผ่านที่ผ่านการบ่มแข็ง 3 ชั่วโมง ค่าการวัดสีของ a^* มีผลเป็นบวกกล่าวคือ สีของชิ้นงานมีสีออกเป็นสีเป็นสีแดง ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง ผลการวัดสีให้ค่าเป็นลบโดยกล่าวคือ ชิ้นงานมีสีออกเป็นสีเขียว จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นงานองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 1 ชั่วโมง จะมีค่า a^* เป็นบวกมากที่สุดที่ 2.79 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้มีสีออกไปทางสีแดงมากที่สุด ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่ 1 ชั่วโมง ค่า b^* ของทุกๆ องค์ประกอบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง, ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง, ชิ้นงานที่ผ่านที่ผ่านการบ่มแข็ง 3 ชั่วโมง ค่าการวัดสีของ b^* มีผลเป็นบวกกล่าวคือ สีของชิ้นงานมีสีออกเป็นสีเป็นสีเหลือง ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง ผลการวัดสีให้ค่าเป็นลบโดยกล่าวคือ ชิ้นงานมีสีออกเป็นสีน้ำเงิน จากกราฟจะพบว่า ชิ้นงานองค์ประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง มีค่าของ b^* เป็นค่าบวกมากที่สุดที่ 6.61 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีของชิ้นงานออกเป็นสีเหลืองมากที่สุด



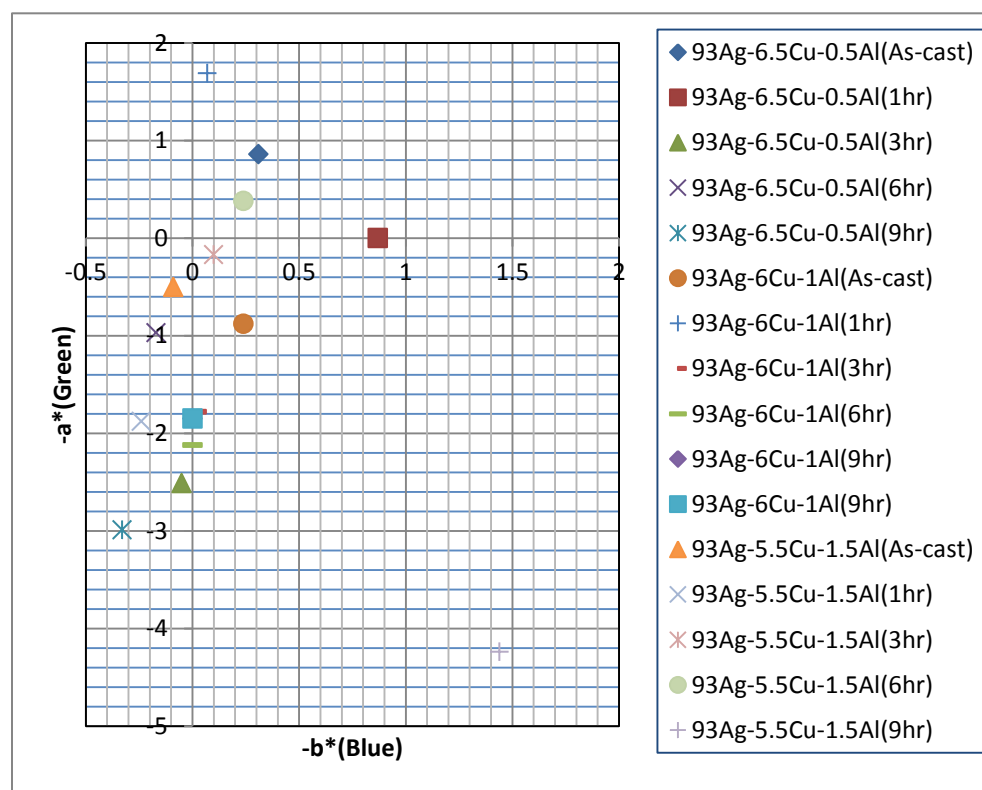
รูปที่ 4.23 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 ชั่วโมง

ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 3 ชั่วโมง(รูปที่ 4.24) ชั่วโมง คือ ค่า a^* ของชิ้นงานส่วนใหญ่ให้ผลที่เป็นบวก กล่าวคือชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีสีออกไปทางสีแดง แต่จะมีชิ้นงานเพียงแค่สองชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบ คือ ชิ้นงานองค์ประกอบ $93Ag-5.5Cu-1.5Al$ ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง และ ชิ้นงานองค์ประกอบ $93Ag-6.5Cu-0.5Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็ง 1 ชั่วโมง กล่าวคือสองชิ้นงานดังกล่าวจะมีสีที่ออกไปทางสีเขียว จากค่า a^* ของชิ้นงาน $93Ag-5.5Cu-1.5Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง จะเป็นชิ้นงานที่มีค่าบวกมากที่สุดที่ 3.77 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีออกเป็นสีแดงมากที่สุด ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่ 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีเหลืองมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีน้ำเงินมีทั้งหมด 7 ชิ้นงาน จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นงาน $93Ag-5.5Cu-1.5Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง มีค่าบวกมากที่สุดที่ 9.07 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้มีสีเหลืองมากที่สุด



รูปที่ 4.24 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบความหมอง 3 ชั่วโมง

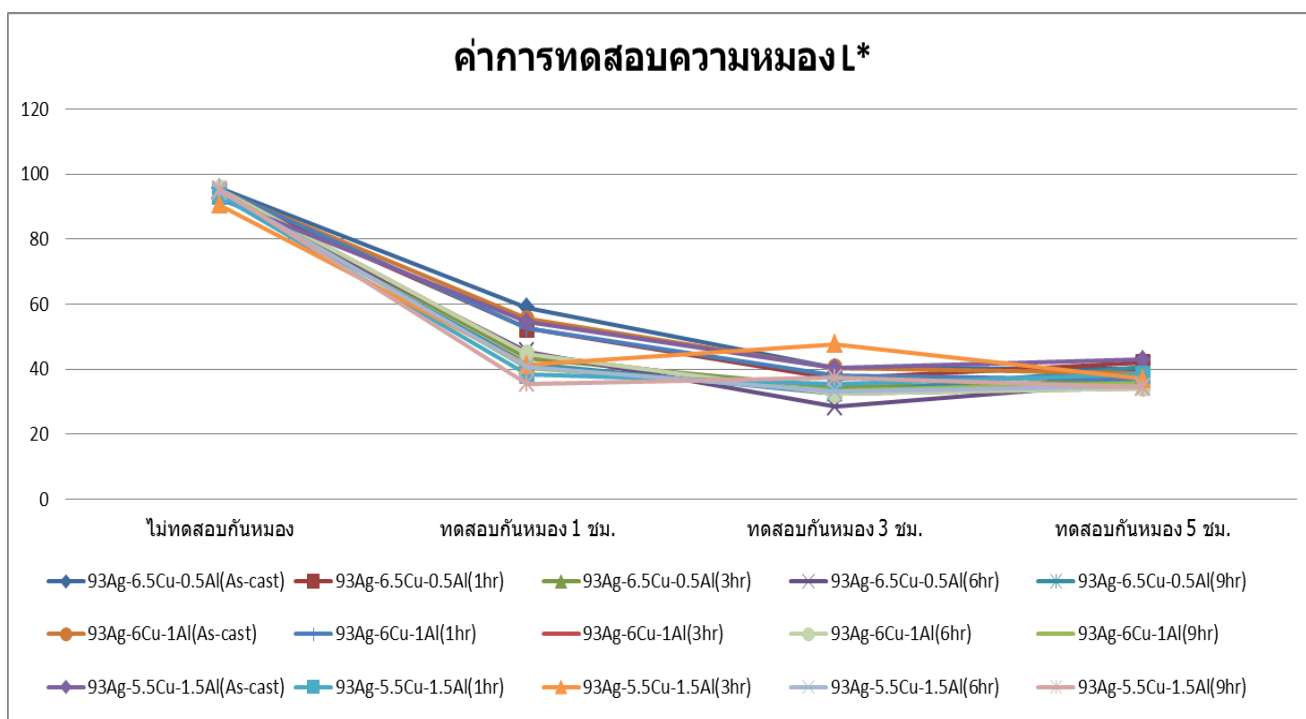
ค่าการวัดสีของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 5 ชั่วโมง (รูปที่ 4.25) คือ ค่า a^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่ 5 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีแดงมีทั้งหมด 8 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 5 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีเขียวมีทั้งหมด 5 ชิ้นงาน และมีชิ้นงาน 2 ชิ้นงานที่มีค่า a^* เป็น 0 คือชิ้นงานองค์ประกอบ 93Ag-6Cu-1Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 และ 9 ชั่วโมง กล่าวคือ ชิ้นงานสองชิ้นงานนี้ไม่มีสีที่ออกทางสีแดงและสีเขียวเลย ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่ 9 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีค่าเป็นค่าบวกมีทั้งหมด 3 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่ออกสีทางสีเหลืองมีทั้งหมด 3 ชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีค่าเป็นลบมีทั้งหมด 11 ชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีสีออกทางสีน้ำเงินมีทั้งหมด 11 ชิ้นงาน และมีชิ้นงาน 1 ชิ้นงานที่มีค่า a^* เป็น 0 คือชิ้นงานองค์ประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง กล่าวคือชิ้นงานนี้ไม่มีสีที่ออกทางสีเหลืองและสีน้ำเงินเลย จากกราฟชิ้นองค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง เป็นชิ้นงานที่มีค่า a^* และ b^* มากที่สุดคือ a^* มีค่าบวกมากที่สุดอยู่ที่ 1.44 สีของชิ้นงานจะออกไปทางสีแดงมากที่สุด และ b^* มีค่าลบมากที่สุดอยู่ที่ -4.24 ของชิ้นงานจะออกไปทางสีน้ำเงินมากที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการหมองที่ 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4.25 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบความหมอง 5 ชั่วโมง

4.10 ผลการวัดความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม

การวัดค่า L* เป็นการวัดค่าความสว่างของชิ้นงานจะมีค่าสูงสุดตั้งแต่ 100 จนถึง 0 กล่าวคือ ชิ้นงานที่มีค่าความสว่างที่มากจะค่าใกล้เคียงกับ 100 ส่วนชิ้นงานที่มีความสว่างน้อยค่าของการวัด จะมีค่าที่เข้าใกล้กับ 0 ในการวัดความหมองของชิ้นงานเงินผสม ถ้าหากชิ้นงานมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 0 มากขึ้นเท่าไร ชิ้นงานชิ้นนั้นก็มีความหมองมากขึ้นยิ่งขึ้นมากเท่านั้น จากการวัดผล L* (รูปที่ 4.26) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองจะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดนชิ้นงานที่มีค่าความสว่างมากที่สุดคือ องค์กรประกอบ 93Ag-6Cu-1Al ที่ผ่านการบ่มที่ 3 ชั่วโมง โดยมีค่า L* สูงสุดอยู่ที่ 95.92 ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองที่มีค่าความสว่างต่ำสุดคือชิ้นงานองค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 90.6 สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบความหมอง ส่วนค่า L* ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานองค์กรประกอบ 93Ag-6.5Cu-0.5Al ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีค่า L* อยู่ที่ 58.96 เมื่อทดสอบความหมองแล้ว จะเห็นได้ว่าเป็นชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองมากที่สุดใน 1 ชั่วโมงแรก ชิ้นงานที่ทนทานต่อความหมองน้อยที่สุดใน 1 ชั่วโมง แรกคือองค์กรประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง มีค่าอยู่ที่ 35.53 ส่วนชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองใน 3 ชั่วโมงที่ทนทานต่อความหมองมากที่สุด



รูปที่ 4.26 ค่าการทดสอบความหมอง L* ของโลหะเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม

คือ องค์ประกอบ $93\text{Ag}-5.5\text{Cu}-1.5\text{Al}$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 47.82 ส่วนค่า L^* ของชิ้นงานที่ทนทานต่อความหมองน้อยที่สุดใน 3 ชั่วโมง คือองค์ประกอบ $93\text{Ag}-6.5\text{Cu}-0.5\text{Al}$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 28.47 (จากตารางที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน องค์ประกอบ $93\text{Ag}-5.5\text{Cu}-1.5\text{Al}$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง จะมีค่า L^* ของการทดสอบความหมอง 3 ชั่วโมง จะใกล้เคียงกับการทดสอบความหมองใน 1 ชั่วโมงแรกเกิดจากในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานมีสีที่ไม่สม่ำเสมอ ในการการวัดผลของชิ้นงานเป็นการเลือกจุดตำแหน่งของชิ้นงานแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองใน 5 ชั่วโมง ที่ทนทานต่อความหมองมากที่สุด คือ องค์ประกอบ $93\text{Ag}-5.5\text{Cu}-1.5\text{Al}$ ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง มีค่า L^* อยู่ที่ 43.01 และชิ้นงานที่ทนต่อการทดสอบความหมองน้อยที่สุดในระยะเวลา 5 ชั่วโมงคือองค์ประกอบ $93\text{Ag}-5.5\text{Cu}-1.5\text{Al}$ ที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง มีค่า L^* อยู่ที่ 34.45

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al 93Ag-6.0Cu-1.0Al และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al

องค์ประกอบ	เวลาในการบ่ม	เวลาทดสอบกันหมอง	L^*
93Ag-6.5Cu-0.5Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.76
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	58.96
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	40.28
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	40.21
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.49
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	52.5
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	37.02
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	41.95
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.97
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	43.36
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	34.61
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.36
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	93.33
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	45.44
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	28.47
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.27
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	93.84
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	41.82
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	32.54
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	40.71

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง $93\text{Ag}-6.5\text{Cu}-0.5\text{Al}$ $93\text{Ag}-6.0\text{Cu}-1.0\text{Al}$ และ $93\text{Ag}-5.5\text{Cu}-1.5\text{Al}$ (ต่อ)

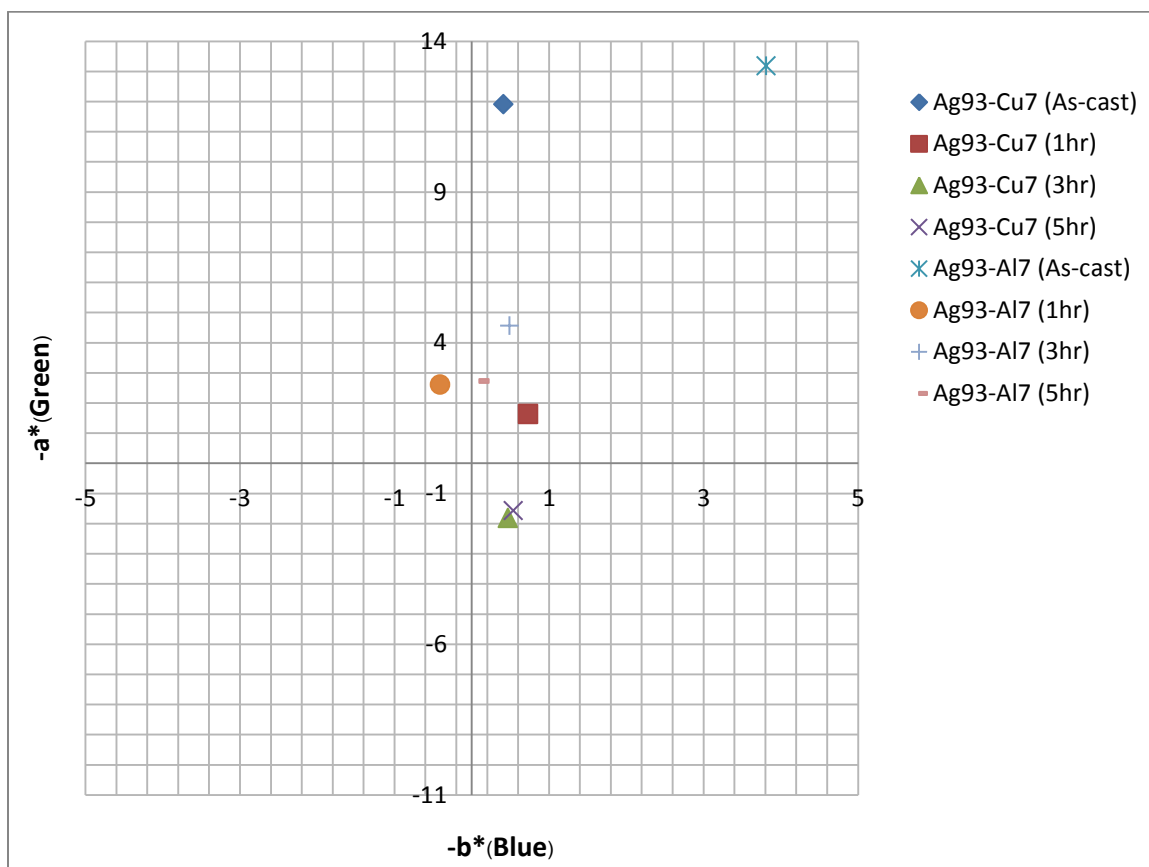
องค์ประกอบ	เวลาในการบ่ม	เวลาทดสอบกันหมอง	L^*
93Ag-6Cu-1Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.07
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	55.53
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	40.43
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	38.81
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.57
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	52.5
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	38.26
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.92
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.92
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	38.74
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	32.64
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.59
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.46
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	44.72
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	32.35
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	34.29
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.96
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	40.4
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	33.41
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	35.89

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของค่า L^* ของตัวอย่าง 93Ag-6.5Cu-0.5Al 93Ag-6.0Cu-1.0Al และ 93Ag-5.5Cu-1.5Al (ต่อ)

องค์ประกอบ	เวลาในการบ่ม	เวลาทดสอบกันหมอง	L^*
93Ag-5.5Cu-1.5Al	As-cast	ไม่ทดสอบกันหมอง	92.54
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	54.49
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	40.3
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	43.01
	1 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	93.35
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	38.32
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	35.5
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	38.35
	3 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	90.6
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	41.28
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	47.82
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	36.97
	6 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	94.73
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	40.71
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	33.19
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	34.66
	9 ชม.	ไม่ทดสอบกันหมอง	95.36
		ทดสอบกันหมอง 1 ชม.	35.53
		ทดสอบกันหมอง 3 ชม.	37.32
		ทดสอบกันหมอง 5 ชม.	34.45

4.11 ผลการวัดสี a^* และ b^* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม

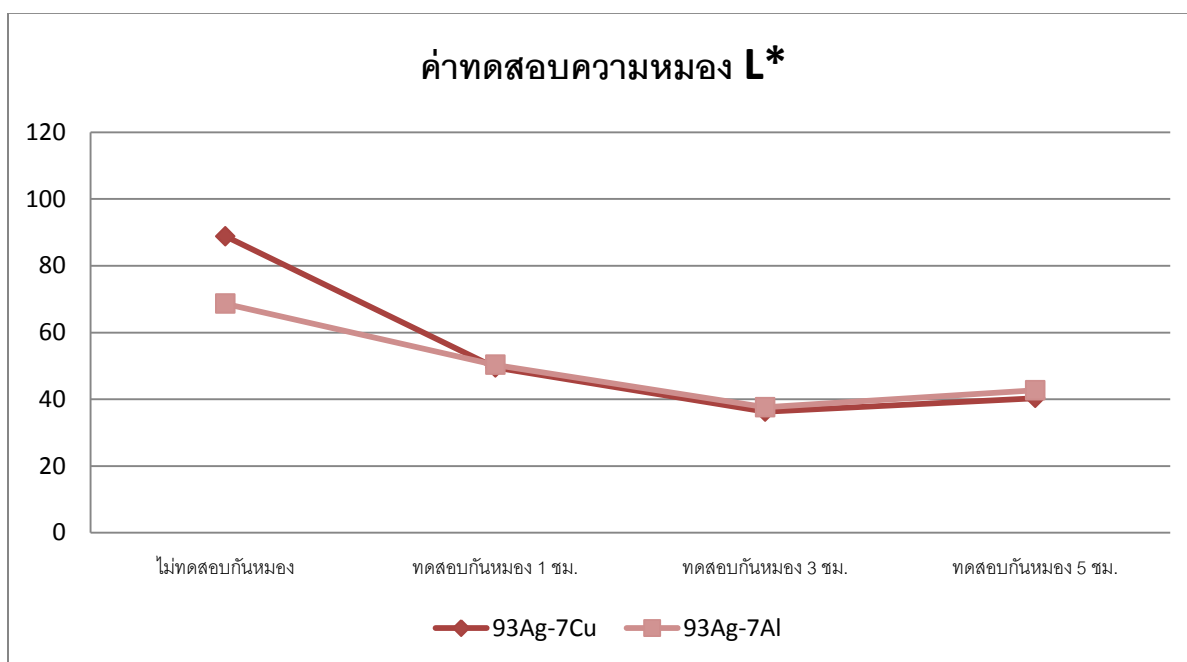
จากผลของกราฟ (รูปที่ 4.27) จะแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานหล่อทั้งสองตัวอย่าง มีค่า a^* และ b^* ออทางสีเหลือง ชิ้นงานส่วนใหญ่หลังทดสอบการหมองสีจะใกล้เคียงกัน คืออยู่ใกล้แกนสีฝั่ง a^* และ $-a^*$ สีจะอยู่ระหว่างเขียวและแดง ชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ $93Ag-7.0Cu$ ที่ผ่านการทดสอบการหมอง 3 และ 5 ชั่วโมง มีสีม่วงเข้ม จึงไม่ทดสอบ 9 ชั่วโมงต่อ แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินผสมทองแดงแบบดั้งเดิมมีความต้านทานการหมองต่ำ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติม อะลูมิเนียม ซิลิกอน และ แมกนีเซียม



รูปที่ 4.27 ค่าการวัดสีของชิ้นงานโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบความหมอง 1 3 และ 5 ชั่วโมง

4.12 ผลการวัดความหมอง L^* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม

จากการวัดผล L^* รูปที่ 4.28 ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมองจะเห็นว่าชิ้นงานจะมีค่า L^* แตกต่างกันเนื่องจากโลหะเงิน-ทองแดงจะสว่างกว่าโลหะเงิน-อะลูมิเนียม ซึ่งผิวชิ้นงานจะออกเป็นสีเทา ค่า L^* จึงต่ำกว่า หลังจากทดสอบการหมองค่า L^* ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยชิ้นงานที่มีค่าความสว่างมากที่สุดคือ หลังทดสอบการหมอง 1 ชั่วโมง ทั้งโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม โดยมีค่า L^* สูงสุดอยู่ที่ 49.49 และ 50.3 ตามลำดับ และค่า L^* ต่ำสุดที่ทดสอบการหมอง 3 ชั่วโมง มีค่าอยู่ที่ 36.23 และ 37.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ค่าการทดสอบความหมอง L^* ของโลหะเงิน-ทองแดง และ โลหะเงิน-อะลูมิเนียม

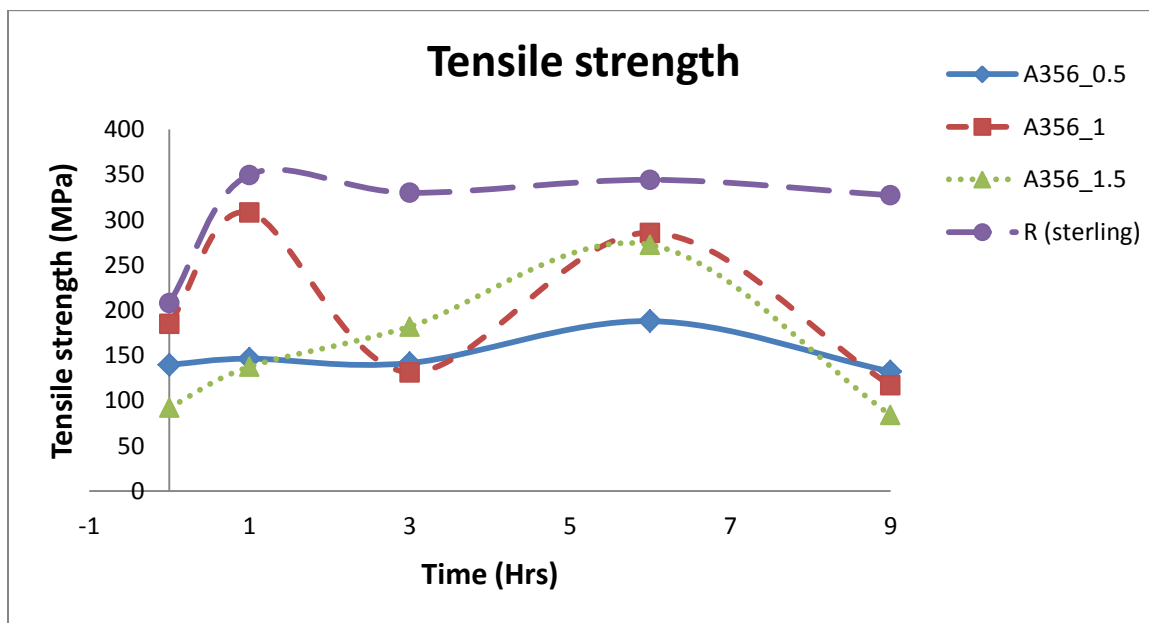
4.13 ความต้านทานแรงดึงและความยืดของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) และ โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม เทียบกับ โลหะเงิน-ทองแดง

จากกราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังบ่มแข็งเทียบกับหลังหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มในเกือบทุกตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับความแข็งที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแข็ง แต่ค่าต้านทานแรงดึงของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) นั้นต่ำกว่าโลหะเงิน-ทองแดง เกิดจากออกซิเจนน่าจะเข้าไปรวมตัวกับอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามพบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 350 MPa ในตัวอย่างโลหะเงิน-ทองแดง บ่มที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานวิจัยโลหะเงินสเตอร์ลิงเจือ สังกะสี และ ทองแดงก่อนการบ่มแข็ง มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 210 MPa (สมนึก, ศิริพร, วชิร, สุรัตน์, และ เดช, 2544) สำหรับตัวอย่างที่เดิม A356 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ตัวอย่างเดิม A356 1%โดยน้ำหนัก บ่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ 308 MPa ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่เดิมอะลูมิเนียม A356 1.5%โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด อยู่ที่ 84.28 MPa

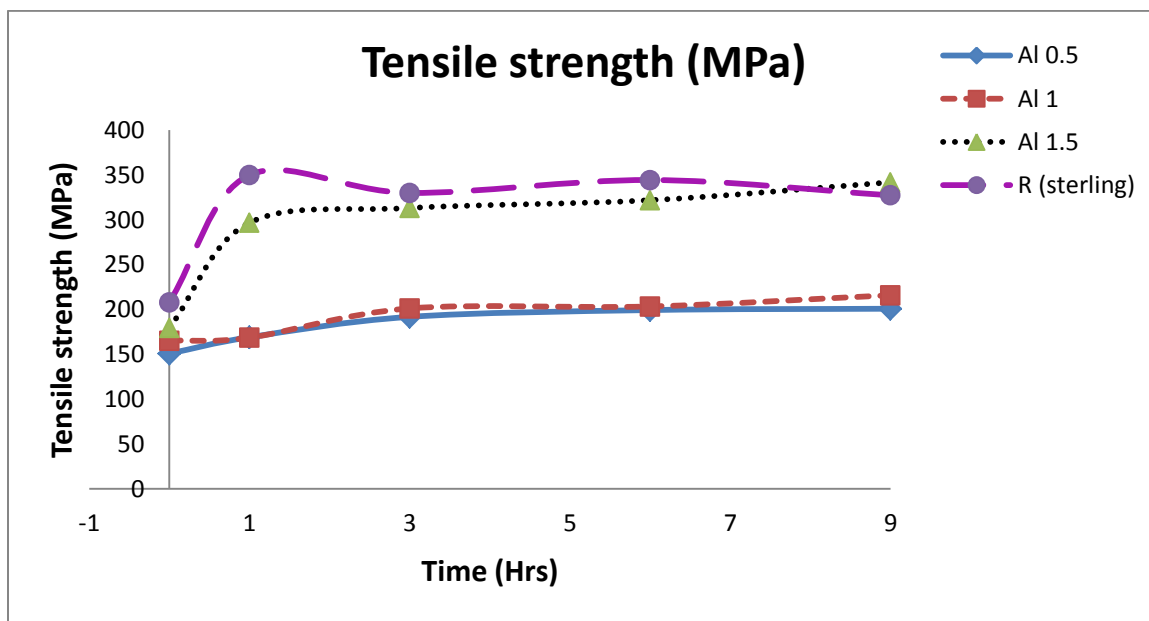
จากกราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังบ่มแข็งเทียบกับหลังหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มในเกือบทุกตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับความแข็งที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแข็ง แต่ค่าต้านทานแรงดึงของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม นั้นต่ำกว่าโลหะเงิน-ทองแดง เหมือนกับ โลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) อย่างไรก็ตามพบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 350 MPa ในตัวอย่างโลหะเงิน-ทองแดง บ่มที่ 1 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างที่เดิม Al บริสุทธิ์ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ตัวอย่างเดิม Al บริสุทธิ์ 1.5%โดยน้ำหนัก บ่มเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่ 327 MPa ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่เดิม Al บริสุทธิ์ 1 และ 1.5% โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่ 1 ชั่วโมง มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด อยู่ที่ 168 MPa

จากกราฟแสดงความยืดของของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังหล่อและบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าตัวอย่างที่มีการเติมอะลูมิเนียม A356 มีความยืดตัวน้อยกว่าโลหะผสมเงิน-ทองแดง และ ความยืดของตัวอย่างหลังบ่มลดลงเมื่อเทียบกับหลังหล่อเนื่องจากจากที่เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และ เกิดจากออกไซด์ที่อยู่ในโครงสร้างจุลภาค เปอร์เซ็นต์การยืดมากที่สุดเท่ากับ 24% ในโลหะผสมเงิน-ทองแดงหลังหล่อ ขณะที่ตัวอย่างที่เติม A356 0.5 และ 1%โดยน้ำหนัก ไม่มีความยืด หลังจากการทดสอบแรงดึง โดยชิ้นงานไม่เกิดการยืด แสดงสมบัติความเปราะ

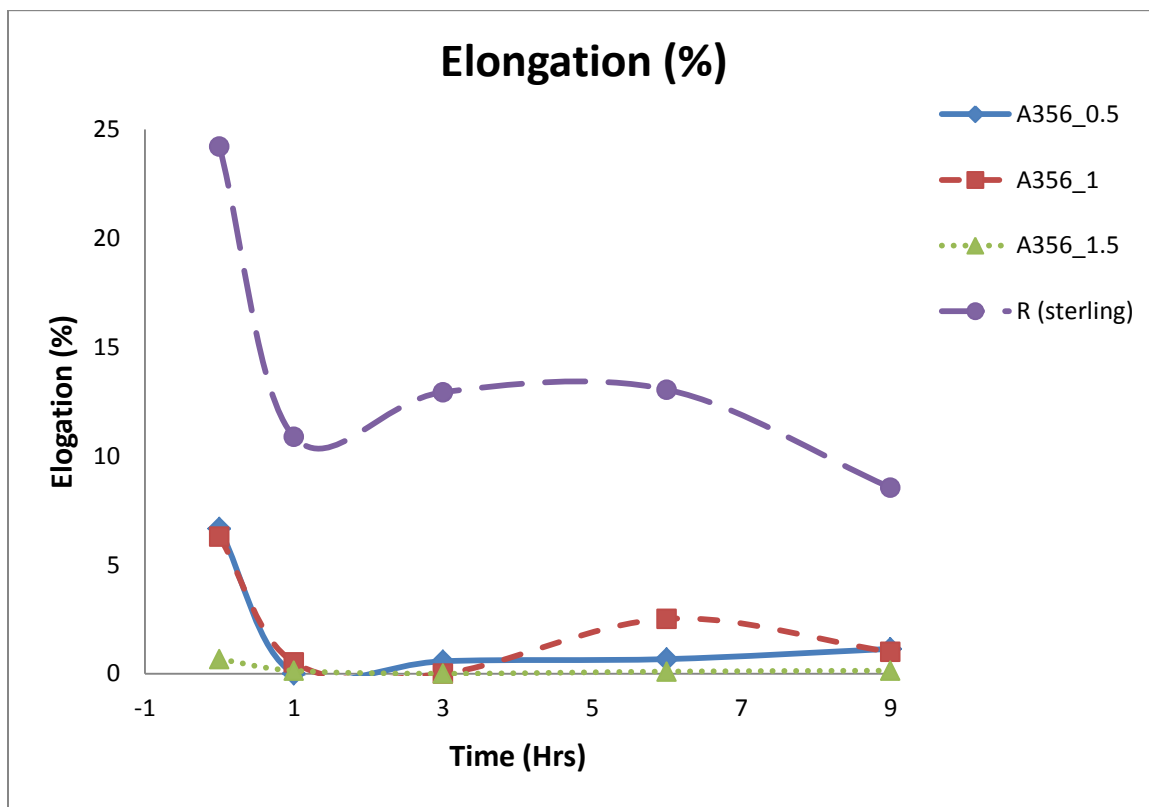
จากกราฟแสดงความยืดของของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังหล่อและบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าตัวอย่างที่มีการเติมอะลูมิเนียม มีความยืดตัวน้อยกว่าโลหะผสมเงิน-ทองแดง และ ความยืดของตัวอย่างหลังบ่มลดลงเมื่อเทียบกับหลังหล่อเนื่องจากจากที่เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และ เกิดจากออกไซด์ที่อยู่ในโครงสร้างจุลภาค เปอร์เซ็นต์การยืดมากที่สุดเท่ากับ 24% ในโลหะผสมเงิน-ทองแดงหลังหล่อ ขณะที่ตัวอย่างที่เติม Al 1.5%โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.19%



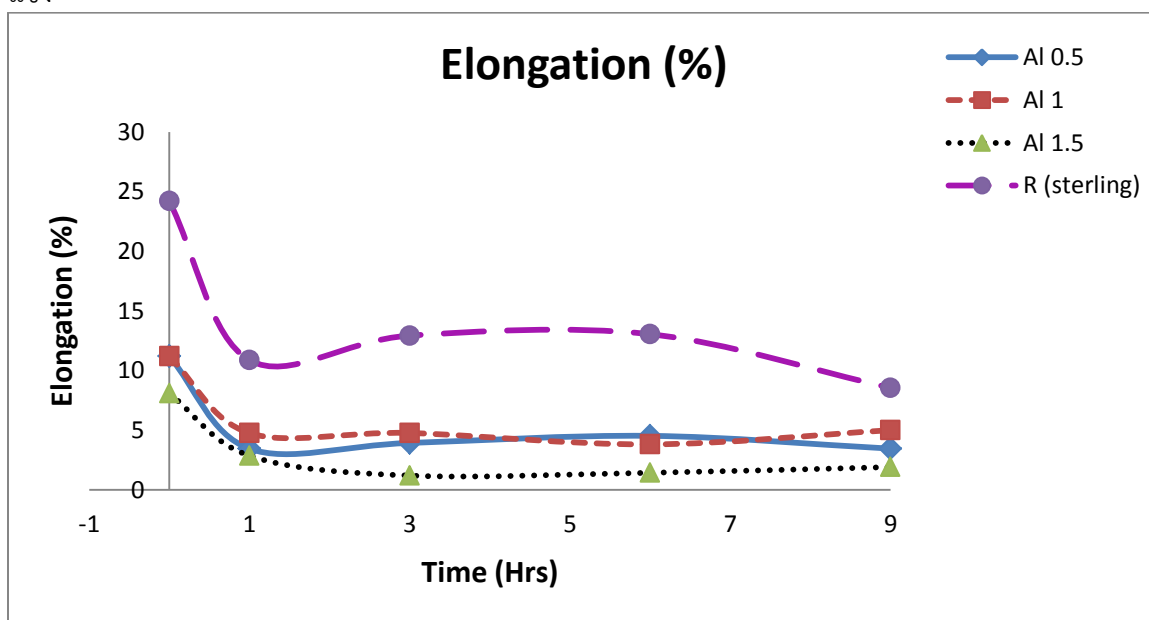
รูปที่ 4.29 ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังหล่อและบ่มแข็ง



รูปที่ 4.30 ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังหล่อและบ่มแข็ง



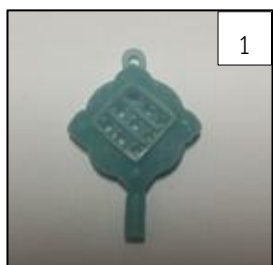
รูปที่ 4.31 เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม (A356) หลังหล่อและบ่มแข็ง



รูปที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานโลหะผสมเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม หลังหล่อและบ่มแข็ง

4.14 การทำเครื่องประดับ

จากการศึกษาการเติมโลหะผสมในเงินพบว่าความแข็งสูงขึ้นในทุกตัวอย่างหลังหล่อ แต่ความแข็งยังน้อยกว่าทอง 18K ที่มีความแข็ง 110 HV และจากการศึกษาการบ่มแข็ง ค่าความแข็งที่นำมาทำเครื่องประดับฝังไร้หนาม คือโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al (A356) บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 135.16 HV เนื่องจากความแข็งไม่สูงมากเพื่อที่จะให้ช่างทำงานได้ใกล้เคียงกับทอง 18K และเป็นสถานะที่ใช้เวลาบ่มไม่นาน จากนั้นทำการหล่อเครื่องประดับจากองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) เมื่อเราทำการหล่อชิ้นงานแล้ว เราจะนำตัวเรือนเครื่องประดับฝังไร้หนามไปทำการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปจุ่มน้ำทันทีที่อุณหภูมิห้อง ต่อบำรุงชิ้นงานไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อได้ตัวเรือนเครื่องประดับฝังไร้หนามที่บ่มแข็งแล้ว จึงนำตัวเรือนเครื่องประดับฝังไร้หนามไปฝังพลอย โดยพลอยที่เราเลือกใช้จะต้องเป็นพลอยเนื้อแข็ง โดยพลอยในการฝังไร้หนามที่เราเลือกใช้ ได้แก่ บุชรากัม (Yellow Sapphire)



รูปที่ 4.33 1) การทำเครื่องประดับฝังไร้หนาม 2) ตัวเรือนหลังหล่อเครื่องประดับฝังไร้หนาม และ 3) เครื่องประดับที่ฝังไร้หนามที่ฝังด้วยพลอยบุชรากัม (Yellow Sapphire)

บทที่ 5 สรุปผลวิจัย

5.1 สรุปผล

1. อัตราส่วนของทองแดงมีผลต่อสีของชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดงมากที่สุดที่ 6.5% สีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองมาก ส่วนชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดง 6% สีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองแต่อ่อนกว่าองค์ประกอบที่เติมทองแดง 6.5% และชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดง 5.5% สีของต้นชิ้นงานเป็นสีเทาที่มีสีเหลืองบนเล็กน้อย สำหรับชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดงมากที่สุดที่ 6.5% สีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองเข้ม ส่วนชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดง 6% สีของต้นโลหะมีสีออกสีเหลืองแต่อ่อนกว่าองค์ประกอบที่เติมทองแดง 6.5% และชิ้นงานองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al เป็นชิ้นงานที่เติมทองแดง 5.5% สีของต้นชิ้นงานเป็นสีเหลืองปนสีเทาน้อย ขณะที่โลหะผสมอ้างอิง 93%Ag-7%Al สีจะเป็นสีเทาที่น้อยกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง

2. ชิ้นงานหล่อทุกองค์ประกอบ พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ทุกองค์ประกอบ โดยองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) พบว่าเดนไดรต์มีขนาดขาที่ใหญ่กว่าขององค์ประกอบอีกสององค์ประกอบ องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) เดนไดรต์มีลักษณะที่ยาวและเล็ก และองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) พบว่าลักษณะของเดนไดรต์มีขาที่ค่อนข้างสั้นและมีขนาดขาของเดนไดรต์ที่ใหญ่กว่าอีกสององค์ประกอบ ทั้งสามองค์ประกอบจะพบได้ว่าเดนไดรต์จะถูกล้อมรอบด้วยเฟสที่สอง ชิ้นงานหล่อเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ทุกองค์ประกอบ ลักษณะโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al พบว่าขาหลักของเดนไดรต์มีขนาดขาที่ค่อนข้างเล็ก ส่วนโครงสร้างหล่อโลหะผสม 93%Ag-6%Cu-1%Al เดนไดรต์มีลักษณะที่ยาวและใหญ่ และโครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al พบว่ากิ่งที่แตกออกมาจากขาหลักของเดนไดรต์มีลักษณะกิ่งที่ใหญ่ ทุกองค์ประกอบหล่อพบว่รอบๆเดนไดรต์มีเฟสยูเทคติก

3. จากการศึกษาโครงสร้างที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 3 6 และ 9 ชั่วโมง พบว่าไม่เกิดลักษณะโครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์โครงสร้างโลหะผสม 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) และ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปมีลักษณะเกรนที่คล้ายคลึงกันหลังผ่านการบ่มแข็งทุกเวลา กล่าวคือเกรนมีลักษณะใหญ่และพบว่ามี การกระจายตัวของยูเทคติก (Eutectic) และตะกอนขนาดเล็ก (precipitation) เมื่อสังเกตในองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) จะพบได้ว่าจะมีการกระจายตัวของยูเทคติกในเกรนที่มากกว่าองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al(A356) ส่วนองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) จะลักษณะโครงสร้างที่แตกออกไป โดยลักษณะของเกรนจะมีลักษณะที่ค่อนข้างกลม แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งลักษณะของโครงสร้างมีมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenies) มากขึ้นและในโครงสร้างยังพบการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็กทั่วเกรน โครงสร้างชิ้นงานหล่อบ่มแข็งขององค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al พบว่าโครงสร้างทุกชั่วโมงในการบ่มแข็งมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับเดนไดรต์เช่นเดียวกับ องค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al แต่จะพบได้

ว่าโครงสร้างของ 93%Ag-6%Cu-1%Al จะมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างมนกว่า ส่วนโครงสร้างขององค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al พบว่าลักษณะโครงสร้างทุกๆอุณหภูมิในการบ่มแข็ง มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในทุกๆการบ่มแข็ง โดยโครงสร้างมีขนาดที่ใหญ่และพบการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกทั่วเฟสหลัก

4. ในการทดสอบหาความแข็งในชิ้นงานหลังหล่อจะพบได้ว่าการเติม Al(A356) มีผลต่อความแข็งโดยชิ้นงานที่แข็งที่สุดคือชิ้นงานที่เติม Al(A356) มากที่สุดที่ 1.5% คือองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) ความแข็งอยู่ที่ 80.58 วิกเกอร์ ส่วนชิ้นงานหลังบ่มแข็งมีความแข็งสูงสุดคือองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีความแข็งที่ 135.16 วิกเกอร์ จากภาพที่ 4.3 ทำให้สังเกตได้ว่าทุกๆองค์ประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 9 ชั่วโมงพบว่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะลดต่ำลง (Over aging) ความแข็งของชิ้นงานหลังหล่อองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al เป็นชิ้นงานหลังหล่อที่มีความแข็งที่แข็งที่สุดอยู่ที่ 83.67 รองลงมาเป็นชิ้นงานหลังหล่อองค์ประกอบ 93%Ag-6.5%Cu-0.5%Al มีความแข็งอยู่ที่ 69.57 วิกเกอร์ และสุดท้ายคือชิ้นงานหลังหล่อองค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al มีความแข็งอยู่ที่ 68.6 วิกเกอร์ จากการสังเกตโครงสร้างขององค์ประกอบ 93%Ag-6.5% Cu-0.5%Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 6 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ารอบๆเฟสจะพบเฟสของยูเทคติกน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างร่างทุกๆชิ้นงาน จึงสัมพันธ์กับค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีความแข็งที่ต่ำที่สุด 118.1 วิกเกอร์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งทุกๆเวลา และโครงสร้างของชิ้นงาน 93%Ag-5.5% Cu-1.5%Al ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 9 ชั่วโมง เป็นชิ้นงานที่มีการตกตะกอนเป็นจำนวนมากอย่างเห็นได้ชัดที่กำลังขยาย 20X จึงสัมพันธ์กับความแข็งของชิ้นงานที่มีความแข็งสูงที่สุดอยู่ที่ 144.63 วิกเกอร์

5. ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 1 ชั่วโมงของทั้งสามองค์ประกอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000X เมื่อทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่าส่วนผสมทางเคมีธาตุทองแดงมีปริมาณที่มากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 6.823 โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้องค์ประกอบ 93%Ag-6%Cu-1%Al(A356) มีความแข็งที่สุดในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน

6. จากการคำนวณโครงสร้างจุลภาคด้วยโปรแกรมอิมเมจ ทำให้ทราบได้ว่าการเติม Al(A356) ส่งผลให้ชิ้นงานหลังหล่อ ชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์เฟสยูเทคติกมากที่สุดคือองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) โดยมีเฟสยูเทคติกอยู่ที่ 25% ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เติม Al(A356) มากที่สุดอยู่ที่ 1.5% จากกราฟความแข็งของชิ้นงานหลังหล่อ ทำให้เห็นว่าองค์ประกอบ 93%Ag-5.5%Cu-1.5%Al(A356) มีความแข็งที่แข็งที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังหล่อขององค์ประกอบอื่น

7. จากกราฟของค่า a^* และ b^* โดยการใช้เครื่อง Konica Minolta 700d จะสังเกตได้ว่าในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหยาบค่าของ b^* ของทุกชิ้นงานจะมีค่าที่เป็นค่าบวก สรุปได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหยาบจะมีสีที่ออกสีเหลือง โดยมีชิ้นงานที่องค์ประกอบ 93Ag-5.5Cu-1.5Al ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะมีค่า b^* ที่มากที่สุดอยู่ที่ 10.32 กล่าวคือชิ้นงานชิ้นนี้จะมีสีที่ออกสี

เหลืองมากที่สุด และค่า a^* ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบจะมีทั้งชิ้นงานที่เป็นค่าบวกและค่าลบ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความหมองที่ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ค่า a^* และ b^* ของชิ้นงานจะมีค่าที่เป็นค่าบวกและค่าลบผสมกัน ผลการทดสอบค่า a^* และ b^* จากเครื่องมืออาจไม่สอดคล้องกับการสังเกตด้วยตาเปล่า กล่าวคือสีที่เครื่องตรวจวัดได้จะมีความละเอียดกว่าตามนุษย์มองเห็น

8. จากการวัดผลของค่า L^* ในการวัดผลของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบความหมอง ค่าของ L^* ของทุกๆ ชิ้นงานจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยชิ้นงานที่มีความสว่างมากที่สุดคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ $93Ag-6.5Cu-0.5Al$ ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง โดยมีค่า L^* สูงสุดอยู่ที่ 95.76 และชิ้นงานที่มีค่า L^* ต่ำที่สุดคือ ชิ้นงานองค์ประกอบ $93Ag-5.5Cu-1.5Al$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 3 ชั่วโมง โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 90.6 จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ทนทานต่อการทดสอบความหมองได้ดีที่สุดคือชิ้นงานที่มีองค์ประกอบ $3Ag-6.5Cu-0.5Al$ ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง โดนจะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการทดสอบความหมองที่ 1 ชั่วโมงแรกค่าความสว่างของ ชิ้นงานชิ้นนี้มีค่าลดลงน้อยที่สุดคือ 58.96 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบความหมองเป็น 3 และ 9 ชั่วโมง ชิ้นงานชิ้นนี้ยังคงมีค่าความสว่างอยู่ในลำดับต้นๆ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งในเวลาเดียวกันและยังเป็นชิ้นงานที่มีค่าความสว่างที่สว่างมากที่สุดอีกด้วยก่อนที่จะทำการทดสอบความหมอง

9. จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานเต็มโลหะผสมมีความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าโลหะเงินผสมทองแดงและหลังการบ่มความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นในทุกองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามความยืดลดลงหลังจากการบ่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเกรนและการเกิดออกไซด์ในโครงสร้าง

10. ในการเลือกองค์ประกอบที่จะนำมาทำเครื่องประดับตัวเรือนฝังไร้หนาม(Invisible setting) ได้เลือกองค์ประกอบ $93\%Ag-6\%Cu-1\%Al(A356)$ ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ ที่เวลา 1 ชั่วโมง เพราะมีความแข็งสูงที่สุดอยู่ที่ 135.16 HV พลอยที่เลือกใช้เป็นพลอยเนื้อแข็ง คือ บุษราคัม(Yellow Sapphire)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีเฟสขนาดเล็กที่น่าสนใจสามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมได้โดยใช้เทคนิคขั้นสูงอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ควบคู่กับการวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบน

เอกสารอ้างอิง

- Basso, A. "The Tarnishing of Silver Alloys: Causes and Possibilities", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2010, 1-25.
- Battaini, P. and Airoidi, G. Colombo S. (2007). Precipitation Kinetics in Ag-7.5 wt.% Cu Alloy Studied by Isothermal DSC and Electrical-Resistance Measurements. *Journal of Alloys and Compounds*, 437, 107-112.
- Bernard, M.C., Dauvergne, E., Evesque, M., Keddani, M. and Takenouti, H. Reduction of silver tarnishing and protection against subsequent corrosion. *Corros. Sci.* 47 (2005) 663-379.
- Berzins D.W., Sarkar N.K., Ohno H. Kawashima I. (1998). Corrosion of Three Experimental AgMn-Based Casting Alloys. *Dental Materials*, 14, 448-452.
- Boumaza, L. Hamana D. (2009). Precipitation Mechanism in Ag-8 wt.% Cu Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 477, 217-223.
- Cao G.H., Becker A.T., Russell A.M. and Constant, A.P. Herman D.M. (2008). Microstructure and properties of a silver-erbium oxide alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 454, 292-296.
- Chutimun Chanmuang, Wannapha Kongmuang, J.T.H Pearce, และ Torranin Chairuang Sri. (2012). Influence of casting techniques on hardness, tarnish behavior and microstructure of Ag-Cu-Zn-Si sterling silver jewelry alloys. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 19-26.
- Colombo, S., Battaini, P. and Airoidi, G., Precipitation kinetics in Ag-7.5 wt.% Cu alloy studied by isothermal DSC and electrical-resistance measurements. *J. Alloy. Compd.* 437 (2007) 107-112.
- Davis, S. A. "A New Paradigm for Tarnish Testing of Sterling Silver Alloys", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007, 125-148.
- E., Wongsrirkusa, S., Pongsukitwat, S., Lothongkuma, G. Nisaratanaporn. (2007). Study on the Microstructure, Mechanical Properties, Tarnish and Corrosion Resistance of Sterling Silver Alloyed with Manganese. *Materials Science and Engineering A*, 445-446, 663-668.
- Fischer-Buehner, J. "An Update on Hardening of Sterling Silver by Heat Treatment", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2003, 29-47.
- Frey, T. and Kögel, M. Tarnish protection of silver jewels by plasmopolymer coatings. *Surf. Coat. Tech.* 173-174 (2003) 902-904.
- Grimwade, M., Heat Treatment of Precious Metals and Their Alloys, Proceeding of the Fifth Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1991, 241.

- Grimwade, M. "An Investigation into the Practical Application of New Sterling Silver Alloys", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2009, 197-215.
- Guo, W.H., Brantley, W.A., Clark, W.A.T., Monaghan, P. and Mills, M.J., Transmission electron microscopic investigation of a Pd-Ag-In-Sn dental alloy. *Biomaterials* 24 (2003) 1705-1712.
- Herman, D.M., Cao, G.H., Becker, A.T., Russell, A.M. and Constant, A.P. Microstructure and properties of a silver-erbium oxide alloy. *J. Alloy. Compd.* 454 (2008) 292-296.
- Joska, L., Marek, M. and Leitner, J. The mechanism of corrosion of palladium-silver binary alloys in artificial saliva. *Biomaterials* 26 (2005) 1605-1611.
- Johns, P. "Firestain Resistant Silver Alloys", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 1997, 33-61.
- J.T Strauss. (1997). Powder Metallurgy (P/M) Applications in Jewelry Manufacturing. *Proceeding of the Eleventh Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 105.
- Kim G.C., Son K.H., Kwon Y.H. and Kim H.I., Seol H.J. (2005). Hardening Mechanism of an Ag-Pd-Cu-Au Dental Casting Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 387, 139-146.
- Lee D.H., Lee H.K., Takeda Y., Okuno O., Kwon Y.H., Kim H.I. Seol H.J. (2006). Age-Hardening and Related Phase Transformation in an Experimental Ag-Cu-Pd-Au Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 407, 182-187.
- McFarland, J.C., Thomas, F., Age Hardening Silver of Sterling or Higher Standard. (1934). United States Patent Office, no. 1984225.
- Metal hardness. เรียกใช้เมื่อ 1 กรกฎาคม 2557 เข้าถึงได้จาก <http://riograndeblog.com/2012/11/metalhardness-how-to-measure-it-and-why-it-matters-for-silver-alloys/>
- M.R Aldo. (1997). Understanding Sterling Silver. *Proceeding of the Eleventh Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 241.
- M., Heat Treatment of Precious Metals and Their Alloys, *Proceeding of the Fifth Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 1991, 241. Grimwade. (1991). Heat Treatment of Precious Metals and Their Alloys . *Proceeding of the Fifth Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 241.
- Moon, H.M., Seol, H.J., Lee, J.E. and Kim, H.I. Lee H.K. (2004). Age Hardening by Dendrite Growth in a Low-Gold Dental Casting Alloy. *Biomaterials*, 25, 3869-3875.

- Nada R.H. Fawzy A. (2006). Effect of Grain Diameter on the Tensile Characteristics of Thermally Deformed Ag-4.4wt% Cu Alloy. *Physica B*, 371, 5-11.
- Nisaratanaporn, E., Wongsriuksa, S., Pongsukitwat, S., Lothongkum, G., Study on the microstructure, mechanical properties, tarnish and corrosion resistance of sterling silver alloyed with manganese, *Materials Science and Engineering*, 445-446 (2007) 663-668.
- Ohno H., Sarkar N.K. Kawashima I. (2000). Effect of Pd or Au Addition on Age-Hardening in AgMn-Based Alloys. *Dental Materials*, 16, 75-79.
- Park, M.G., Kwon, Y.H., Seol, H.J. and Kim, H.I. Yu C.H. (2008). Phase Transformation and Microstructural Changes during Ageing Process of an Ag-Pd-Cu-Au Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 460, 331-336.
- S.B. Youssef. (1996). Resistometric Study of Ag-8 at % Cu Alloy Aged in the Temperature Range 0.4-0.65 Tm. *Physica B*, 228, 337-341.
- S.C., Sivaramakrishnan, C.S. Dev. (1996). An Indigenous Technology for a Silver Brazing Alloy. *Materials & Design*, 17(2), 75-78.
- Strauss, J.T, Powder Metallurgy (P/M) Applications in Jewelry Manufacturing, Proceeding of the Eleventh Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 1997, 105.
- T.M. Carvalho, A.T. Adorno, และ R.A.G. Silva. (2008). Ag-rich phase formation in the Cu-6 wt% Al alloy with Ag addition. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*(69), 2025-2031.
- Yu, C.H., Park, M.G., Kwon, Y.H., Seol, H.J. and Kim. H.I., Phase transformation and microstructural changes during ageing process of an Ag-Pd-Cu-Au alloy. *J. Alloy. Compd.* 460 (2008) 331-336.
- Zaky, M.A. Role of Cl⁻ in breakdown of Cu-Ag alloys passivity in aqueous carbonate solutions. *Electrochim. Acta.* 51 (2006) 2057-2062.
- สินค้าส่งออก. เรียกใช้เมื่อ 1 กรกฎาคม 2557 เข้าถึงได้จาก http://www.ops3.moc.go.th/export/export_topn_5y/report.asp
- สมชัย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุดมมันน์ แม้น อมรสิทธิ์. (2008). *วัสดุวิศวกรรม*. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.
- สมนึก วัฒนศรีกุล, ศิริพร ดาวพิเศษ, วชิร นายสุวรรณ, สุรัตน์ วรรณศรี, และ เดช เหมือนขาว. (2544). *โครงการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).