



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหล่อโลหะผสมสำหรับเครื่องประดับด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง
Alloy Casting for Jewelry by Semi-Solid Process

ดร.ณัฐพล	ชมแสง	หัวหน้าโครงการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชธนา	พูลทอง	ผู้ร่วมวิจัย

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

รหัสโครงการ 154532
สัญญาเลขที่ 133/2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหล่อโลหะผสมสำหรับเครื่องประดับด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง
Alloy Casting for Jewelry by Semi-Solid Process

ดร.ณัฐพล	ชมแสง	หัวหน้าโครงการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชธนา	พูลทอง	ผู้ร่วมวิจัย

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 133/2557

ขอขอบคุณ นางสาวจุฬารัตน์ จูมครอง สำหรับการช่วยงานวิจัยนี้ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและบริการ จุลทรรศน์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับความช่วยเหลือในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ เจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 93.5% โดยน้ำหนัก หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งของแข็งแบบรางเทเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล โลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อในเตาขดลวดเหนียวนำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เหนือรางเท มุมในการเทตั้งแต่ 30-60° ระยะเท 20-25 เซนติเมตร เพื่อศึกษาผลของมุมและระยะเทต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิง ตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ กล้องจุลทรรศน์แสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์การกระจายตัวพลังงานรังสีเอ็กซ์ ความแข็งของตัวอย่างหลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งมีค่าประมาณ 63-78 HV ตัวอย่างที่มีค่าความแข็งสูงสุดได้แก่ ตัวอย่างหล่อด้วยมุม 45° ระยะเท 20 เซนติเมตร ค่าต้านทานแรงดึงของตัวอย่างดังกล่าวมีค่าประมาณ 104-198 เมกะปาสคาล ตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานสูงสุดได้แก่ ตัวอย่างหล่อด้วยมุม 45° ระยะเท 25 เซนติเมตร โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังหล่อประกอบด้วยเฟสอัลฟาปฐมภูมิ และ โครงสร้างยูเทคติก โดยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและเดนไดรต์ที่สั้นเกิดขึ้นในตัวอย่างหลังหล่อนี้ ภาพ SEM แสดงให้เห็นเฟสอัลฟาที่มีเงินเป็นองค์ประกอบหลักและโครงสร้างยูเทคติกที่มีปริมาณทองแดงสูงขึ้น

Abstract

Semi-solid casting was introduced to improve mechanical properties of sterling silver by sloped cooling plate technique. Ag alloys (93.5 wt %) were cast from an induction furnace at 1000 °C onto a sloped cooling plate. The pouring angles and distances were 30°-60° and 20-25 cm, respectively. Effects of pouring angles and casting distances on microstructure hardness and tensile strength of the sterling silver were investigated. The specimens were checked with Vickers microhardness tester, universal tensile tester, optical microscope (OM), and scanning electron microscope (SEM) with equipped energy dispersive x-ray spectrometer (EDS). Hardness of the as-cast sample from the semi-solid process was about 63-78 HV. Highest hardness was sample cast at 45° angle distance 20 cm. Tensile strength of samples was about 104-198 MPa. Highest tensile strength was sample cast at 45° angle distance 25 cm. The microstructure of the as-cast sample consisted primarily of α -phase and eutectic structure. A spheroidal and short dendrite structure was formed in the as-cast sample. SEM images revealed the α -phase (Ag-rich phase) and eutectic structure (Cu increasing).

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย	3
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	3
1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	4
1.8 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย	5
1.9 งบประมาณของโครงการวิจัย	6
1.10 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง	8
2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง	8
2.3 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อน	8
2.4 สมบัติด้านทานการดึง	9
2.5 การคำนวณปริมาณสัดส่วนของแข็ง	11
2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	11

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 การออกแบบชุดรางเทโลหะกึ่งของแข็ง	17
3.2 การเตรียมชิ้นงานในการหล่อ	19
3.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง	25
3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	25
3.5 การทดสอบแรงดึง	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	29
4.1 การสร้างชุดรางเทรางเทโลหะกึ่งของแข็ง	29
4.2 ผลการทดลองหาสภาวะหล่อโลหะผสมทองแดงเบริลเลียม	29
4.3 ชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อกึ่งของแข็ง	30
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง	31
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย EDS	32
4.6 ความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง	33
4.7 ความต้านทานแรงดึงและความยืดของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	37
5.1 สรุปผล	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน ปีที่1	5
1.2	งบประมาณการวิจัยที่เสนอขอในปีงบประมาณ 2557	6
2.1	ลักษณะเฉพาะของโลหะกึ่งของแข็งสำหรับนำไปใช้งาน	12
2.2	สภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะผสมเงิน	14
3.1	แสดงมุมเอียงและระยะเทที่ใช้ในการหล่อกึ่งของแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง	24

สารบัญรูป

รูป	หน้า	
2.1	แผนภูมิสมดุลของ Ag-Cu	9
2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	10
2.3	ค่าความแข็งกับสัดส่วนของแข็งในเหล็กกล้าคาร์บอนสูงพิเศษ	13
3.1	แบบร่างเทแบบลาดเอียง	17
3.2	ชุดต้นน้ำโลหะ	18
3.3	การเตรียมชิ้นงาน 1) ชิ้นงาน 2) ตันเทียบ และ 3) ครอบอกปูนเหล็กมาครอบตันเทียบ	19
3.4	ขั้นตอนการอบเข้าปูน	20
3.5	กระบวนการหล่อกิ่งของแข็ง	25
3.6	ชุดชิ้นงาน 1) หล่อเรซิน 2) ชุดกระดาษทราย และ 3) ชุดผ้าสักหลาด	25
3.7	กัดกรด	26
3.8	กล้องจุลทรรศน์แสง รุ่น Axiovert 25 ผู้ผลิต Carl Zeiss	26
3.9	กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM 5910L ผู้ผลิต Jeol Co., Ltd.	27
3.10	การทดสอบความแข็ง 1) เครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ ESEWAY รุ่น 400 series และ 2) ตำแหน่งการกด 5 ตำแหน่ง	27
3.11	เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น LR10K ผู้ผลิต LLOYD Instruments	28
4.1	ชุดร่างเทหล่อโลหะกิ่งแข็ง (1) ร่างเท และ (2) ชุดอัดน้ำโลหะเข้าแบบหล่อ	29
4.2	โครงสร้างโลหะ Cu-12%Sn ที่หล่อด้วยกระบวนการกิ่งของแข็ง	30
4.3	ชิ้นงานหล่อกิ่งของแข็งที่ระยะเท 20 เซนติเมตรโดยมีมุม 1) 30° 2) 45° และ 3) 60° และ ระยะเท 25 เซนติเมตรโดยมีมุม 4) 30° 5) 45° และ 6) 60°	30
4.4	ชิ้นงานหล่อกิ่งของแข็งสำหรับทดสอบแรงดึง หล่อที่ระยะเท 20 เซนติเมตรโดยมีมุม 1) 30° 2) 45° และ 3) 60° และ ระยะเท 25 เซนติเมตรโดยมีมุม 4) 30° 5) 45° และ 6) 60°	31
4.5	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อที่มุมแตกต่างกัน (1-3) เตรียมที่ระยะเท 20 เซนติเมตร และ (4-6) เตรียมที่ระยะเท 25 เซนติเมตร	32
4.6	ตัวอย่างเงินสเตอร์ลิงหล่อที่มุม 60° ภาพ 1) BSE 2) การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเคมีแบบจุดและตารางปริมาณธาตุ	34
4.7	ความแข็งเฉลี่ยทดสอบด้วยความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อด้วยกระบวนการกิ่งแข็งที่มุมและระยะเทต่างกัน	35
4.8	ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อด้วยกระบวนการกิ่งแข็งที่มุมและระยะเทต่างกัน	36
4.9	เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อด้วยกระบวนการกิ่งแข็งที่มุมและระยะเทต่างกัน	36

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่มียอดส่งออกอยู่ในอันดับต้นของไทย และน่าจะมีมูลค่าการส่งออกประมาณ 300,000 ล้านบาท จากข้อมูลของกระทรวงพาณิชย์ จากปัจจัยที่ประเทศไทยมีความได้เปรียบทางด้านแรงงานฝีมือ คุณภาพของอัญมณี และค่าดำเนินการไม่สูงมากนัก ทำให้ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับอยู่ในลำดับต้นๆ แต่อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมนี้ยังต้องการการพัฒนาเทคนิคและสินค้าใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดที่มีเพิ่มมากขึ้น

โลหะที่ใช้ทำตัวเรือนเครื่องประดับนั้นมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าอัญมณี อาทิเช่น เครื่องประดับเงินเป็นหนึ่งในเครื่องประดับที่มีการส่งออกมากชนิดหนึ่ง จากข้อมูลการส่งออกของศูนย์ข้อมูลอัญมณีและเครื่องประดับ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติแสดงการส่งออกไปยังตลาดสหรัฐอเมริกาและเยอรมัน ในช่วงสองไตรมาสแรกของปี 2553 มีมูลค่าสูงขึ้น จุดเด่นของเครื่องประดับเงินคือ มีความมันวาวหลังจากการขัดเงา เนื่องจากโลหะเงินมีสมบัติในการสะท้อนแสงได้สูง และมีราคาถูกกว่าโลหะมีค่าชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามราคาโลหะเงินก็มีมูลค่าสูงขึ้นตามราคาทองคำในปัจจุบันและมีการเก็งกำไรทำให้ราคาผันผวน นอกจากนี้โลหะที่ใช้ทำเครื่องประดับสามารถใช้โลหะที่ราคาถูก เช่น ทองเหลือง โลหะผสมทองแดง หรือโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นต้น

โลหะที่ใช้ทำเครื่องประดับนั้นต้องสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (Silver Sterling) ที่ประกอบด้วย 92.5%เงิน และ 7.5%ทองแดง เป็นโลหะผสมที่ใช้ทำเครื่องประดับได้ดีสามารถผลิตโดยการหล่อ (Casting) การรีด (Rolling) การปั๊มขึ้นรูป (Stamping) การดึงขึ้นรูป (Drawing) การฉีดยกขึ้นรูป (Extruding) การเชื่อม (Welding) การขึ้นรูปจากโลหะผง (Powder metallurgy) และการพ่นเคลือบ (Thermal spraying) (Strauss, 1997) โดยกระบวนการหล่อนั้นถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับการผลิตเครื่องประดับและต้องใช้ความรู้ทางโลหะวิทยา ยกตัวอย่างการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงต้องใช้แผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu ในการอธิบายถึงโครงสร้างหลังการแข็งตัว เนื่องจากการหล่อโลหะที่สมบูรณ์นั้นไม่สามารถรู้ได้จากการปฏิบัติเพียงอย่างเดียว (Aldo, 1997) สำหรับแผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu โดย Ag จะแทนด้วยวัฏภาคแอลฟา และ Cu จะแทนด้วยวัฏภาคเบต้า

การปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติโลหะเงินและโลหะอื่นๆ สำหรับเครื่องประดับนั้นสามารถใช้กระบวนการผลิตเข้ามาช่วยได้ โดยกระบวนการหล่อที่นำสนใจอย่างการหล่อกึ่งของแข็งซึ่งค้นพบโดย P.Spenser (Fan, 2002) การหล่อกึ่งของแข็งจะเปลี่ยนโครงสร้างเดนไดรต์เป็นทรงกลม (Chomsaeng, 2010) ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่นเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีความแข็งแรงและทนต่อการสึกหรอสูงขึ้น (Poolthong N., 2004) กระบวนการหล่อนี้มีหลายวิธี เช่น การกวนโลหะด้วยเครื่องกล การกวนโลหะด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้ฟองแก๊ส และการใช้รางเอียงเทเป็นต้น (Poolthong, 2004) สำหรับกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้รางเอียงเทเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนในการเตรียมเครื่องมือที่ไม่สูงมากและได้ผลดีหากควบคุมสภาวะการหล่อดี การวิจัยนี้จึง

เลือกใช้วิธีดังกล่าวในการปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโลหะเงินผสมในการทำเครื่องประดับ

นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพในโลหะเงินสเตอร์ลิงให้ดีขึ้นตามความต้องการทำได้โดยใช้การปรับปรุงด้วยความร้อน วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรง และลดความเค้นตกค้างในโลหะ การปรับปรุงด้วยความร้อนนั้นมีหลายวิธีแต่ในโลหะเงินหรือโลหะอื่น ๆ ที่มีแผนภูมิวิภาคแบบเดียวกันนี้ จะเรียกรูปการปรับปรุงด้วยความร้อนว่า การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitate hardening) หรือ การบ่มแข็ง (Age hardening) (Grimwade, 1991)

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคูโครงสร้างและสมบัติเหล่านี้หลังการหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งของแข็งและหลังผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน ซึ่งการวิจัยนอกจากสามารถส่งเสริมองค์ความรู้พื้นฐานของโลหะเครื่องประดับที่มีอยู่และการสร้างองค์ความรู้ใหม่ ในการเข้าใจถึงพฤติกรรมของโลหะสำหรับทำเครื่องประดับแล้ว ยังเป็นการพัฒนาศักยภาพทั้งทางวิชาการของกระบวนการผลิตโลหะมีค่า และส่งเสริมการพัฒนาในอุตสาหกรรมเครื่องประดับของไทยให้มีศักยภาพแข่งขันกับต่างประเทศ เพื่อนำไปสู่อุตสาหกรรมชั้นนำของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ออกแบบกระบวนการหล่อกึ่งของแข็งสำหรับโลหะเงินผสมและโลหะราคาถูกที่ใช้ทำเครื่องประดับ
2. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะสำหรับเครื่องประดับ
3. ศึกษาอิทธิพลการบ่มแข็งต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโลหะสำหรับเครื่องประดับ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. หล่อโลหะผสมเงินด้วยกระบวนการกึ่งของแข็งด้วยวิธีรางเอียงเท
2. การหล่อกึ่งของแข็งจะหล่อโลหะผสมเงินที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสำหรับเครื่องประดับ หลังการหล่อและปรับปรุงด้วยวิธีบ่มแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยลดปัญหาการหดตัวที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องของโลหะเงินผสมในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ซึ่งสามารถนำข้อมูลจากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเครื่องประดับ
2. เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเครื่องประดับให้สามารถควบคุมการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดปัญหาความเสียหาย
3. นำกระบวนการหล่อที่ได้ไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
4. องค์ความรู้ที่ได้จะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้ประกอบการขนาดเล็ก ขนาดกลาง ตลอดทั้งอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

5. เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการและการนำเสนอผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกประเทศ
6. เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานในการเรียนการสอนของนิสิต และเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยองค์ความรู้เรื่องโลหะมีค่าและกลุ่มนักวิจัยองค์ความรู้เรื่องการหล่อโลหะ ผู้ประกอบการด้านเครื่องประดับ และเป็นประโยชน์โดยตรงต่อหน่วยงานที่ทำการวิจัยได้แก่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี และ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

โครงการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะถ่ายทอดผลงานวิจัยสู่ภาคเอกชนและวิชาการกลุ่มเป้าหมาย คือ ผู้ประกอบการเครื่องประดับทุกขนาด นิสิต และนักวิจัยทางด้านการพัฒนาวัสดุและการหล่อโลหะ

วิธีการถ่ายทอด ร่วมแสดงผลงานในสัมมนาสำหรับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ทั้งในระดับภูมิภาค ส่วนกลาง และระดับประเทศ และร่วมแสดงผลงานในการอบรมสัมมนาของกลุ่มนักวิจัยการพัฒนาวัสดุและโลหะวิทยา เช่น งานแสดงนิทรรศการในงานบางกอกเจมส์ แอนด์ จิวเวลรี่แฟร์ ที่คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรีได้เข้าร่วมเป็นประจำทุกปี

การเผยแพร่โดยการตีพิมพ์งานวิจัยในวารสารวิชาการทั้งระดับประเทศและระดับนานาชาติ โดยคาดว่าจะสามารถตีพิมพ์ได้ อย่างน้อย 1 หัวข้อ คือ “สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินหล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง” ซึ่งคาดว่าจะสามารถตีพิมพ์ได้ในวารสาร Materials Science and Engineering A หรือ Journal of Alloys and Compounds และนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการของสมาคมจุลทรรศน์ศาสตร์แห่งประเทศไทย งานโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย หรืองานประชุมวิชาการด้านการปรับปรุงด้วยความร้อนระดับนานาชาติ

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

การดำเนินการวิจัยจะแบ่งเป็น 1) การออกแบบและสร้างชุดรางเอียงสำหรับหล่อ และ 2) เตรียมชิ้นงานหล่อโลหะผสมเงินและการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งการออกแบบและสร้างชุดรางเอียงสามารถดำเนินการที่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี และ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับเตรียมชิ้นงานโลหะผสมเงินจะหลอมด้วยระบบสุญญากาศก่อนเทผ่านรางเท การบ่มแข็ง และการทดสอบความแข็ง สามารถดำเนินการที่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี สำหรับการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือชนิดต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบแรงดึง สามารถดำเนินการได้ที่ คณะทันตแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และองค์ประกอบของวัฏภาค (Phase) ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) สามารถดำเนินการ ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์วิจัย

และบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
2. จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์
3. ออกแบบและสร้างชุดรางเอียงเทเพื่อใช้กับเครื่องหล่อสุญญากาศที่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
4. หลอมโลหะผสมเงินโดยมีสัดส่วนเงิน 93.5 %โดยน้ำหนัก ในเตาหล่อระบบสุญญากาศ ที่ อุณหภูมิ 1000-1025 °C จากนั้นเทผ่านรางเอียง
5. ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะถูกเตรียมให้มีขนาด 15x15x3 มม. สำหรับทดสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะสัณฐานเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) วัดความแข็ง ด้วยเครื่องวัดความแข็ง (Hardness Tester) รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคและลักษณะสัณฐานวิทยาของเฟส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ทั้งสภาพหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง นอกจากนี้ยังเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 หรือ ISO 6871
6. ทำการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 1 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 300-500°C เวลา 0.5-2 ชั่วโมง
7. เปรียบเทียบความแข็ง โครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาของเฟส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เทคนิค SEM-EDS
8. ทดสอบแรงดึงชิ้นงานโลหะผสมเงินหล่อที่เตรียมตามมาตรฐานที่กล่าวมาแล้วข้างต้นด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester)
9. อภิปรายผลการทดลองจากการทดสอบความแข็ง ค่าต้านทานแรงดึงต่อโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการบ่มแข็ง ในส่วนผสมและสภาวะต่าง ๆ ของโลหะผสมเงิน
10. เขียนรายงานสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะและเตรียมผลงานเพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการและการตีพิมพ์ทั้งในวารสารวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ
11. นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่ผู้สนใจและผู้เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องประดับ

1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีกำหนดระยะเวลา 2 ปี สำหรับรายงานฉบับนี้แสดงเฉพาะในแผนงานปีที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดและแผนการดำเนินงานดังนี้

แผนงานปีที่ 1

ในปีที่ 1 นี้ ออกแบบและสร้างรางเอียงเทเพื่อนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องหล่อสุญญากาศของคณะฯ โดยการออกแบบจะคำนึงถึงระยะทางที่น้ำโลหะไหลผ่านรางจากนั้นทดลองหล่อโลหะเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมและตรวจสอบโครงสร้าง

- ศึกษาและค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- ออกแบบรางเอียงด้วยโปรแกรม Rhinoceros

- จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการสร้างรางเอียง
- สร้างและประกอบรางเอียงเข้ากับเครื่องหล่อสุญญากาศยี่ห้อ Indutherm รุ่น VC400
- หาสภาวะหล่อที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเท และเวลาในการเท
- หล่อโลหะผสมเงินสำหรับเครื่องประดับ โดยขนาดชิ้นงาน 15x15x3 มม. เพื่อนำไปทดสอบโครงสร้างและความแข็ง สำหรับการทดสอบแรงดึงจะเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 หรือ ISO 6871
- ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัญญาณของภูมิภาคในโลหะผสม ด้วย OM และ SEM รวมถึงการตรวจสอบองค์ประกอบของภูมิภาคด้วยเทคนิค EDS
- รวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในรายงานผลการวิจัย โดยมีแผนการดำเนินงานปีที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน ปีที่1

แผนการดำเนินงาน	ปีที่ 1 (เดือน)					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
1. ศึกษา ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล						
2. ออกแบบรางเอียง						
3. จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์						
4. สร้างและประกอบชุดรางเอียง						
5. หาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อชิ้นงานตัวอย่าง						
6. หล่อชิ้นงานทดสอบโครงสร้าง ความแข็ง และแรงดึงที่อุณหภูมิ 1050°C						
7. ตรวจสอบเฟสและโครงสร้างจุลภาคด้วย OM และ SEM ก่อนการบ่มแข็ง						
8. เปรียบเทียบวิเคราะห์ผลการทดลอง						
9. สรุปและเขียนรายงานผลการวิจัย						

1.8 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย

เนื่องจากการคณะรัฐมนตรี มหาวิทยาลัยบูรพา เป็นหน่วยงานที่มีการเรียนการสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ประชาชน พร้อมทั้งให้บริการแก่ภาคเอกชนอยู่แล้วนั้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ทางผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยโดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน เช่น เตาทอโลหะ เต้าไฟฟ้าเพื่อบ่มแข็ง การทดสอบความแข็งจุลภาค และกล้องจุลทรรศน์แสง ที่ติดตั้ง ณ คณะรัฐมนตรี มหาวิทยาลัยบูรพาได้ ส่วนการทดสอบแรงดึงและการศึกษาโครงสร้าง สามารถดำเนินการ ณ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ (EMRSc) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หรือ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางส่วน นอกจากนี้ยังมีสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนับสนุนการออกแบบการสร้างสรรค์งานเชิงศิลปะสำหรับกระบวนการหล่อ
กึ่งของแข็ง

1.9 งบประมาณของโครงการวิจัย

รวมตลอดโครงการ 411,000 บาท (สี่แสนหนึ่งหมื่นหนึ่งพันบาทถ้วน)

รายละเอียดงบประมาณการวิจัยจำแนกตามงบประมาณประเภทต่างๆ[ปีงบประมาณ 2557] โดยมี
รายละเอียดงบประมาณ 2557 แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 งบประมาณการวิจัยที่เสนอขอในปีงบประมาณ 2557

รายการ	ปีที่ 1 พ.ศ. 2557 จำนวนเงิน (บาท)
1. งบบุคลากร	
- ค่าตอบแทนผู้วิจัย	25,000
- ค่าตอบแทนผู้ช่วยวิจัย	15,000
2. งบดำเนินการ	
2.1 วัสดุใช้สอยและวัสดุ	
2.1.1 ค่าใช้สอย เช่น	10,000
1) ค่าใช้เครื่องมือและวิเคราะห์ตัวอย่าง	10,000
2) ค่าเบี้ยเลี้ยง ค่าเช่าที่พัก ค่าพาหนะ	15,000
3) ค่าซ่อมแซมครุภัณฑ์	10,000
4) ค่าจ้างเหมาบริการ	5,000
5) ค่าใช้สอยในการสัมมนา	5,000
6) ค่าจัดทำรายงาน	40,000
7) ค่าใช้สอยอื่น ๆ	1,000
2.1.2 ค่าวัสดุ เช่น	30,000
1) โลหะเงิน	20,000
2) โลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง	
3) วัสดุในการสร้างรางเอียงเท	3,000
4) วัสดุสิ้นเปลืองสำหรับตัดและขัดตัวอย่าง เช่น กระดาษ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ผงขัดอลูมินา ผงขัดเพชร เรซิน แก๊ส อาร์กอน	3,500
5) วัสดุสำนักงาน	22,500
6) วัสดุอื่น ๆ	
2.2 ค่าสาธารณูปโภคสำหรับมหาวิทยาลัย 10%	
รวมงบประมาณที่เสนอขอปีที่ 1	225,000

ทั้งนี้ ขออภัยได้ทุกหมวดตามความจำเป็น

1.10 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการสำเร็จขั้นกลาง ผลจากการศึกษาวิจัย เป็นการพัฒนางองค์ความรู้ พัฒนาเทคโนโลยี และพัฒนาอุตสาหกรรม ผลจากการศึกษาจะสามารถเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เป็นการลดต้นทุนในการผลิต สร้างองค์ความรู้ และพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศ ให้มีศักยภาพสูงขึ้น

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง

หลักการของกระบวนการกึ่งของแข็งคือการทำให้เกิดเกรนขนาดเล็กกลม สามารถทำได้โดยการกวนน้ำโลหะในช่วงกึ่งของแข็งก่อนการแข็งตัว โดยจะใช้กลไกทางกลทำให้เดนไดรต์ที่เริ่มแข็งตัวเกิดการหักเป็นชิ้นเล็กๆเมื่อโลหะเย็นตัวลงเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม ปัจจัยหลักที่ต้องควบคุมคือการลดการไหลวนของน้ำโลหะก่อนลงแบบเนื่องจากการไหลวนจะทำให้เกิดฟองอากาศภายในสมบัติเชิงกลจะลดลง นอกจากนี้กระบวนการหล่อนี้ลดการหดตัวเนื่องจากก่อนน้ำโลหะเย็นตัวอย่างสมบูรณ์ในแบบหล่อได้เกิดของแข็งบางส่วนก่อนแล้ว และยังช่วยยืดอายุของแบบหล่อเนื่องจากน้ำโลหะเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีอุณหภูมิลดลงก่อนที่จะถึงแบบหล่อ (Chomsaeng, 2010)

2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

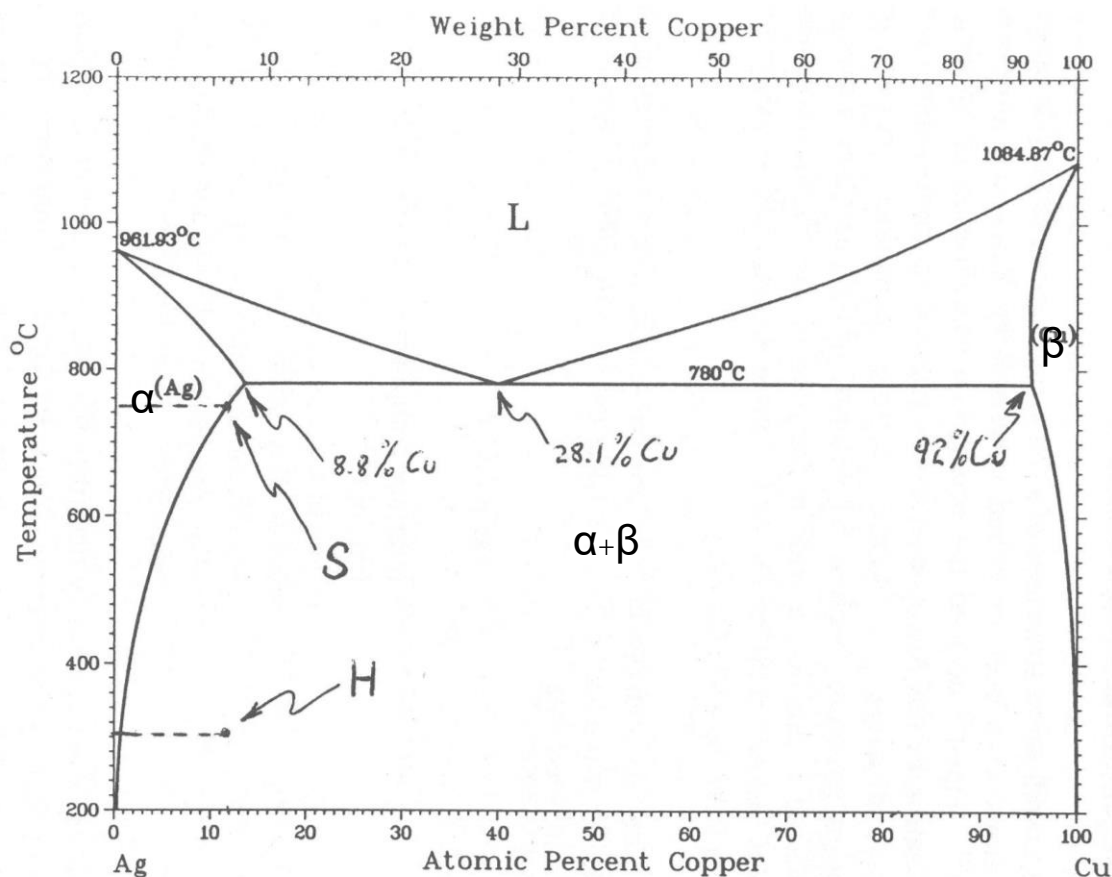
โลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงจะใช้แผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu ในการอธิบายถึงโครงสร้างหลังการแข็งตัว สำหรับแผนภูมิวัฏภาคของ Ag-Cu แสดงดังรูปที่ 2.1 จากแผนภูมิ Ag จะแทนด้วยวัฏภาคแอลฟา และ Cu จะแทนด้วยวัฏภาคเบต้า ซึ่ง Cu สามารถละลายในเงินได้ไม่เกิน 8.8%Cu ระหว่างการแข็งตัว หากมากกว่านั้นจะเกินเป็นวัฏภาคเบต้า ในเงิน และที่ 28%Cu เมื่อโลหะเย็นตัวผ่านเส้นแบ่งระหว่างของแข็งและของเหลวที่อุณหภูมิ 780°C ก็จะทำให้เกิดวัฏภาคยูเทคติกระหว่างแอลฟาและเบต้า ทันที กลไกการแข็งตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อ ที่องค์ประกอบ 8.8%Cu จะเกิดเดนไดรต์ของเงินก่อน เมื่อเย็นตัวลงมาถึงตามเส้น Solidus จนถึงอุณหภูมิประมาณ 780°C ก็จะทำให้เกิดยูเทคติกของ Cu-rich กับ Ag ในโลหะเหลวที่ยังเหลืออยู่ และเมื่อเย็นตัวลงอย่างสมบูรณ์ก็เกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติกกระจายตัวระหว่างเดนไดรต์

2.3 การปรับปรุงโลหะด้วยความร้อน

การปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพในโลหะเงินสเตอร์ลิงให้ดีขึ้นตามความต้องการทำได้โดยใช้การปรับปรุงด้วยความร้อน วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และลดความเค้นตกค้างในโลหะ การปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะเงินหรือโลหะอื่นๆที่มีแผนภูมิวัฏภาคแบบเดียวกันนี้ จะใช้การปรับปรุงด้วยความร้อนที่เป็นการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitate hardening) หรือ การบ่มแข็ง (Age hardening) ซึ่งขั้นตอนการบ่มแข็งในโลหะผสมเงินจากการศึกษาของ Grimwade (Grimwade, 1991) มีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) หรือการอบละลาย (Solution treatment) โดยให้อุณหภูมิเหนือจุด S (Solvus temperature) ประมาณ 745°C ในรูปที่ 2.1 เพื่อให้ได้สารละลายของแข็งเนื้อเดียวกัน
- 2) ตามด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อป้องกันวัฏภาค Cu-rich กลับมาตกตะกอนหรือเกิดเป็นนิวเคลียสใหม่ จะได้วัฏภาคสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) ซึ่งไม่เสถียร

- 3) ให้ความร้อนกับวัสดุศาสตร์ละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดอีกครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุด H ในรูปที่ 2.1 เรียกขั้นตอนนี้ว่าการบ่ม (Ageing) ที่อุณหภูมิต่ำๆ อะตอมของ Cu จะมารวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง การบ่มควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำและควรใช้เวลาในการบ่มนาน สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงใช้อุณหภูมิในการบ่มประมาณ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของ Ag-Cu (Aldo, 1997)

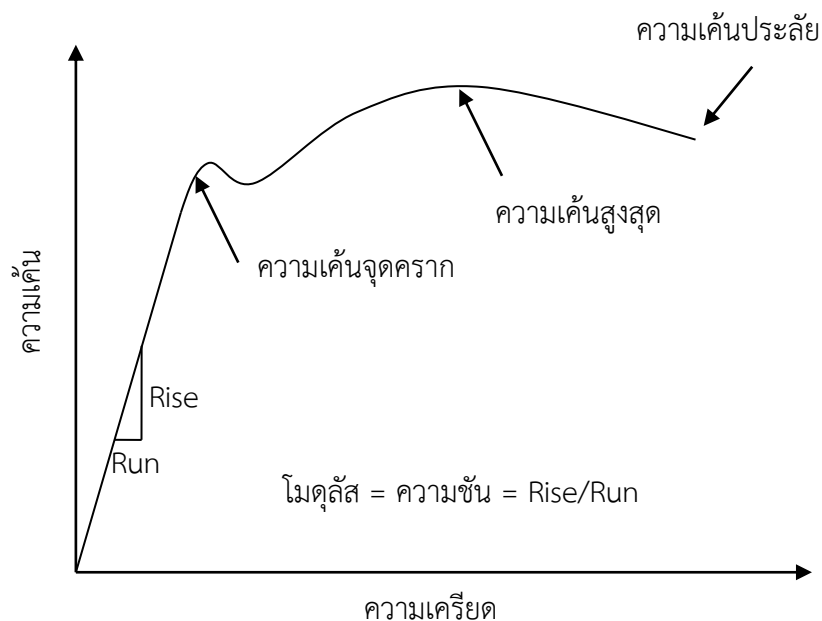
2.4 สมบัติต้านทานการดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบแบบทำลายโดยการดึงชิ้นงานให้ขาด โดยให้ความเร็วในการดึงแบบช้าและคงที่ การทดสอบนี้เป็นวิธีประเมินความแข็งแรงของโลหะ ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติ ความเค้นจุดคราก ความเครียด ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น ความเค้นประลัย และความเหนียว เป็นต้น (แมน อมรสิทธิ์, 2008), (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัยม, 2550)

- 1) ความเค้นจุดคราก (Yield strength) คือ ความเค้นที่โลหะเปลี่ยนแปลงรูปจากแบบยืดหยุ่น (Elastic) ไปเป็นแบบถาวร (Plastic) ตำแหน่งจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.2 การหาค่าความเค้นจุดครากที่ตำแหน่งแน่นอนบนกราฟเป็นไปได้ยากดังนั้นจึง

กำหนดให้ลากเส้นตรงขนานกับเส้นกราฟช่วงเส้นตรงแรก โดยเริ่มที่ตำแหน่งเส้นความเครียดประมาณ 0.2% เมื่อเส้นนี้ตัดกับเส้นกราฟก็จะได้จุดคราก หรือเรียกจุดที่ได้นี้ว่าความเค้นพิสูจน์ ซึ่งความเค้นจุดครากมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตรหรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว

- 2) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) หรือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 จะเกิดหลังจากที่โลหะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหลังจุดคราก ความต้านทาน



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

แรงดึง เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะจะสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ในวัสดุที่เปราะค่าความเค้นสูงสุดจะเท่ากับค่าความเค้นจุดครากหรือความเค้นประลัย แต่จะมีค่าความเค้นเหล่านี้สูงกว่าวัสดุเหนียว มีหน่วยเดียวกันกับความเค้นจุดคราก

- 3) โมดูลัส (Modulus) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) เป็นความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะที่มีแรงมากระทำ และเมื่อเอาแรงที่กระทำออกโลหะจะกลับมาสู่สภาพเดิม เรียกว่าการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) โมดูลัสหาได้จากค่าความชันระหว่างความเค้นต่อความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร

- 4) ความเค้นประลัย (Fracture strength) เป็นความเค้นที่ทำให้โลหะแตกหัก เกิดที่ปลายกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในรูปที่ 2.2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโลหะผสมเงินสำหรับเครื่องประดับโดยทั่วไปนั้น มีส่วนผสมระหว่างเงิน 92.5% และทองแดง 7.5%โดยน้ำหนัก การปรับปรุงด้วยกระบวนการผลิตแบบกึ่งของแข็งและการปรับปรุงความร้อนซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงศึกษาถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินหลังจากการหล่อกึ่งของแข็งและหลังการ

ปรับปรุงด้วยความร้อน โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 700-800°C เวลา 1 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 0.5-4 ชั่วโมง และเปรียบเทียบผลการบ่มแข็งที่สภาวะต่าง ๆ

2.5 การคำนวณปริมาณสัดส่วนของแข็ง

ขณะเกิดกระบวนการแข็งตัวของโลหะ ปริมาณสัดส่วนของของแข็งที่อุณหภูมิต่าง 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

การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง

ประโยชน์และการใช้งานของโลหะกึ่งของแข็งแสดงดังตารางที่ 2.1 โลหะเบาเป็นโลหะที่นิยมหล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็งเนื่องจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติ โลหะอะลูมิเนียมเป็นที่ยอมรับนำมาศึกษาด้วยกระบวนการหล่อนี้โดยใช้วิธีการที่ต่างกันไป ซึ่งมากจากความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนที่หล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็งหลายล้านชิ้นเพิ่มมากขึ้นทุกๆปี (Liu, 2004) การหล่ออะลูมิเนียมเกรด A201 ด้วยวิธีหล่อกึ่งของแข็งแบบ Thixoforming นั้นแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางโลหะวิทยาดีเยี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับหล่ออะลูมิเนียมแบบดั้งเดิม (Liu, 2004), (Kapranos, 2007) จากการศึกษาการหล่ออะลูมิเนียม A356 ด้วยวิธีการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ากวนโลหะและผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนพบว่าค่าความเค้นจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างการปรับปรุงด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 160 และ 200°C ไม่แตกต่างกันมากแต่ความเหนียวแตกต่างกันอย่างมาก (Cavaliere P., 2004) อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่าหากหล่ออะลูมิเนียม A356 T6 ด้วย Thixoextrude เปรียบเทียบกับการหล่อใช้แบบหล่อถาวร (Freitas, 2004) นอกจากนี้ยังมีการหล่อกึ่งของแข็งแบบ

Rheocasting ซึ่งมีค่าการยึดตัวต่ำกว่าแบบ Thixocasting ประมาณ 1-2% ในการหล่ออะลูมิเนียม A357 T5 และ T6 แต่สูงกว่าการหล่อแบบดั้งเดิม 2-5% (Basner, 2000) เมื่อไม่นานมานี้มีการพัฒนาวิธีการหล่อกึ่งของแข็งโดยใช้ฟองแก๊สขนาดเล็กในการกวนน้ำโลหะเหลวของ A357 ก่อนการแข็งตัว ซึ่งทำให้ได้เกรนละเอียดเป็นเนื้อเดียวโดยการควบคุมการเย็นตัวของโลหะหลอม อัตราส่วนปริมาตรของแข็ง และการไหลตัวของแก๊ส (Wannasin, 2006)

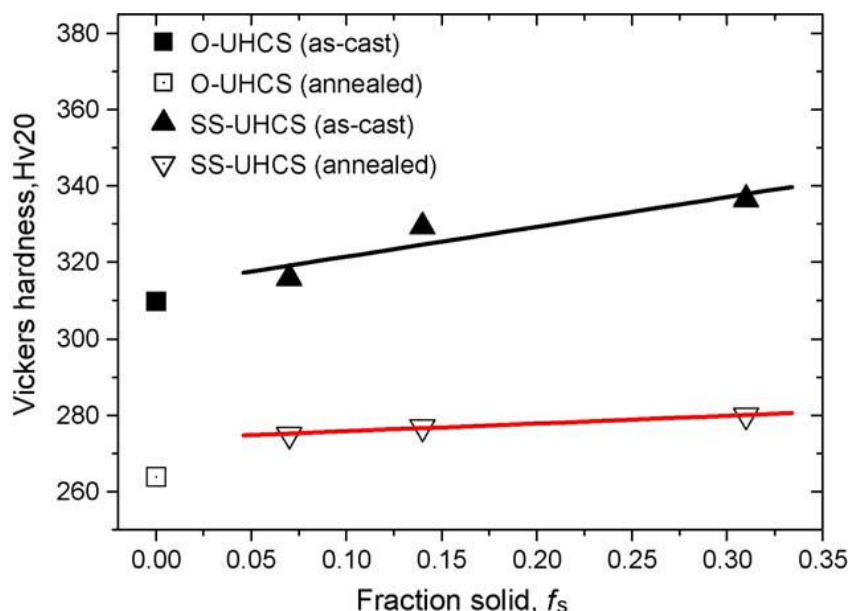
การหล่อกึ่งของแข็งสามารถหล่อเหล็กสำหรับเครื่องปัมน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ โดยใช้วิธีขึ้นรูปจากแท่งเหล็กผ่านกระบวนการ Thixocasting พบว่ามีปริมาณของยูเทคติก 30-50% และมีความแข็งแรงหลังปรับปรุงด้วยความร้อนอยู่ในช่วง 400-1000 Mpa (Tsuchiya, 2003) นอกจากนี้โลหะโครเมียมสูงที่ทนต่อการกัดกร่อนสามารถหล่อได้ด้วยวิธีนี้ จากการเปรียบเทียบโลหะโครเมียมสูง 18wt%Cr และ 27wt%Cr หลังผ่านการอบละลายและอบคืนตัวพบว่าค่าความแข็งของ 27wt%Cr สูงกว่า 18wt%Cr และหล่อแบบดั้งเดิม เนื่องจากโครงสร้างหลักที่เป็นมาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิซึ่งทำให้ลดดอสเทนไนต์ตกค้าง (Wiengmoon, 2007) การหล่อเหล็กกล้าคาร์บอนสูงพิเศษด้วยกระบวนการกึ่งของแข็งแบบรางเอียงแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งสูงกว่าการหล่อแบบดั้งเดิม และหลังการอบอ่อน ความแข็งนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Ramadan, 2006) แสดงดังรูปที่ 2.3

สำหรับโลหะผสมอื่นๆที่สามารถหล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง เช่น Sn-15wt%Pb and Mg-30wt%Zn หล่อด้วยกระบวนการ twin-screw rheomoulding โดย Fan and Bevis (Fan, 2002) พบว่าอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักที่มีขนาดเท่าๆกัน ซึ่งเป็นการค้นพบที่เป็นประโยชน์เพราะได้โครงสร้างและองค์ประกอบเคมีที่สม่ำเสมอในชิ้นงานตัวอย่าง การหล่อนี้ยังอาจเหมาะสำหรับโลหะผสมแมกนีเซียมซึ่งใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์ เนื่องจากข้อจำกัดการหล่อโลหะผสมชนิดนี้ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยอย่างเข้มงวดจากการที่ติดไฟได้ง่ายหากหล่อแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะของโลหะกึ่งของแข็งสำหรับนำไปใช้งาน (Figueredo, 2001)

ลักษณะเฉพาะ	ประโยชน์และการใช้งาน
ความร้อนแฝงน้อยกว่าโลหะเหลว	การขึ้นรูปความเร็วสูง การหล่อต่อเนื่องแบบความเร็วสูง การสีหรือแม่พิมพ์หล่อต่ำ การขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล็ก การขึ้นรูปวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง
การมีส่วนที่เป็นของแข็งก่อนที่จะเต็มลงในแม่พิมพ์	หลีกเลี่ยงการหดตัว ลดการป้อนโลหะน้อยลง ลดการตกตะกอนขนาดใหญ่ในโลหะ โครงสร้างละเอียด

ความเหนียวสูงกว่าของเหลว	ลดการดึงฟองอากาศจากแม่พิมพ์ ลดการเกิดออกไซด์ ลดการกระแทกในแม่พิมพ์ การขึ้นรูปได้รวดเร็ว ปรับปรุงผิวสุดท้าย
ความเค้นการไหลต่ำ	การขึ้นรูปขึ้นส่วนซับซ้อน การขึ้นรูปขึ้นส่วนได้เร็ว การลดค่าการขึ้นรูปขึ้นส่วนให้ต่ำ การขึ้นรูปต่อเนื่องทำให้เร็วขึ้น
สามารถใช้กับวัสดุอื่นๆ	วัสดุผสม



รูปที่ 2.3 ค่าความแข็งกับสัดส่วนของแข็งในเหล็กกล้าคาร์บอนสูงพิเศษ (Ramadan, 2006)

การหล่อโลหะเงินและการปรับปรุงด้วยความร้อน

โลหะเงินนั้นสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น วัสดุอุดฟันทางทันตกรรม ตัวประสานใน วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องประดับ เป็นต้น ดังนั้นโลหะเงินหล่อจึงมีหลายองค์ประกอบแล้วแต่ การนำไปใช้ อย่างไรก็ตามเอกสารสำหรับอ้างอิงทางโลหะวิทยาและสมบัติของโลหะเงินที่ใช้ทำ เครื่องประดับยังมีไม่มากเมื่อเทียบกับโลหะเงินกลุ่มอื่นๆ จึงจำเป็นต้องรวบรวมเอกสารเพิ่มเติมด้าน วิธีการหล่อและการปรับปรุงด้วยความร้อนจากโลหะเงินที่นำไปใช้งานด้านอื่น ซึ่งมีวิธีการหล่อหรือ ปรับปรุงด้วยความร้อนไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากมีโลหะเงินเป็นธาตุหลักเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม การหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงจะหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 990°C แต่การหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม

แมงกานีส (Mn) เพื่อต้านทานการหมองและเพิ่มความแข็งแรง โดยจะหลอมที่ 1030°C เนื่องจากแมงกานีสมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า (Nisaratanaporn, 2007) นอกจากแมงกานีสแล้วยังมีธาตุเจืออื่นๆ ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติในระหว่างการหล่อขึ้นรูปได้ อย่าง สังกะสี (Zn) ซิลิกอน (Si) เจอเมเนียม (Ge) อิริเดียม (Ir) และโบรอน (B) ภายหลังจากการหล่อแล้วสามารถนำโลหะเงินไปปรับปรุงด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่างๆให้ดีขึ้น ทำได้โดยการอบละลายหรืออบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตามด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารละลายของแข็งอัมต้วยังยวดและขั้นตอนสุดท้ายคือการบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในโครงสร้างของโลหะเงิน กระบวนการปรับปรุงนี้ถือว่าสำคัญมากส่งผลต่อสมบัติของโลหะเงินโดยตรง มีผู้ทำการศึกษาสภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนทั้งอุณหภูมิและเวลาในโลหะเงิน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะการปรับปรุงด้วยความร้อนในโลหะผสมเงิน

ชิ้นงาน	การปรับปรุงด้วยความร้อน			อ้างอิง
	การอบละลาย	การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว	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- Zn-Sn-Ir Ag-Cu-Zn-Cd	750-900°C 15-30 min ในอาร์กอน	เย็นตัวในน้ำเกลือเย็น	350, 400, 450และ 550°C, 0-27days	Seol และ คณะ (Seol H.J.,2005), (Seol H.J., 2006)
Ag-Pd-Cu-Au-	700°C	เย็นตัวในน้ำเกลือเย็น	350 และ	Yu และ

Zn-Ir-In	5 min ในอาร์กอน		400°C, 0-27days	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 และเมื่ออบแข็งที่อุณหภูมิ 400°C โครงสร้างภายในจะประกอบด้วย ชั้นของสารละลายของแข็ง Ag-rich และ สารละลายของแข็ง Cu-rich (Hamana D., 2009) ขณะที่โลหะเงินที่มีองค์ประกอบของ Pd, Cu และ Au มีโครงสร้างที่ซับซ้อนภายหลังจากการอบแข็ง 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 หลังการอบแข็ง (Seol H.J., 2006) แต่กรณีของโลหะเงินที่เติม เออเบียม (Er) จากการศึกษาโดย Herman และคณะ (2008) นั้นจะเป็นเนื้อเดียวกันได้เมื่ออบที่อุณหภูมิ 750°C และต้องเย็นตัวอย่างช้าๆก็จะหลีกเลี่ยงองค์ประกอบระหว่างโลหะ Ag₅₁Er₁₄ ในสารละลายของแข็งที่มีผลทำให้สมบัติทางกลลดลง การเกิดการตกตะกอนนั้นสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ได้หลายเทคนิคเช่น DSC, dilatometer, resistivity, XRD, SEM และ TEM เป็นต้น

สมบัติทางกลของโลหะเงิน

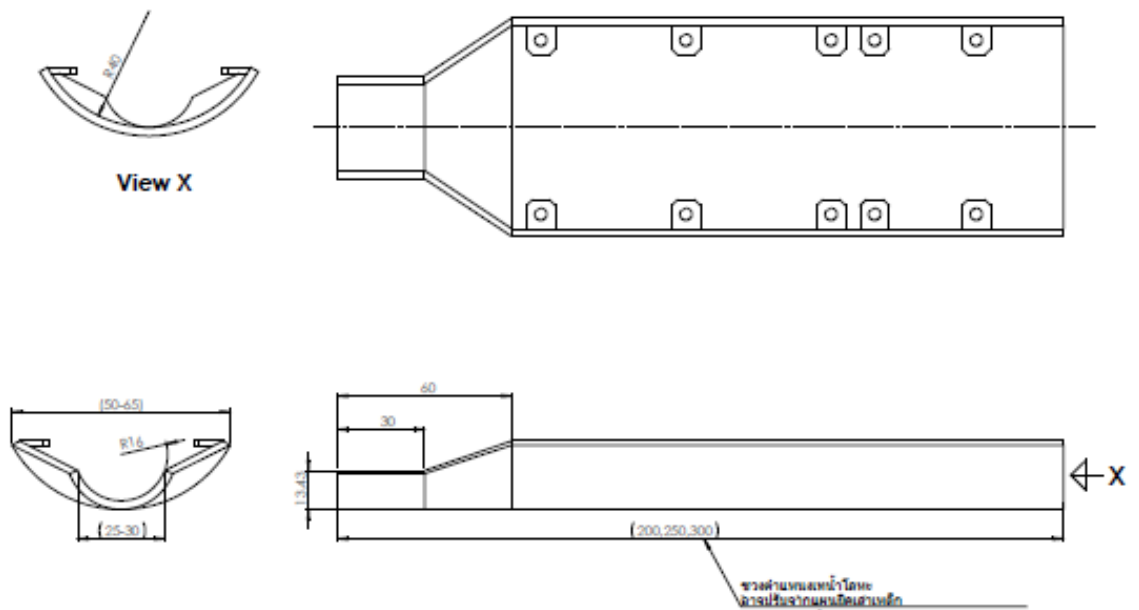
โลหะเงินสเตอร์ลิงหลังการหล่อยังมีสมบัติทางกลที่ยังไม่ดีมากนักหากต้องการนำไปขึ้นรูป ความแข็งโดยทั่วไปอยู่ประมาณ 60-70 HV (Nisaratanaporn, 2007), (Colombo S., 2007) ภายหลังจากผ่านการอบแข็งแล้วค่าความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นสามารถเปรียบเทียบได้จากโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีเติม Cu และ Mn ความแข็งหลังหล่อ อยู่ที่ 50-65 HV ขึ้นกับอัตราส่วนของ Mn ถ้าเติมมากทำให้ค่าความแข็งลดลง เนื่องจาก Mn จะไปรวมตัวกันในยูเทคติกมากกว่าในวัฏภาคหลัก (Nisaratanaporn, 2007) แต่จากการศึกษาโดย Kawashima และคณะ (2000) โลหะเงินที่เติม Mn เมื่อผ่านการปรับปรุงทางความร้อนจนถึงขั้นตอนการอบแข็ง ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าตัว และยังชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็ง การอบแข็งที่ 300-400°C จะได้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันแต่จะใช้เวลาที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นนั้นไม่เท่ากัน ที่ 400°C ความแข็งสูงสุดจะใช้เวลาน้อยกว่าถึง 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการอบที่ 300°C และเมื่อใช้เวลาอบนานขึ้น ค่าความแข็งจะลดลงในทุกอุณหภูมิการอบ เนื่องจากการรวมตัวของตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือเรียกว่าการอบเกิน (Over ageing) ซึ่งความแข็งของโลหะเงินทางทันตกรรมที่มีธาตุหลัก ได้แก่ Ag, Pd, Cu และ Au ที่ผ่านการอบแข็งที่ช่วงอุณหภูมิ 350-450°C ก็สามารถเพิ่มความแข็งได้สูงถึง 300 HV (Seol H.J., 2005), (Seol H.J., 2006), (Yu C.H., 2008), (Lee H.K., 2004) นอกจากอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อความแข็งแล้วธาตุเจือที่เติมก็มีอิทธิพลด้วยเช่นกัน ความแข็งสูงสุดของโลหะเงิน Ag-Mn ที่เจือ Au ใช้อุณหภูมิการอบแข็งที่ 400°C ต่ำกว่าเจือด้วย Pd บ่มที่อุณหภูมิ 500°C และการอบแข็งที่ 300-400°C ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ เนื่องจากพลังงานที่จะทำให้อนุภาคมาเกิดการตกตะกอนไม่เพียงพอ (Kawashima, 2000)

ความสามารถต้านทานแรงดึงในโลหะเงินเป็นสมบัติที่สำคัญที่จะบอกถึงสามารถในการขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นเครื่องประดับ 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 (Fawzy A., 2006)

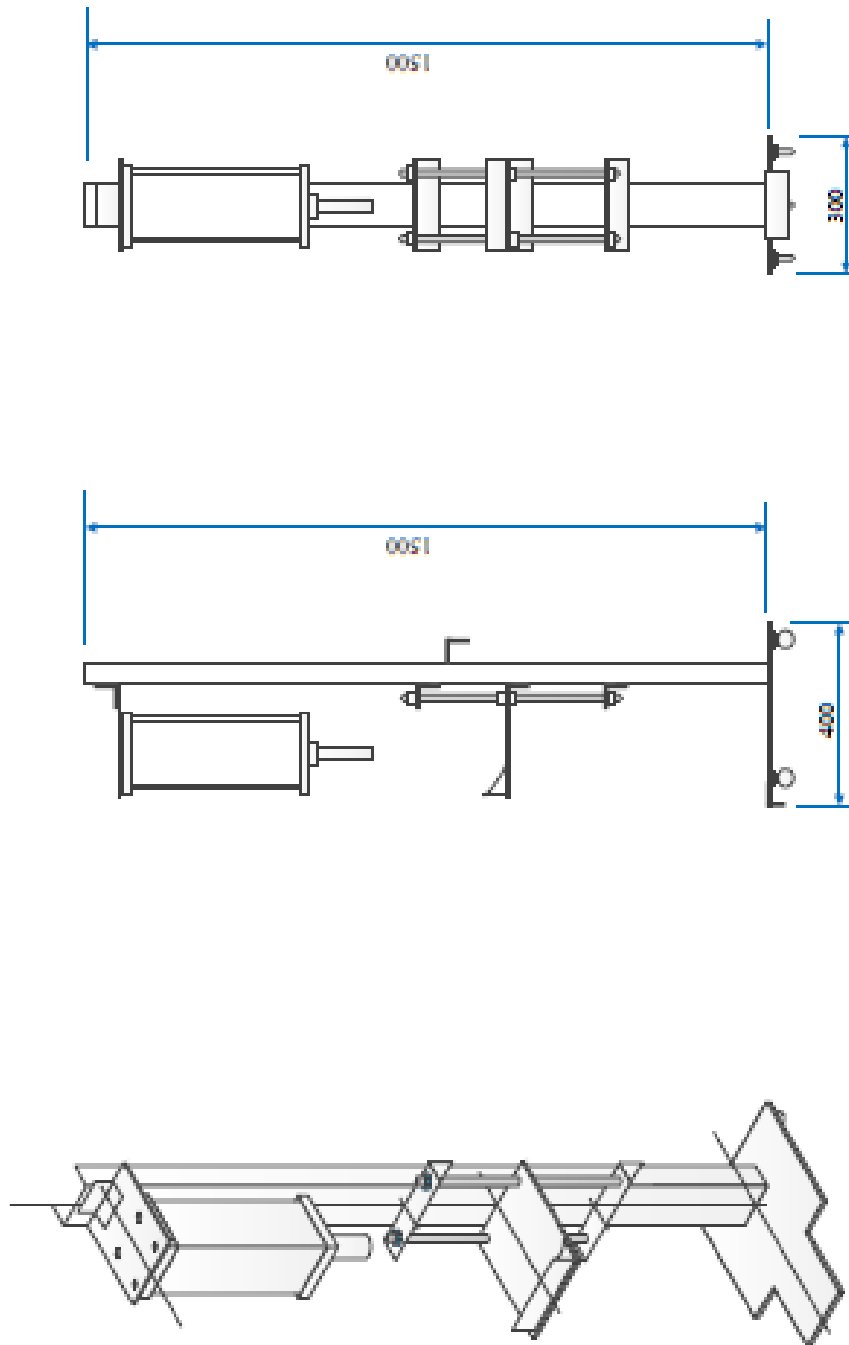
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบชุดรางเทโลหะกึ่งของแข็ง

การหล่อกึ่งของแข็งด้วยการเทผ่านรางลาดเอียง โดยการออกแบบให้ความยาวรางเทเหมาะสมต้องคำนึงถึงอุณหภูมิหลอมและอุณหภูมิปลายราง เพื่อให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงของแข็งและของเหลวตามแผนภูมิสมดุลของโลหะ 2 ระบบ โดยสัดส่วนของของแข็งในช่วงดังกล่าวจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะ ซึ่งสามารถคำนวณสัดส่วนของแข็ง ณ อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงน้ำโลหะอยู่ในช่วงกึ่งแข็งได้จากสมการ 2.1 (Scheil Equation) แบบของชุดรางเท (แสดงดังรูปที่ 3.1) โดยวัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถปรับมุมและความสูงได้และชุดต้นน้ำโลหะ ประกอบด้วยแท่นวางเบ้าและแท่งกระบอกสูบระบบนิวเมตริก แสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.1 แบบรางเทแบบลาดเอียง



รูปที่ 3.2 ชุดต้นน้ำโลหะ

3.2 การเตรียมชิ้นงานในการหล่อ

การทดลองการหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งได้ใช้โลหะ โลหะเงินสเตอร์ลิงโดยมีขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. ชิ้นงานทดสอบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $15 \times 15 \times 3$ มม. สำหรับใช้ในการทดสอบความแข็งแรงจลภาคและศึกษาโครงสร้างจุลภาค และชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 6871 แล้วนำแม่พิมพ์ไปฉีดเทียน ตกแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 3.3 (1)

2. ติดชิ้นงานกับต้นเทียนและฐานยางแสดงดังรูปที่ 3.3 (2)

3. นำกระบอกล่อครอบต้นเทียน แล้วใช้พลาสติกใสปิดรูของกระบอกล่อเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.3 (3)

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



รูปที่ 3.3 การเตรียมชิ้นงาน 1) ชิ้นงาน 2) ต้นเทียน และ 3) กระบอกล่อเหล็กมาครอบต้นเทียน

5. ตั้งอุณหภูมิในการอบเผาปูนสำหรับการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง มีขั้นตอนการตั้งอุณหภูมิ ดังนี้

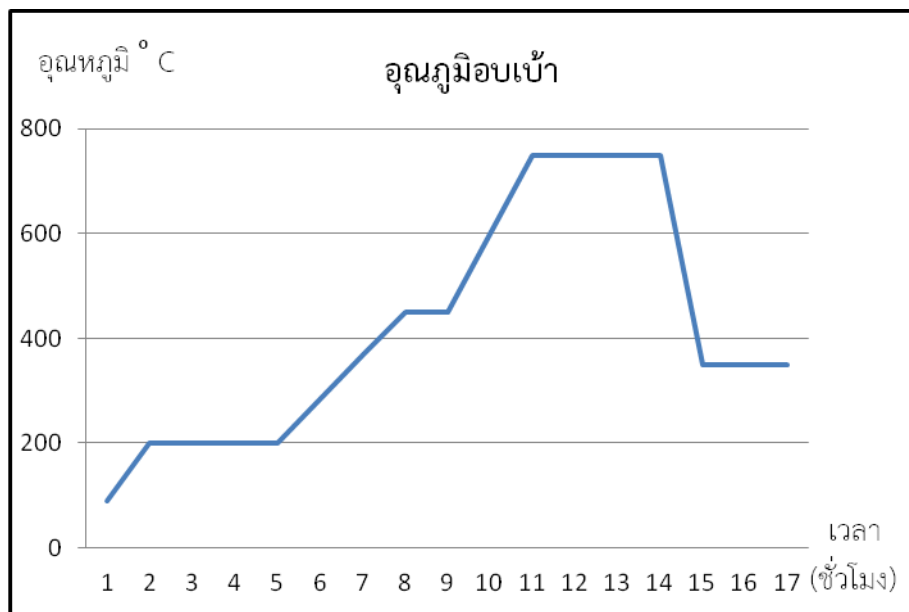
- ปรับระดับอุณหภูมิ ชั่วโมงแรกให้อุณหภูมิ 90°C ใช้เวลา 5 นาที จากอุณหภูมิห้อง เพื่อไล่ความชื้นออกจากปูน

- เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200°C ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และเย็นอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง เพื่อละลายเทียนออกจากเบ้า

- เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 450°C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง แล้วเย็นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เทียนเผาไหม้จนหมด

- เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 750°C ใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง แล้วเย็นอุณหภูมิไว้อีก 3 ชั่วโมงเพื่อทำให้ปูนสุก

- ลดอุณหภูมิลงมาที่ 350°C เพื่อเป็นรอการหล่อต่อไปแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการอบแห้งปูน

6. เตรียมโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงโดยมีส่วนเงิน 93.5 wt% และทองแดง 6.5 wt% และโลหะผสมทองแดง 90 wt% ดีบุก 9-9.5 wt% และเบริลเลียม 0.5-1 wt%

7. ขั้นตอนการคำนวณโลหะ

ตัวอย่างการคำนวณหาโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานจริง

$$\begin{aligned}
 1. \text{ องค์ประกอบ Ag 93.5 wt\% และ Cu 6.5 wt\% มุม 30 องศา ความยาวราง 25 ซม.} \\
 \text{น้ำหนักต้นเทียน} &= (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\
 &= (179.51 - 174.77) = 4.74 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักโลหะ} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน}) \\
 &= (10.49 \times 4.74) = 49.72
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\
 &= (10.49 \times 4.74) \times 20/100 = 9.94
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) + \\
 &+ (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\
 &= (10.49 \times 4.74) + (10.49 \times 4.74) \times 20/100 \\
 &= 59.66 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 59.66}{100} = 55.78 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 59.66}{100} = 3.87 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

2. องค์ประกอบ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% มุม 45 องศา ความยาวราง 25 ซม.

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักต้นเทียน} &= (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\ &= (180.54 - 175.68) = 4.86 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะ} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน}) \\ &= (10.49 \times 4.86) = 50.96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.86) \times 20/100 = 10.19 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) + \\ &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.86) + (10.49 \times 4.86) \times 20/100 \\ &= 61.17 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 61.17}{100} = 57.19 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 61.17}{100} = 3.98 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

3. องค์ประกอบ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% มุม 60 องศา ความยาวราง 25 ซม.

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักต้นเทียน} &= (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\ &= (181.75 - 177.17) = 4.58 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะ} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักตันเทียบ}) \\ &= (10.49 \times 4.58) = 48.04 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.58) \times 20/100 = 9.60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) + \\ &(\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.58) + (10.49 \times 4.58) \times 20/100 \\ &= 57.64 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 57.64}{100} = 53.89 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 57.64}{100} = 3.74 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

$$\begin{aligned} 4. \text{ องค์ประกอบ Ag 93.5 wt\% และ Cu 6.5 wt\% มุม 30 องศา ความยาวราง 20 ซม.} \\ \text{น้ำหนักตันเทียบ} &= (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดตันเทียบ} - \text{น้ำหนักฐานยาง}) \\ &= (179.91 - 170.00) = 4.91 \text{ (น้ำหนักตันเทียบ)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะ} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักตันเทียบ}) \\ &= (10.49 \times 4.91) = 51.50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.91) \times 20/100 = 10.30 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) + \\ &(\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของตันเทียบ}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.91) + (10.49 \times 4.91) \times 20/100 \\ &= 61.80 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 61.80}{100} = 57.78 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 61.80}{100} = 4.01 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

5. องค์ประกอบ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% มุม 45 องศา ความยาวราง 20 ซม.

$$\text{น้ำหนักต้นเทียน} = (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง})$$

$$= (180.18 - 175.36) = 4.82 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)}$$

$$\text{น้ำหนักโลหะ} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน})$$

$$= (10.49 \times 4.82) = 50.56$$

$$\text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100$$

$$= (10.49 \times 4.82) \times 20/100 = 10.11$$

$$\text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) +$$

$$(\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100$$

$$= (10.49 \times 4.82) + (10.49 \times 4.82) \times 20/100$$

$$= 60.67 \text{ กรัม}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 60.67}{100} = 56.72 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 60.67}{100} = 3.94 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

6. องค์ประกอบ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% มุม 60 องศา ความยาวราง 20 ซม.

$$\text{น้ำหนักต้นเทียน} = (\text{น้ำหนักฐานยางที่ติดต้นเทียน} - \text{น้ำหนักฐานยาง})$$

$$= (180.67 - 175.68) = 4.99 \text{ (น้ำหนักต้นเทียน)}$$

$$\text{น้ำหนักโลหะ} = (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักต้นเทียน})$$

$$= (10.49 \times 4.99) = 52.34$$

$$\begin{aligned} \text{เพื่อน้ำหนักของโลหะ 20wt\%} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.99) \times 20/100 = 10.46 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโลหะทั้งหมด} &= (\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) + \\ &(\text{ถ.พ.ของโลหะ} \times \text{น้ำหนักของต้นเทียน}) \times 20/100 \\ &= (10.49 \times 4.99) + (10.49 \times 4.99) \times 20/100 \\ &= 62.80 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหา wt% ของ Ag 93.5 wt% และ Cu 6.5 wt% ที่จะนำไปหล่อ

$$\text{Ag} = \frac{93.5 \times 62.80}{100} = 58.71 \text{ กรัม น้ำหนัก Ag}$$

$$\text{Cu} = \frac{6.5 \times 62.80}{100} = 4.08 \text{ กรัม น้ำหนัก Cu}$$

8. ชั่งโลหะตามน้ำหนักที่คำนวณได้ นำไปหล่อโลหะด้วยเครื่องหล่อขดลวดเหนียวนำยี่ห้อ INDUTHERM รุ่น CV-400 กระบวนการหล่อเปิดเครื่องทำความเย็นทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นก็เปิดเครื่องหล่อแล้วตั้งอุณหภูมิในการหล่อที่ 1000 °C นำโลหะผสมที่ชั่งไว้ใส่ลงในเข้าหลอม เพื่อจะหลอมโลหะให้ละลาย เมื่อโลหะละลายจึงใช้แท่งเหล็กคนให้เข้ากัน และนำเข้าปูนที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 300 °C ออกจากเตา นำมาวางไว้ส่วนปลายรางเท

9. กระบวนการหล่อกิ่งของแข็ง จะเทน้ำโลหะลงบนราง น้ำโลหะจะไหลจากรางลงสู่เข้าที่เตรียมไว้ที่ปลายราง แล้วใช้เทอร์โมคัปเปอ์ในการวัดอุณหภูมิปลายรางแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยรางที่ใช้มีมุมเอียงและความยาวรางสำหรับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง แสดงดังตารางที่ 3.1 กรณีของโลหะทองแดงผสมเบริลเลียมจะใช้มุมเอียง 45 องศา ยาว 30 เซนติเมตร จากนั้นใช้แรงกดอัดน้ำโลหะที่ไหลลงสู่เข้าเพื่อให้โลหะเต็มแบบ จากนั้นทิ้งเข้าปูนให้เย็นตัว 5 นาที แล้วนำไปกระบอกปูนไปจุ่มน้ำเพื่อให้ปูนหลุดออกจากเข้า

ตารางที่ 3.1 แสดงมุมเอียงและระยะเทที่ใช้ในการหล่อกิ่งของแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

ระยะเท (เซนติเมตร)	มุม (องศา)		
20	30	45	60
25	30	45	60

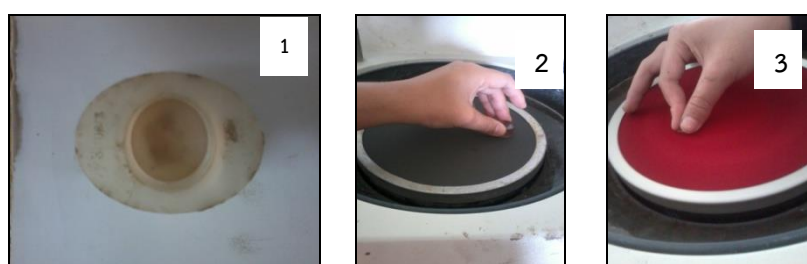


รูปที่ 3.5 กระบวนการหล่อกิ่งของแข็ง

10. นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาด ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็งในขั้นต่อไป

3.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

1. ตัดชิ้นงานออกจากต้นแล้วนำไปหล่อด้วยเรซินเพื่อจับยึดชิ้นทดสอบ โดยใช้อัตราส่วนในการผสมเรซินต่อตัวเร่ง คือ เรซิน 20 กรัม ต่อ ตัวเร่ง 0.25 กรัมแสดงดังรูปที่ 3.6 (1)
2. การขัดผิวชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายติดบนเครื่องขัดผิวโลหะแบบจานหมุน โดยเริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1000 ตามลำดับ จนชิ้นงานมีผิวเรียบแสดงดังรูปที่ 3.6 (2)
3. ขั้นตอนการขัดมัน (Polishing) หลังจากการขัดกระดาษทรายแล้วจะนำชิ้นงานมาขัดผงอะลูมินาที่ใช้มีขนาด 5 ไมครอน เพื่อลบรอยที่เกิดจากการขัดกระดาษทราย และขัดต่อด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 3.6 (3) จนผิวโลหะมีความวาว



รูปที่ 3.6 ขัดชิ้นงาน 1) หล่อเรซิน 2) ขัดกระดาษทราย และ 3) ขัดผ้าสักหลาด

3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

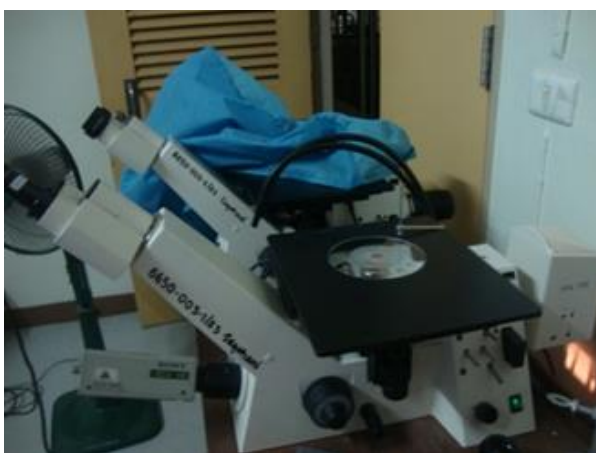
1. นำชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการขัดเงา ไปทำการกัดด้วยกรดโครมิกที่ผสมตามอัตราส่วน (กรด Chromic 0.5 กรัม กรดซัลฟิวริก 0.5 มิลลิลิตร น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร) โดยกัดบริเวณผิวหน้าชิ้นทดสอบไปกว้างกับกรด ใช้เวลา 15 วินาที สำหรับโลหะผสมทองแดงเบริลเลียมจะกัดด้วยกรดไนตริกที่อัตราส่วน 50 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการกัด 10 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.7 แล้วนำไปล้างออกด้วยน้ำเปล่า ล้างต่อด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อล้างทำความสะอาดผิวหน้าที่มีกรดอยู่

จากนั้นล้างน้ำกลั่น เป่าให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนต่อไป



รูปที่ 3.7 กัดกรด

2. การศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง รุ่น Axiovert 25 ผู้ผลิต Carl Zeiss ใช้เลนส์วัตถุที่กำลังขยาย 5x และ 20x แล้วปรับภาพหยาบและละเอียดให้เห็นโครงสร้างชัดเจน แล้วบันทึกรูปภาพด้วยกล้องดิจิตอลยี่ห้อ Dinoeye



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แสง รุ่น Axiovert 25 ผู้ผลิต Carl Zeiss

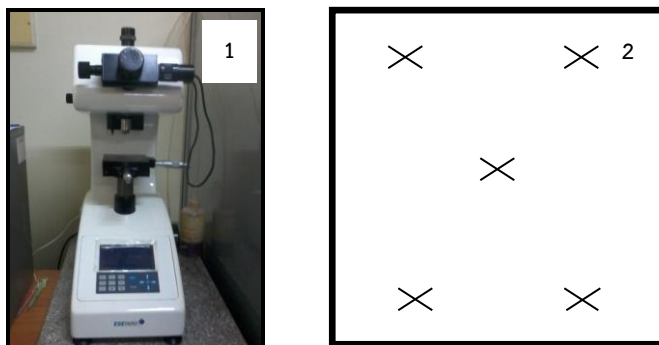
3. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM 5910L ผู้ผลิต Jeol Co., Ltd. ใช้ศักย์เร่งที่ 15 kV WD 11-13 mm. ถ่ายภาพ Backscattering electron (BSE) ติดตั้งตัววัดการกระจายตัวพลังงานรังสีเอ็กซ์ (EDS) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี



รูปที่ 3.9 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM 5910L ผู้ผลิต Jeol Co., Ltd.

3.5 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวจนเรียบ มาทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ ESEWAY รุ่น 400 series แสดงดังรูปที่ 3.6 (1) ใช้น้ำหนักกด 200 กรัม เวลาทดสอบ 10 วินาที โดยมีการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ชิ้นงานละ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 3.6 (2)



รูปที่ 3.10 การทดสอบความแข็ง 1) เครื่องวัดความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ ESEWAY รุ่น 400 series และ 2) ตำแหน่งการกด 5 ตำแหน่ง

3.6 การทดสอบแรงดึง

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

2. การทดสอบแรงดึงจะใช้เครื่องทดสอบ รุ่น LR10K ผู้ผลิต LLOYD Instruments ที่คณะทันตแพทยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยกำหนดอัตราเร่ง 1.5 มิลลิเมตร ต่อ นาที ใช้ Load Cell 10 KN ระยะ Gage range 17 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น LR10K ผู้ผลิต LLOYD Instruments

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การสร้างชุดรางเทโลหะกึ่งของแข็ง

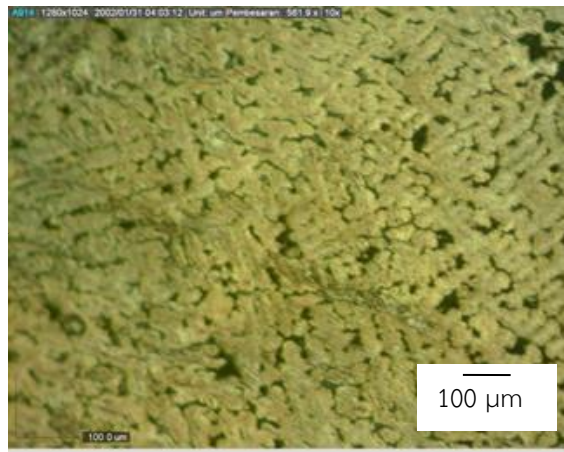
จากการออกแบบชุดรางเทสามารถสร้างชุดรางเทเพื่อใช้ในการทดลองได้ตามรูปที่ 4.1 แม้ว่าจะมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะกับเครื่องหล่อแบบสูญญากาศที่คณะอัญมณีมีใช้อยู่



รูปที่ 4.1 ชุดรางเทหล่อโลหะกึ่งแข็ง (1) รางเท และ (2) ชุดอัดน้ำโลหะเข้าแบบหล่อ

4.2 ผลการทดลองเทผ่านชุดรางเท

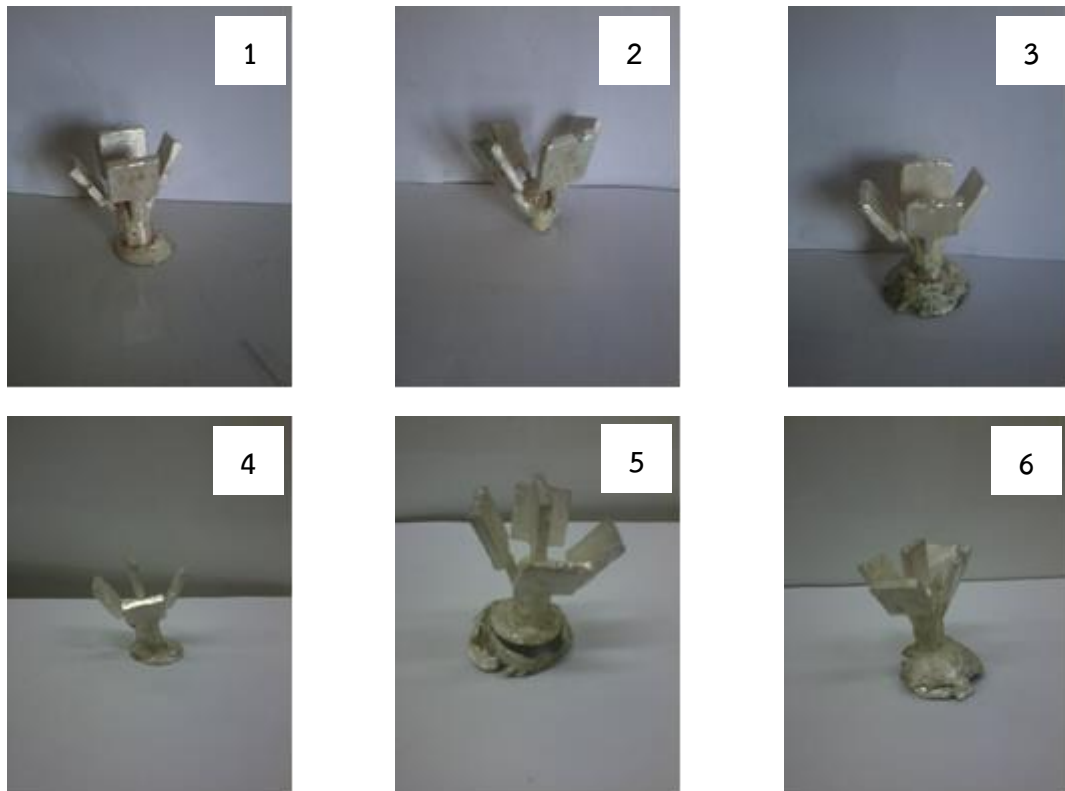
จากการทดลองชุดรางเทหาโดยทดลองใช้โลหะ Cu-Sn ซึ่งเป็นโลหะราคาถูก พบว่าที่มุมเท 45° ความยาวรางเท 30 เซนติเมตร อุณหภูมิปลายราง 618 องศา พบโครงสร้างมีลักษณะเดนไดรต์สั้นลง แสดงดังรูปที่ 4.2



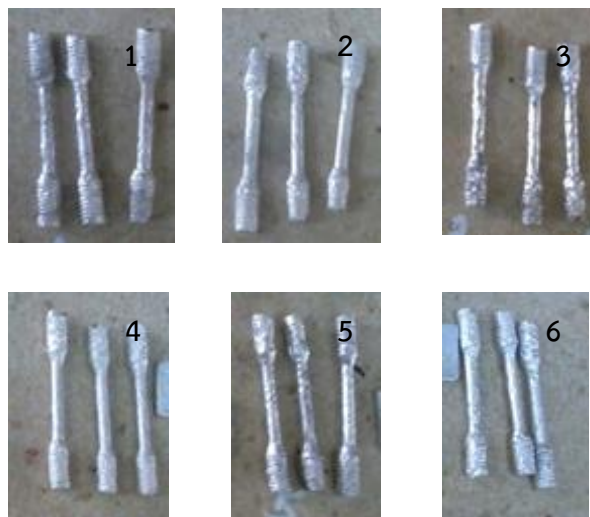
รูปที่ 4.2 โครงสร้างโลหะ Cu-12%Sn ที่หล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง

4.3 ชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อกึ่งของแข็ง

การหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิง พบฟองอากาศเพียงเล็กน้อย และชิ้นงานค่อนข้างสมบูรณ์ ทุกสภาวะการหล่อ เนื่องจากมีแรงดันหรือแรงกดจากชุดอัดน้ำโลหะทำให้โลหะไหลเข้าเต็มแบบแสดง ชิ้นงานหลังหล่อดังรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงหล่อด้วยกระบวนการกึ่งของแข็ง ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ แต่ผิวมีความขรุขระ



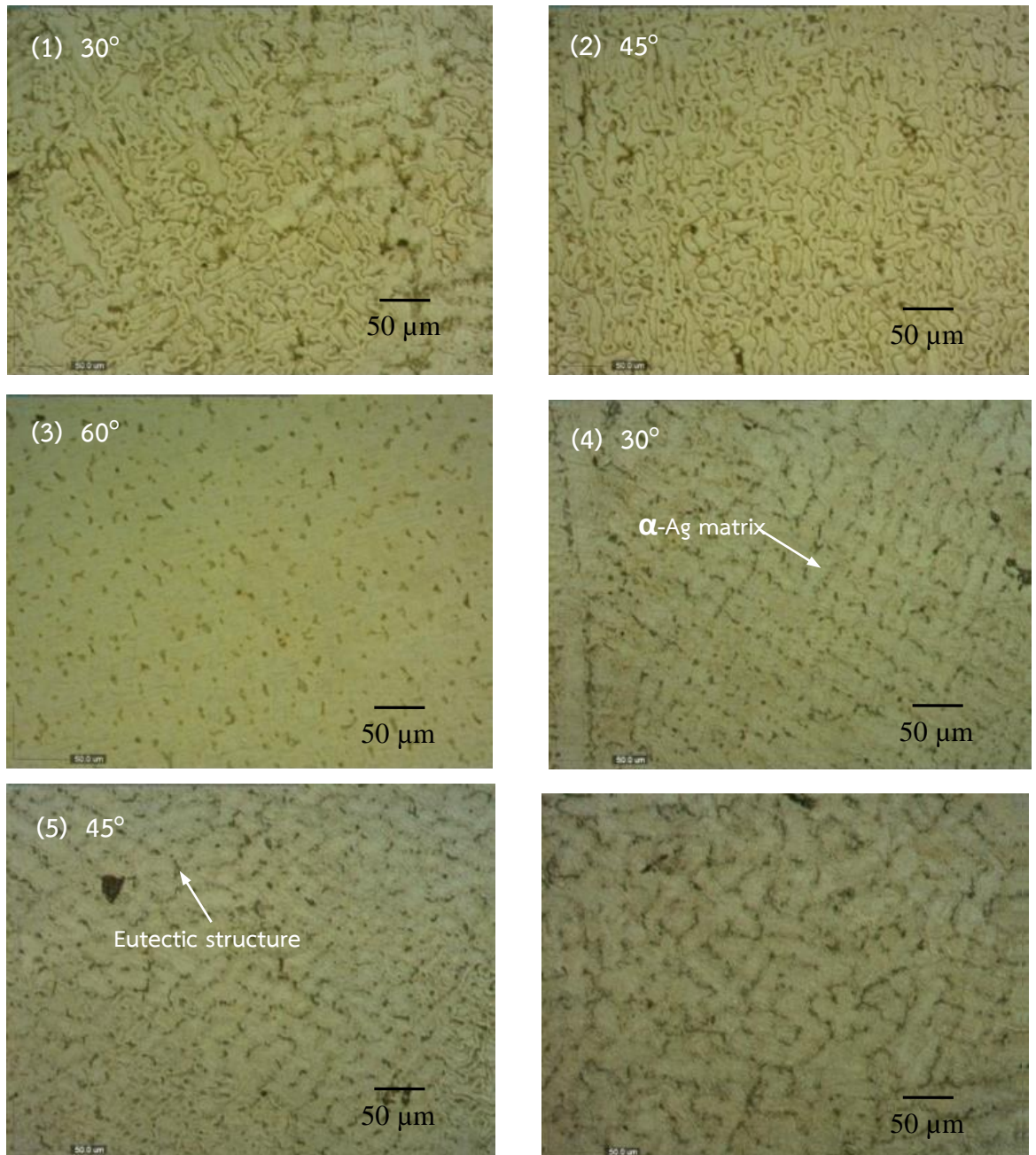
รูปที่ 4.3 ชิ้นงานหล่อกึ่งของแข็งที่ระยะเท 20 เซนติเมตรโดยมีมุม 1) 30° 2) 45° และ 3) 60° และ ระยะเท 25 เซนติเมตรโดยมีมุม 4) 30° 5) 45° และ 6) 60°



รูปที่ 4.4 ชิ้นงานหล่อกิ่งของแข็งสำหรับทดสอบแรงดึง หล่อที่ระยะเท 20 เซนติเมตรโดยมีมุม 1) 30° 2) 45° และ 3) 60° และ ระยะเท 25 เซนติเมตรโดยมีมุม 4) 30° 5) 45° และ 6) 60°

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20X ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ที่มีส่วนผสม 93.5%Ag-6.5%Cu หล่อด้วยกระบวนการกิ่งของแข็ง ซึ่งมีระยะเทที่ 20 และ 25 เซนติเมตร และมุมในการเท 30°, 45° และ 60° ที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นเฟสอัลฟา (α) โดยเดนไดรต์ที่สั้นลงและบางส่วนค่อนข้างกลมจากการเทผ่านรางและมีโครงสร้างยูเทคติกแสดงในรูปที่ 4.5 (5) อยู่ในช่องระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งลักษณะเกรนคล้ายกับตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อด้วยกระบวนการกิ่งของแข็งเช่นกัน (Chomsaeng, et al., 2010) นอกจากนี้พบว่าการเทโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ระยะ 20 เซนติเมตร จะเกิดเดนไดรต์ที่ยาวกว่าการเทที่ระยะ 25 เซนติเมตร เนื่องจากน้ำโลหะสามารถเย็นตัวต่อในเบ้าหล่อได้ทำให้เกิดการโตของเดนไดรต์ ขณะที่ระยะการเทที่ 25 เซนติเมตร ทำให้น้ำโลหะเริ่มแข็งตัวและมีระยะในการตัดเฉือนเดนไดรต์ในน้ำโลหะขณะวิ่งผ่านรางเทในมากกว่า ทำให้เกิดเฟสอัลฟา มีลักษณะกลมและเดนไดรต์สั้นลง และจากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเทน้ำโลหะ คือ ที่ระยะเท 25 เซนติเมตร แต่มุมในการเทที่ 30°, 45° และ 60° จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ในตารางที่ 4.5 ผลจากกระบวนการหล่อกิ่งของแข็งที่กำลังขยายจากเลนส์วัตถุ 20X จากการคำนวณหาปริมาณสัดส่วนของแข็งโดยสมการของ Scheil Equation ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 93.5%Ag-6.5%Cu ที่ระยะวางเท 25 เซนติเมตร ที่มุมเท 30°, 45° และ 60° ซึ่งสาเหตุที่ใช้ระยะเท 25 เซนติเมตรและมุมเท 30°, 45° และ 60° เพราะจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับการหล่อกิ่งของแข็ง (Semi-solid) ซึ่งที่มุม 30° มีเฟสของแข็ง 87.7%, มุม 45° มีเฟสของแข็ง 90.3% และมุม 60° มีเฟสของแข็ง 82.7%



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อที่มุมเทต่างกัน (1-3) เตรียมที่ระยะเท 20 เซนติเมตร และ (4-6) เตรียมที่ระยะเท 25 เซนติเมตร

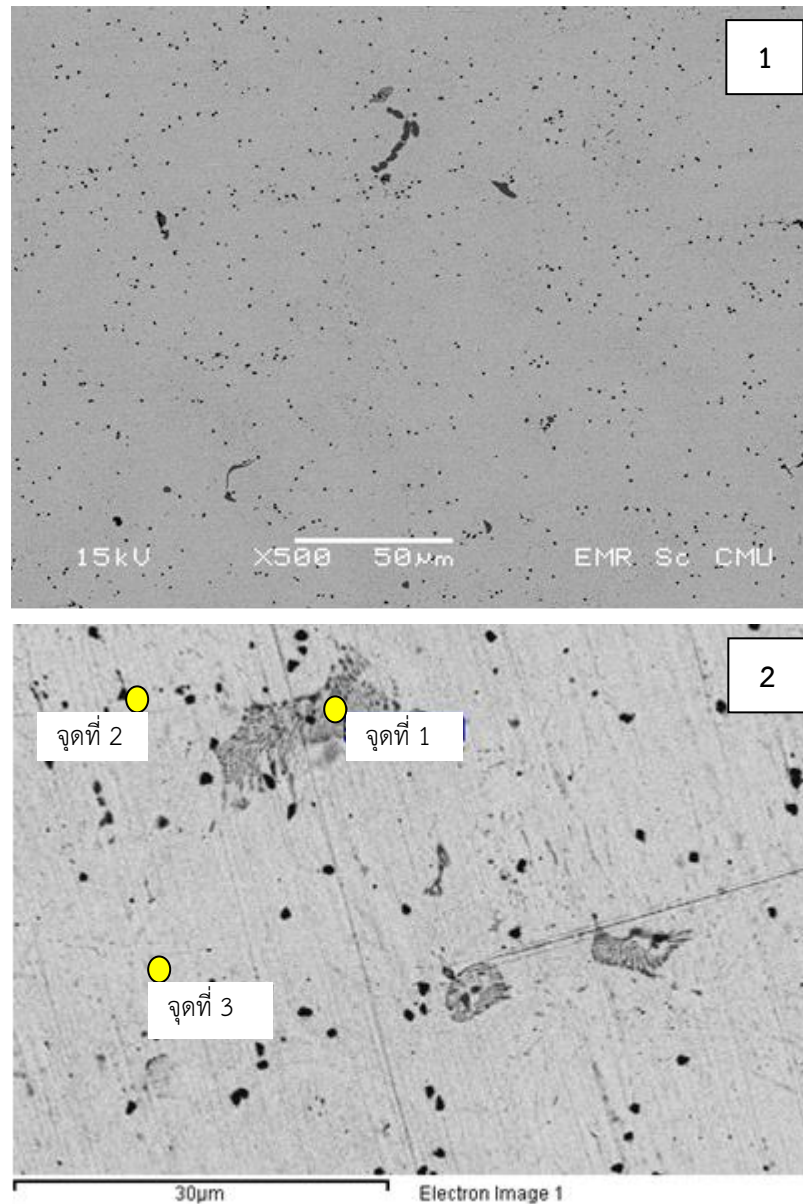
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย EDS

จากการศึกษาโครงสร้างด้วย ของตัวอย่างที่หล่อด้วยมุมเท 60° โดยถ่ายที่กำลังขยาย 500X โดยใช้ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron micrograph, BSE) แสดงในรูปที่

4.6 ชิ้นงานหลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งมีรูปทรงกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน และพบเฟสหลัก (α) ที่เป็นสีขาวซึ่งเป็นองค์ประกอบของ Ag+Cu ส่วนเฟสยูเทคติกจะแทรกอยู่ระหว่างเฟสหลักมีลักษณะเป็นลายชั้นๆ ประกอบด้วย เฟสอัลฟาและเฟสเบตา ในจุดที่ 1 ในรูปที่ 4.6 (2) อย่างไรก็ตามยังไม่พบความแตกต่างในโครงสร้างมากนัก และจากการศึกษาด้วย EDS พบว่าบริเวณยูเทคติก (จุดที่ 1) มีปริมาณเงินลดลง ทองแดงมากขึ้นจากการที่ทองแดงที่เหลือจากการละลายในสารละลายของแข็งอัลฟา มารวมตัวกับเงินเกิดเป็นเฟสยูเทคติก สำหรับจุดที่ 2 และ 3 มีปริมาณ เงิน และ ทองแดงใกล้เคียงกัน 96.81 wt%Ag-3.19 wt%Cu และ 96.17 wt%Ag-3.83 wt%Cu ตามลำดับ ซึ่งเป็นเฟสสารละลายของแข็งอัลฟา อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมีมีความแตกต่างกับสัดส่วนที่ผสมขณะทำการหล่อ (93.5 wt%Ag-6.5 wt%Cu) เนื่องจากทองแดงที่ผสมบางส่วนไปรวมตัวบริเวณเฟสยูเทคติก

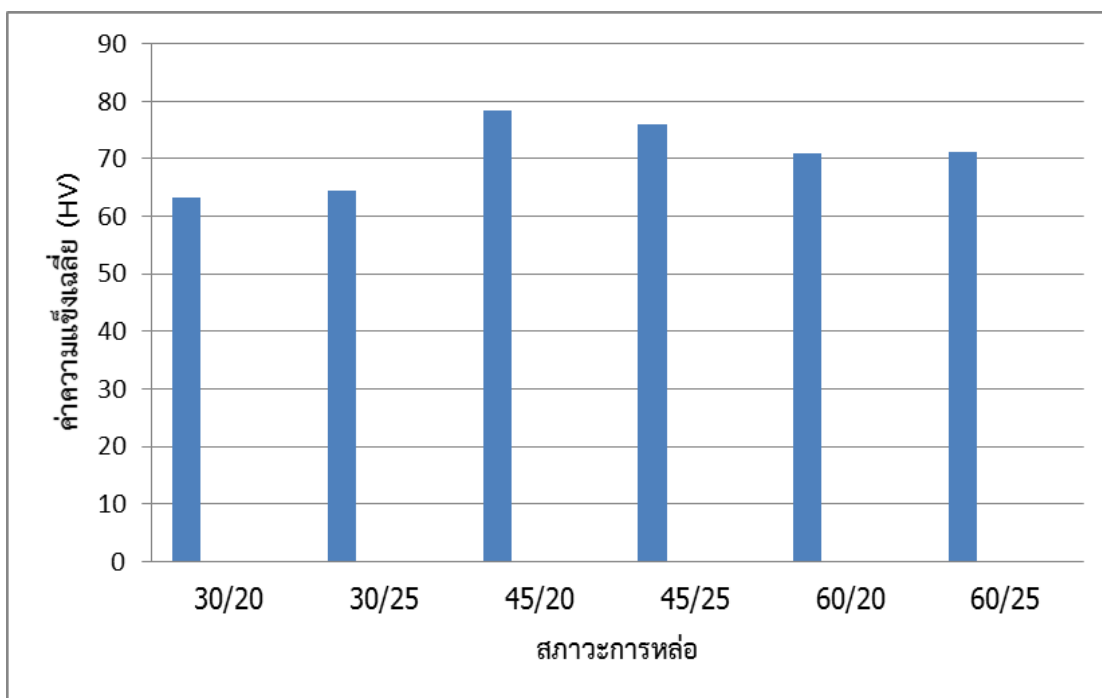
4.6 ความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง

จากกราฟแสดงค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อ หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ที่ระยะการเท 20 และ 25 เซนติเมตร ที่มุม 30° , 45° และ 60° แสดงดังรูปที่ 4.7 (โดยในกราฟความแข็งกำหนดให้ตัวเลขหน้าเป็นมุมเทและตัวเลขหลังเป็นระยะเท เช่น 30/20) พบว่าที่ระยะเทต่างกันมีผลต่อความแข็งไม่มาก แม้ว่าโครงสร้างจุลภาคจะค่อนข้างแตกต่างกัน โดยค่าความแข็งจะเรียงลำดับความแข็งของตัวอย่างจากน้อยไปมากดังนี้ มุมเทที่ 30° เทที่ระยะ 20 และ 25 เซนติเมตร มีค่าความแข็งน้อยที่สุดที่ 63.36 HV และ 64.46 HV ตามลำดับ ที่มุมเทที่ 60° เทที่ระยะ 20 และ 25 เซนติเมตร มีค่าความแข็งที่ 70.84 HV และ 71.26 HV ตามลำดับ และที่มุมเท 45° เทที่ระยะ 20 และ 25 เซนติเมตร มีค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 78.48 HV และ 76.07 HV ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงทั่วไปเล็กน้อย (60-70 HV) (Chanmuang, Kongmuang, Pearce, & Chairuang Sri, 2012) สาเหตุของความแข็งที่สูงเกิดจากอัตราการเย็นตัวระหว่างแข็งตัวและการเกิดโครงสร้างจุลภาคโดยที่มุมเท 45° มีการเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ที่สั้นซึ่งช่วยในการปรับปรุงสมบัติความแข็ง



จุดที่	องค์ประกอบเคมี wt%	
	Ag	Cu
1	74.46	25.54
2	96.81	3.19
3	96.17	3.83

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างเงินสเตอร์ลิงหล่อที่มุม 60° ภาพ 1) BSE 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีแบบจุดและตารางปริมาณธาตุ

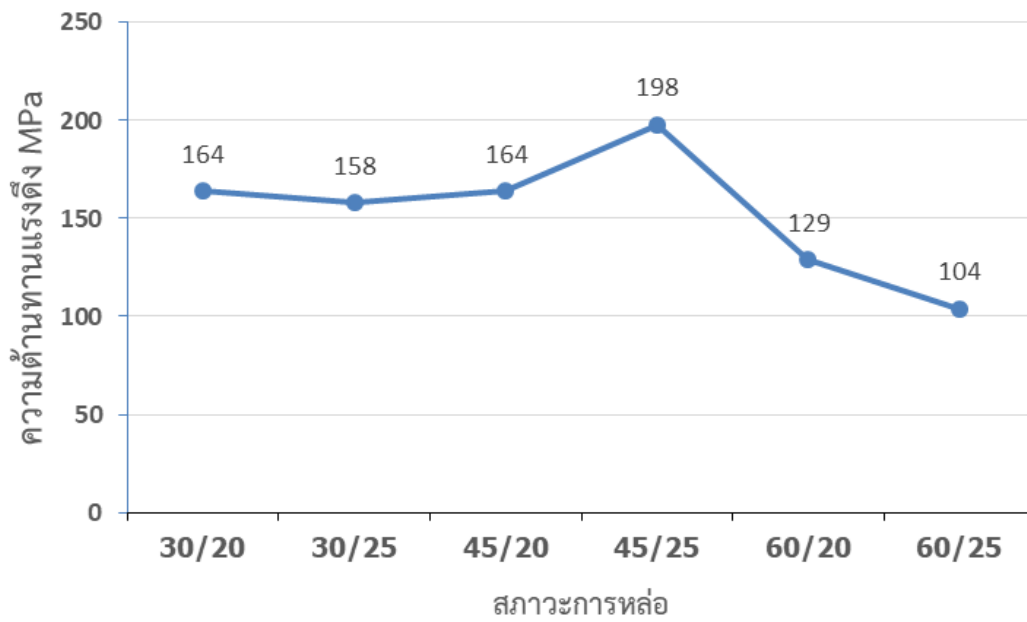


รูปที่ 4.7 ความแข็งเฉลี่ยทดสอบด้วยความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิง หลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งที่มุมและระยะแตกต่างกัน

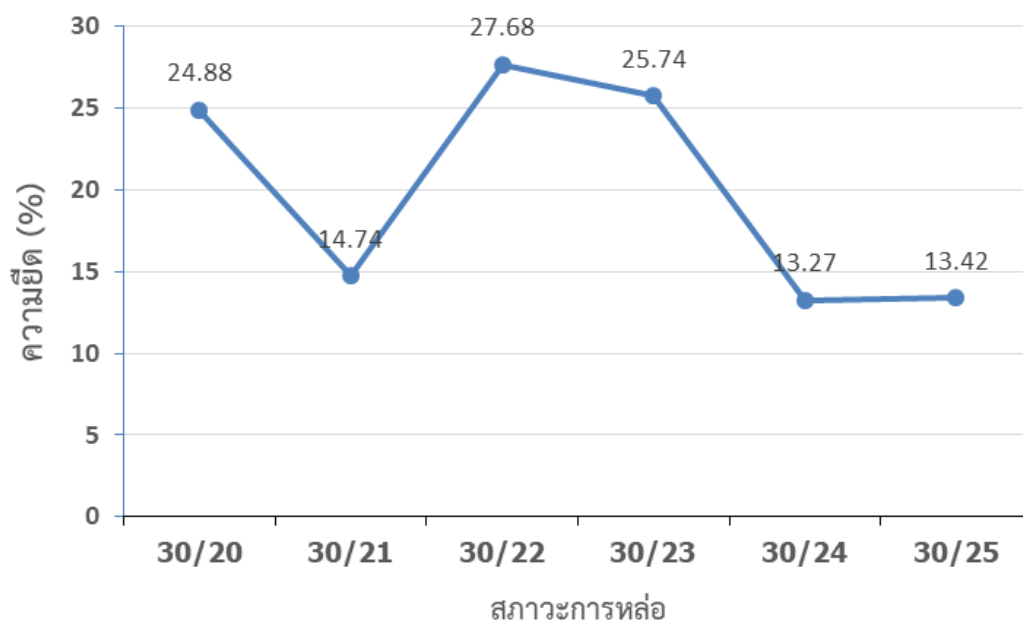
4.7 ความต้านทานแรงดึงและความยืดของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง

จากกราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อ หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ที่ระยะการเท 20 และ 25 เซนติเมตร ที่มุม 30°, 45° และ 60° แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 192 MPa ใน ตัวอย่างมุมเท 45° เทที่ระยะ 25 เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานวิจัยโลหะเงินสเตอร์ลิงเจือ สังกะสี และ ทองแดงก่อนการบ่มแข็ง มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 210 MPa (สมนึก, ศิริพร, วชิร, สุรัตน์, และ เดช, 2544) ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่เทด้วยมุมเท 30° เทที่ระยะ 20 และ 25 เซนติเมตร และ 45° เทที่ระยะ 20 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 158-164 MPa ขณะที่มุมเทที่ 60° เทที่ระยะ 20 และ 25 เซนติเมตร มีความต้านทานแรงดึงลดลงอยู่ในช่วง 104-129 MPa

จากกราฟแสดงความยืดของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อ หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ที่ระยะการเท 20 และ 25 เซนติเมตร ที่มุม 30°, 45° และ 60° แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความยืดของตัวอย่างที่เทด้วยมุม 45° ที่ระยะเท 20 เซนติเมตร มีเปอร์เซ็นต์การยืดมากที่สุดเท่ากับ 27.68% ขณะที่ตัวอย่างที่เทด้วยมุม 45° ที่ระยะเท 25 เซนติเมตร มีเปอร์เซ็นต์การยืดลดลงเท่ากับ 25.74% ตัวอย่างที่เทด้วยมุม 60° มีเปอร์เซ็นต์การยืดต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 13.27-13.42%



รูปที่ 4.8 ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งที่มุมและระยะเทตต่างกัน



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ความยืดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งที่มุมและระยะเทตต่างกัน

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผล

1. ชุดรางเทโลหะกึ่งแข็งสามารถหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับทำเครื่องประดับได้ ดดยชิ้นงานหล่อออกมาสมบูรณ์เกือบทุกชิ้น แต่มีฟองอากาศอยู่บ้าง
2. โลหะผสม 93.5%Ag-6.5%Cu หลังหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็ง พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะของเดนไดรต์ (เฟสแอลฟา) สั้นลง มีบางส่วนค่อนข้างกลม และมีโครงสร้างยูเทคติกบางส่วน
3. ความแข็งของตัวอย่างมีค่าที่สูงกว่าเงินสเตอร์ลิงทั่วไปเล็กน้อยในการหล่อที่มุม 45° ระยะเท 20 เซนติเมตร
4. ความต้านทานการดึงมีค่าสูงสุดในตัวอย่างที่หล่อด้วยมุม 45° ระยะเท 25 เซนติเมตร เช่นกัน แต่เปอร์เซ็นต์ความยืดต่ำกว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยมุม 45° ระยะเท 20 เซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่หล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งควรทดสอบเพิ่มในอนาคตโดยการเติมโลหะเจืออื่นๆ
2. เพื่อการหล่อที่มีคุณภาพมากขึ้นควรตรวจสอบการทำงานของเครื่องหล่อทุกครั้ง
3. การดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ควรมีการเตรียมชิ้นงานให้มีผิวเรียบให้เป็นระนาบเดียวกัน และไม่มีรอยขีดข่วน

เอกสารอ้างอิง

- A. Figueredo. (2001). Science and technology of semi-solid metal processing. *North American Die Casting Association*, 1-2.
- A., Chairuangri, T., Poolthong, N. and Pearce J.T.H. Wiengmoon. (2007). Electron Microscopy of a semi-solid processed 27wt%Cr cast iron. *Materials Science and Engineering A*, 480, 333-341.
- 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.
- Berzins D.W., Sarkar N.K., Ohno H. Kawashima I. (1998). Corrosion of Three Experimental AgMn-Based Casting Alloys. *Dental Materials*, 14, 448-452.
- Bevis M.J. Fan S.J. (2001). Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process. *Materials Science and Engineering A*, 299, 210-217.
- 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.
- Cerri E. and Leo P. Cavaliere P. (2004). Effect of heat treatment on mechanical properties and fracture behavior of a thixocast A356 aluminium alloy. *Journal of Materials Science*, 39, 1653-1658.
- Chutimun Chanmuang, Wannapha Kongmuang, J.T.H Pearce, และ Torranin Chairuangri. (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.

- D., Atkinson, H.V., Kapranos, P. and Jones H. Liu. (2004). Effect of heat treatment on properties of thixoformed high performance 2014 and 201 aluminium alloys. *Journal of Materials Science*, 39, 99-105.
- E., Wongsriruksa, 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.
- E.R., Ferracini, E.G., Piffer, V.P., Ferrante, M. Freitas. (2004). Microstructure, material flow and tensile properties of A356 alloy thixoformed parts. *Materials Research*, 7(4), 595-603.
- J., Martinez, R.A., Flemings, M.C. Wannasin. (2006). Grain refinement of an aluminium alloy by introducing gas bubbles during solidification. *Scripta Materialia*, 55, 115-118.
- 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.
- 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.
- M., Takita, M., Nomura, H. and Bagoury, N. Ramadan. (2006). Semi-solid processing of ultrahigh-carbon steel castings. *Materials Science and Engineering A*, 430, 285-291.

- M., Ueno, H. and Takagi, I. Tsuchiya. (2003). Research of semi-solid casting of iron. *JSAE Review, 24*, 205-214.
- M.R Aldo. (1997). Understanding Sterling Silver. *Proceeding of the Eleventh 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.
- N. Chomsaeng. (2010). *Microstructure and properties relationship of semi-solid cast metals*. Chiang Mai University.
- Natthaphol Chomsaeng, Mitsutaka Haruta, Torranin Chairuangsrc, Hiroki Kurata, Seiji Isoda, and Makoto Shiojiri. (2010). HRTEM and ADF-STEM of precipitates at peak-ageing in cast A356 aluminium. *Journal of Alloys and Compounds*, 478–487.
- N. Poolthong. (2004). *Semi-solid processing of alloyed cast iron*. Nagoya, Japan: Nagoya University.
- 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.
- Nomura, H. and Takita, M. Poolthong N. (2004). Effect of heat treatment on microstructure and properties of semi-solid chromium cast iron. *Materials Transaction, 45(3)*, 880-887.
- 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.
- P. and Faensworth, M. Kapranos. (2007). Near net-shaping aerospace alloys by thixoforming. *Foundry Trade Journal, 180*, 94-96.
- 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.
- T. Basner. (2000). Rheocasting of semi-solid A357 aluminium. *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-0059, 1-5.
- Z., Semisolid metal processing, *International Materials Reviews*, 47(2), 2002, 1-37. Fan. (2002,). Semisolid metal processing. *International Materials Reviews*, 47(2), 1-37.
- สมชัย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุดมมันน์ แม้น อมรสิทธิ์. (2008). *วัสดุวิศวกรรม*. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.
- สมนึก วัฒนศรีกุล, ศิริพร ดาวพิเศษ, วชิร ฉายสุวรรณ, สุรัตน์ วรรณศรี, และ เดช เหมือนขาว. (2544). *โครงการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัยม. (2550). การทดสอบแรงดึง. *สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย*, 29-38.

ภาคผนวก

Project 1

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

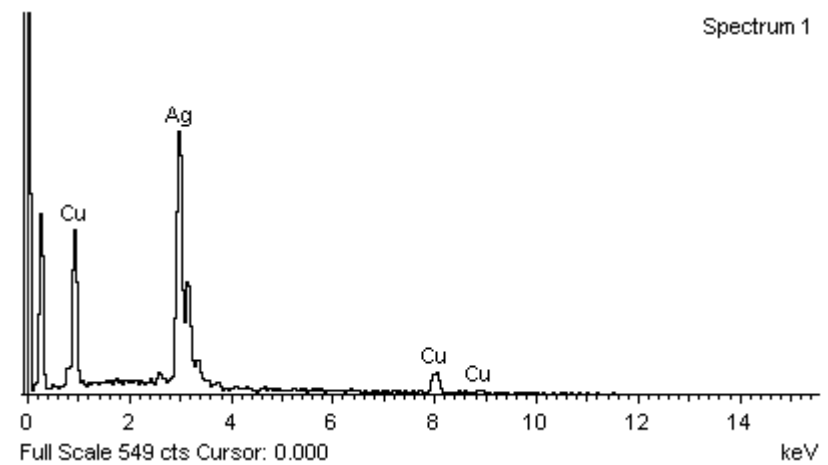
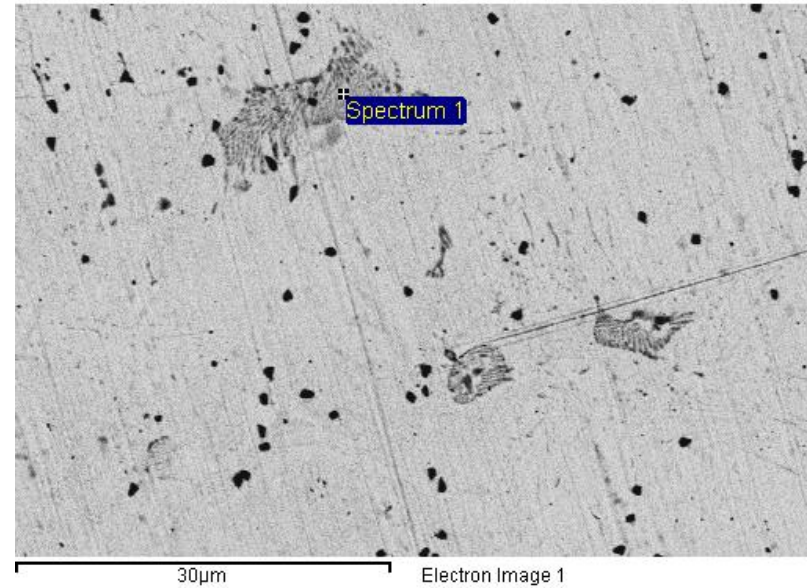
Standard :

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	25.54	36.80
Ag L	74.46	63.20
Totals	100.00	

Comment:



Inca

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

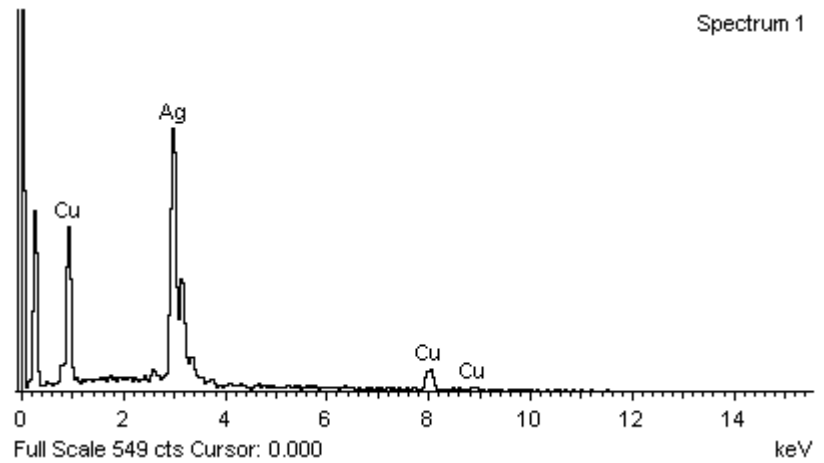
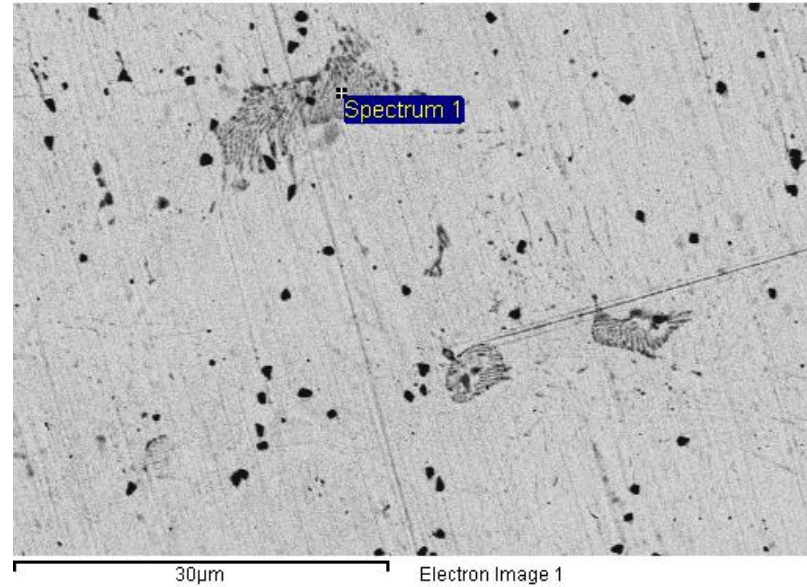
Standard :

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	25.54	36.80
Ag L	74.46	63.20
Totals	100.00	

Comment:



Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

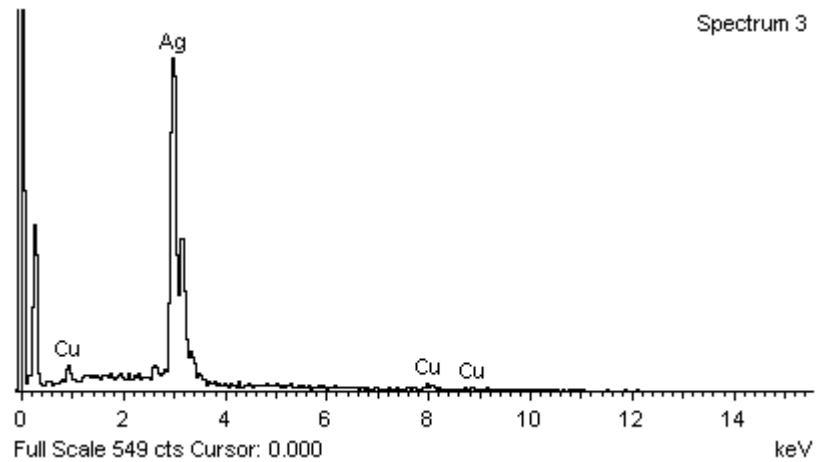
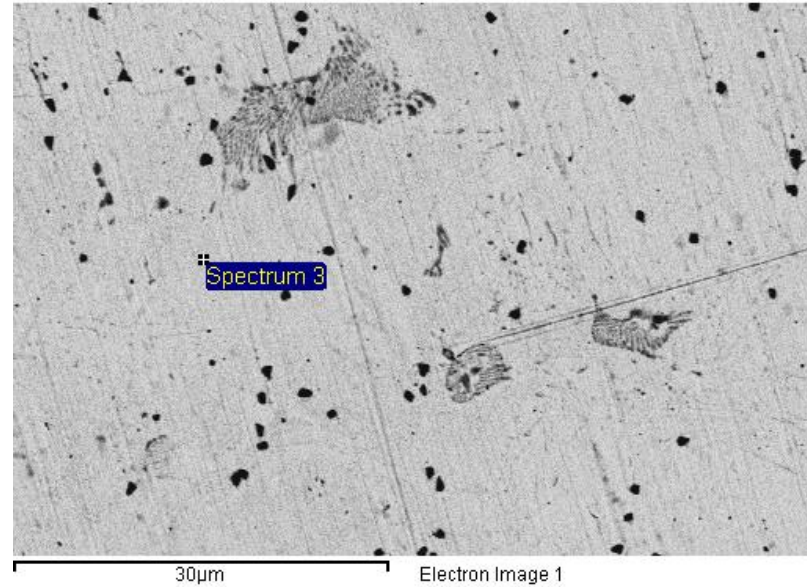
Standard :

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	3.83	6.33
Ag L	96.17	
Totals	100.00	

Comment:



ภาคผนวก ข ค่าความแข็งของตัวอย่างหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็ง

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง HV					
	ตำแหน่งที่1	ตำแหน่งที่2	ตำแหน่งที่3	ตำแหน่งที่4	ตำแหน่งที่5	เฉลี่ย
30/20	64.20	58.80	61.00	67.30	65.50	63.36
30/25	61.90	66.10	72.70	69.10	52.50	64.46
45/20	79.93	78.01	77.49	-	-	78.48
45/25	83.00	73.86	71.35	-	-	76.07
60/20	68.50	71.50	71.80	71.80	69.80	70.84
65/25	73.30	79.40	68.90	65.10	69.60	71.26

หมายเหตุ การวัดความแข็งตัวอย่าง 45/20 และ 45/25 วัดเพียงสามตำแหน่งจากชิ้นงานมีรูพรุน

ภาคผนวก ค ค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ความยืด

ตัวอย่าง	Max load (N)	%strain at max load	Young modulus	Load at break (N)	Elongation	Stress max load (N/mm ²)
30/20	1161.0	22.313	5824.9	464.43	24.875	164
30/25	1116.0	12.869	7339.9	446.35	14.738	158
45/20	1160.0	26.846	5854.6	463.95	27.676	164
45/25	1403.0	24.123	5135.4	561.07	25.741	198
60/20	910.6	12.480	5135.5	364.24	13.267	129
65/25	732.9	12.256	5357.7	293.15	13.415	104

ภาคผนวก ง ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

