

การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียม

เกรด 935



นายตระกูลศักดิ์ สุขวี

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

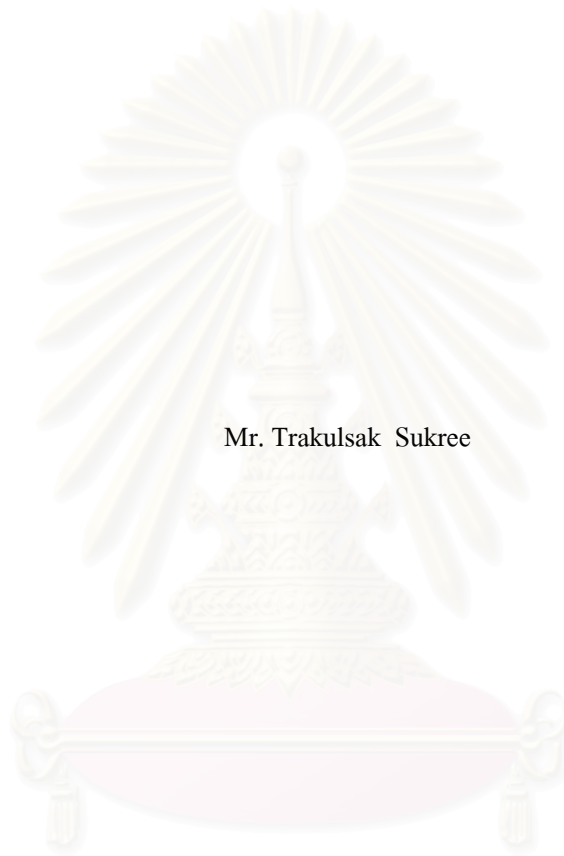
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT AND MECHANICAL
PROPERTIES OF SILVER-BERYLLIUM ALLOY GRADE 935



Mr. Trakulsak Sukree

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียม เกรด 935
โดย	นายตระกูลศักดิ์ สุขรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ชรณินทร์ ไชยเรืองศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชรณินทร์ ไชยเรืองศรี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

ตระกูลศักดิ์ สุขารี : การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-เบริลเลียม เกรด 935 (MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT AND MECHANICAL PROPERTIES OF SILVER-BERYLLIUM ALLOY GRADE 935) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. ชรณินทร์ ไชยเรืองศรี, 77 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของธาตุเบริลเลียม และกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวและในการบ่ม ที่มีต่อความแข็งแรงมหภาค สมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อโลหะผสมเงิน 93.5% ทองแดง 6.37% และเบริลเลียม 0.13% เปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อโลหะผสมเงิน 93.5 % และทองแดง 6.5% ที่ไม่มีการเติมเบริลเลียม ผลการทดลองพบว่า เบริลเลียมมีผลเพิ่มค่าสูงสุดของความแข็งแรงมหภาคและสมบัติทางกล ที่ได้หลังจากบ่ม ความแข็งแรงมหภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-เบริลเลียมหลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วจุ่มชุบลงในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่า 58 วิกเกอร์ มีค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 60.95 MPa มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 13.75 GPa และ โมดูลัสรีไซเคิลเท่ากับ 135.38 KPa การบ่มต่อไปจะทำให้ความแข็งแรงมหภาคและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อเพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรงมหภาคสูงที่สุดเท่ากับ 162 วิกเกอร์ มีค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 339.70 MPa มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 59.19 GPa และค่าโมดูลัสรีไซเคิลเท่ากับ 974.79 KPa ที่อุณหภูมิบ่ม 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับกรณีโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมซึ่ง มีความแข็งแรงมหภาคหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่สภาวะเดียวกันเท่ากับ 61 วิกเกอร์ มีค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 73.35 MPa มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 17.91 GPa และค่าโมดูลัสรีไซเคิลเท่ากับ 150.20 KPa หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จึงได้ค่าความแข็งแรงมหภาค ความเค้นจุดคราก โมดูลัสความยืดหยุ่น และ โมดูลัสรีไซเคิลสูงที่สุดเพียง 136 วิกเกอร์ 224.06 MPa 44.45 GPa และ 564.71 KPa ตามลำดับ ในแง่ของโครงสร้างจุลภาค เบริลเลียมมีผลเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างยูเทคติก จากลักษณะที่พบโดยทั่วไปแบบลามลลาคลายเพอร์โลดในโลหะผสมเงิน-ทองแดงซึ่งไม่มีการเติมเบริลเลียม กลายเป็นลักษณะที่มีความเป็นทรงกลมมากขึ้นในโลหะผสมเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม การที่ความแข็งแรงมหภาคและสมบัติทางกลหลังจากการบ่มได้รับการปรับปรุงให้สูงขึ้นในกรณีที่เติมเบริลเลียม น่าจะเกิดจากการตกตะกอนขนาดเล็กภายในวิฎภาคปฐมภูมิ ส่วนสาเหตุที่ความแข็งแรงมหภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมที่ไม่มีการเติมเบริลเลียม หลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวและจุ่มชุบลงในน้ำเย็นมีค่าสูงกว่าของโลหะผสมที่มีการเติมเบริลเลียม คาดว่าเป็นเพราะมีปริมาณทองแดงที่มากกว่าและโครงสร้างยูเทคติกละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติและ โครงสร้างจุลภาคหลังจากการบ่ม ชิ้นงานหล่อโลหะผสมเงิน 93.5% ทองแดง 6.37% และเบริลเลียม 0.13% มีความเหมาะสมมากกว่าในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ลิ้นสปริงในเครื่องประดับ

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4670308521 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

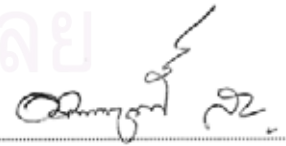
KEY WORD: STERLING SILVER / MECHANICAL PROPERTIES / PRECIPITATION / SPRING

TRAKULSAK SUKREE: MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT AND MECHANICAL PROPERTIES OF SILVER-BERYLLIUM ALLOY GRADE 935. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. TORRANIN CHAIRUANGSRI, Ph.D., 77 pp.

The objective of this work is to study the effects of beryllium and heat treatment, including temperature and time in solid-solution treatment and in aging, on macrohardness, mechanical properties and microstructure of the cast alloy 93.5 wt%Ag, 6.37 wt%Cu and 0.13 wt%Be, comparing to those of the cast alloy 93.5 wt%Ag and 6.5%Cu without beryllium addition. The results revealed that beryllium increased the maxima of macrohardness and the mechanical properties obtained after aging. The macrohardness of the Ag-Cu-Be alloy, after solid-solution treatment at 750 °C for 60 minutes and quenching in cold water at 10 °C, was 58 HV with the yield stress 60.95 MPa, elastic modulus 13.75 GPa and the modulus of resilience 135.08 KPa. Consequently aging resulted in an increase of the macrohardness and the mechanical properties. The maximum macrohardness value was 162 HV with the yield stress 339.70 MPa, elastic modulus 59.19 GPa and the modulus of resilience 974.79 KPa after aging at 350 °C for 30 minutes. Comparing to the Ag-Cu with no beryllium addition, the macrohardness after solid-solution treatment at the same condition was 61 HV with the yield stress 73.35 Mpa, the elastic modulus 17.91 GPa and the modulus of resilience 150.20 KPa. After aging at 300 °C for 60 minutes, the maximum value obtained was only 136 HV, 224.06 MPa, 44.45 GPa and 564.71 KPa, respectively. Regarding to the microstructure, beryllium had an effect on modifying of the eutectic structure from the typical, pearlite-like lamellar in the Ag-Cu alloy without beryllium addition to a structure with more sphericity in the Ag-Cu-Be alloy. The reason for an improvement in the macrohardness and the mechanical properties after aging in the case of the alloy with beryllium addition is possibly due to a fine precipitation within the primary phase. The likely explanation for higher macrohardness and the mechanical properties in the Ag-Cu alloy with no beryllium addition after solution treatment and subsequently water-quenching is the higher quantity of copper and the lesser dissolution of the eutectic structure into the matrix. However, when considering the properties and the microstructure after aging, the cast alloy 93.5 wt%Ag, 6.37 wt%Cu and 0.13 wt%Be is superior for applications such as spring in jewelry.

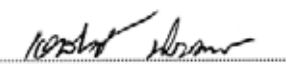
Department Metallurgical Engineering

Student's signature



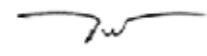
Field of study Metallurgical Engineering

Advisor's signature



Academic year 2006

Co-Advisor's signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ ไชยเรืองศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักขณา ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติจากการสั่นสะเทือนทางกล ดร.ชญชญา ธนชยานนท์ ห้องปฏิบัติการจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) คุณบุญบง กันทะลือ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้าน TEM คุณฉัฐพล รัตนมาลี สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบแรงดึง คุณศิริรัตน์ นิสารัตนพร คุณสิริวรรณ สกุดตันเจริญชัย คุณฉัฐพล ชมแสง และคุณสุทธาวลัย อิมอุไร ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนอย่างดียิ่งจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 สมบัติทางกายภาพของเบริลเลียม.....	4
2.2 สมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะบรอนซ์เบริลเลียม.....	5
2.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงินและธาตุที่ผสมในโลหะเงิน.....	5
2.4 ระบบสมดุลของเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม.....	7
2.4.1 แผนภูมิเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม.....	7
2.4.2 แผนภูมิเฟสระบบเงิน-ทองแดง.....	9
2.4.3 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียม.....	10
2.5 การเพิ่มความแข็งจากการตกตะกอน.....	11
2.6 สมบัติทางกลของวัสดุ.....	14
2.6.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	14
2.6.2 ความเค้นจุดคราก.....	16
2.6.3 ความเป็นสปริง.....	16

	2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3	ระเบียบวิธีการวิจัย.....	21
	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	21
	3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	22
	3.3 วัตถุประสงค์.....	22
	3.4 สารเคมี.....	22
	3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	22
	3.6 การศึกษากระบวนการป้อนเพิ่มความแข็ง.....	23
	3.7 การศึกษาสมบัติความเป็นสปริง.....	24
	3.8 การวิเคราะห์ปริมาณเบรลเลียมด้วยICP.....	24
	3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	25
	3.10 การตรวจวัดค่าความแข็ง.....	25
	3.11 การทดสอบแรงดึง.....	26
	3.12 การตรวจสอบชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นของโลหะผสมด้วยเครื่อง TEM.....	27
	3.13 แผนภูมิกระบวนการทดลอง.....	28
บทที่ 4	รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	29
	4.1 ผลของส่วนผสมทางเคมี.....	29
	4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	30
	4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	30
	4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด...	32
	4.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD.....	37
	4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน.....	39
	4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกล.....	41
	4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	41
	4.3.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	42

4.3.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์หลังการบ่มเพิ่ม ความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 250 °C.....	42
4.3.1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์หลังการบ่มเพิ่ม ความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 300 °C.....	44
4.3.1.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์หลังการบ่มเพิ่ม ความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C.....	46
4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง.....	49
4.3.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	50
4.3.4 ผลการทดสอบสมบัติความเป็นสปริง.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	63
ภาคผนวก ค.....	67
ภาคผนวก ง.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของเบรลเลียม.....	4
2.2 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ผสมในเงินสเตอร์ลิง.....	6
2.3 ค่าโมดูลัสรีไซเคิลของวัสดุบางตัว.....	19
3.1 ส่วนผสมเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบรลเลียม ก่อนและหลังการหล่อ.....	29
4.2 ปริมาณธาตุผสมใน โครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935- ทองแดง-เบรลเลียม ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	33
4.3 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของ เงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะผสมสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบรลเลียม.....	42
4.4 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750°C และบ่มเพิ่มความ แข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 250 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	43
4.5 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่ 750°C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 300 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	45
4.6 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่ 750°C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	47
4.7 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบรลเลียม	49
4.8 ข้อมูลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยวิธีความถี่ธรรมชาติ.....	52
ข 3 ข้อมูลอ้างอิงจากฐานข้อมูลJCPDF.....	67
ค1 ตารางแสดงค่าความแข็งเฉลี่ย.....	68

ก2 ตารางแสดงความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS (MPa)) ความเค้นจุดคราก (σ_y (MPa)) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว(%Elongation) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic (GPa)).....	70
--	----



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ค่าโมดูลัสจำเพาะของวัสดุต่างๆ.....	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงแบบวิกเกอร์กับปริมาณของธาตุชนิดต่างๆ ในโลหะเงินผสม.....	6
2.3(ก) แผนภูมิสมมูลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม.....	8
2.4(ข) แผนภูมิสมมูลทองแดง-เบริลเลียม.....	8
2.4 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ทองแดง.....	10
2.5 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียม.....	11
2.6 กลไกและโครงสร้างการเย็นตัวของการอบชุบแบบตกตะกอนของโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง.....	12
2.7 การเคลื่อนที่ผ่านผลึกของดิสโลเคชัน (Dislocation) ที่มีอนุภาคของตะกอน โดยกลไกแบบ Orowan.....	13
2.8การเป็น โคฮีเรนซ์ (Coherency) ของอนุภาค.....	14
2.8 (ก) สภาพของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดในเนื้อพื้น.....	14
2.8(ข) อนุภาคของตะกอนซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอะตอม.....	14
2.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ.....	15
2.10 กราฟความเค้น – ความเครียดของโลหะ.....	16
2.11 Leaf Spring ภายใต้การรับ Load.....	17
3.1 ภาพขึ้นทดสอบแรงดึง.....	26
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	31
4.1(ก) Ag-6.50%Cu หลังการหล่อ.....	31
4.1(ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังการหล่อ.....	31
4.1(ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	31
4.1(ง) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	31
4.1(จ) Ag-6.50%Cu หลังผ่านการอบเนื้อเดียวแล้วบ่มเพิ่มความแข็ง.....	31

4.1(ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังผ่านการอบเนื้อเดียวแล้วบ่มเพิ่มความแข็ง...	31
4.2 โครงสร้างยูเทคติกของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	34
4.2(ก) Ag-6.50%Cu หลังการหล่อ	34
4.2(ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังการหล่อ	34
4.2(ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	34
4.2(ง) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	34
4.2(จ) Ag-6.50%Cu หลังบ่มเพิ่มความแข็ง	34
4.2(ฉ) Ag-6.37%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง	34
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหลังการหล่อภายหลังการกัดผิวด้วยสารเคมี.....	36
4.3 (ก) Ag-6.50%Cu ในสภาพหลังการหล่อ.....	36
4.3 (ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังการหล่อ	36
4.3(ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	36
4.3(ง) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว	36
4.3(จ) Ag-6.50%Cu ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง	36
4.3(ฉ) Ag-6.37%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง	36
4.4 การกระเจิงของรังสีเอกซ์.....	37
4.4 (ก) การกระเจิงรังสีเอกซ์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) หลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 30 นาที.....	38
4.4 (ข) การกระเจิงรังสีเอกซ์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) หลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 60 นาที.....	38
4.5 โครงสร้างภายในเดนไดรต์ของโลหะผสมหลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวแล้วอบบ่มเพิ่มความแข็ง.....	39
4.5(ก) ภาพไบรท์ฟิลด์แสดงโครงสร้างภายในเดนไดรต์ของAg-6.50%Cu	39
4.5(ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ และตำแหน่งอะตอมจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ของAg-6.50%Cu	39
4.5(ค) ภาพไบรท์ฟิลด์แสดงโครงสร้างภายในเดนไดรต์ของAg-6.37%Cu-0.13%Be	40

4.5(ง) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์และตำแหน่งอะตอมจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ของAg-6.37%Cu-0.13%Be.....	40
4.6ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 250°C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	44
4.7 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 300°C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	46
4.8ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350°C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	48
4.9กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง 935 และ เงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม.....	49
4.10 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากวิธีความถี่ธรรมชาติ.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อีกทั้งทางภาครัฐยังได้มีการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งเอเชีย โดยอุตสาหกรรมด้านเครื่องประดับชนิดที่ผลิตจากโลหะเงินมีการขยายตัวสูงขึ้น โลหะผสมที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้คือ เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ซึ่งมาตรฐานทางการค้ากำหนดให้มีส่วนผสมของเงินบริสุทธิ์อย่างน้อยที่สุด 92.5% ที่เหลือ 7.5% เป็นธาตุอื่น โดยปกติธาตุที่นิยมใช้ผสมคือ ทองแดง เนื่องจากเป็นโลหะที่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเงิน ทำให้โลหะผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นและขึ้นรูปได้ดี สาเหตุที่ไม่ใช้โลหะเงินบริสุทธิ์เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งต่ำ ความเหนียวสูงและขึ้นรูปแล้วคงรูปได้ยาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำเครื่องประดับ

โดยทั่วไปในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเงินจะเติมธาตุทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนเครื่องประดับบางชิ้นเช่น ลิ้นสปริงที่ใช้เป็นข้อต่อในกำไล หรือสายนาฬิกา ต้องการคุณสมบัติด้านความเป็นสปริงสูง แต่โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั่วไปไม่สามารถตอบสนองความต้องการสมบัติด้านความเป็นสปริงได้ ดังนั้นการทำสปริงในเครื่องประดับเงินในอดีตจนถึงปัจจุบันจึงมีอยู่ 2 วิธี วิธีแรกคือ การทำลิ้นสปริง โดยนำโลหะมาผ่านการขึ้นรูปเย็น ซึ่งอาศัยกลไกการเพิ่มความแข็งแบบ Work Hardening กรรมวิธีนี้จะทำให้ความเป็นสปริงและความแข็งเพิ่มขึ้น แต่มีข้อด้อยในด้านการออกแบบที่ไม่สามารถทำได้หลากหลาย นอกจากนี้การประสาน (Soldering) ลิ้นสปริงเข้ากับข้อต่ออื่นด้วยความร้อนส่งผลให้สมบัติความเป็นสปริงลดต่ำลงมาก วิธีที่สองคือการลดปริมาณเงินบริสุทธิ์ลงเหลือ 88% และเพิ่มปริมาณธาตุผสมเช่น ทองแดง และใส่ธาตุ निकิล เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นสปริง แต่กรรมวิธีที่สองนี้ส่งผลให้ปริมาณเงินลดลงไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เพราะในปัจจุบันผู้บริโภคต้องการเครื่องประดับเงิน รวมถึงชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ลิ้นสปริง และรอยบัดกรี ที่มีความบริสุทธิ์ของโลหะเงินไม่ต่ำกว่า 92.5% ผู้ผลิตจึงต้องแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของธาตุเงินให้สูงขึ้นเป็น 93.5%-95.5% โดยโลหะผสมยังมีสมบัติความเป็นสปริงเท่าเดิม

การศึกษาสมบัติความเป็นสปริงในโลหะเงินโดยการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกการตกตะกอน (Precipitation Hardening) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนทางอากาศยานและชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งเทคนิคนี้ยังเป็นความลับทางการค้าและงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ในประเทศ

ไทยยังไม่แพร่หลายมากนัก แต่ในปัจจุบันโลหะผสมที่นิยมนำมาทำสปริง คือ บรอนซ์เบริลเลียม (CuBe) เนื่องจากมีความแข็งแรงดี ความแข็ง และความเหนียวสูงอยู่ในระดับเหล็กกล้าผสม และยังทนต่อการยืดตัวในขณะการใช้งานได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในเกณฑ์สูง จึงเหมาะสำหรับใช้ทำสปริง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อเติมบรอนซ์เบริลเลียมลงในโลหะเงินแล้วจะทำให้ได้สมบัติความเป็นสปริงเพิ่มขึ้น ฉะนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณที่เหมาะสมของธาตุเบริลเลียม อุณหภูมิการอบเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solutionizing Temperature) อุณหภูมิและเวลาการบ่ม (Aging Temperature and Time) รวมทั้งโครงสร้างจุลภาค และชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะผสม เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมในการทำลิ้นสปริง ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ แก่อุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน และลดการนำเข้าโลหะผสมสำเร็จรูปจาก ต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อศึกษาสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุเงิน 93.5% โดยเติมธาตุทองแดง 6.37% และเบริลเลียม 0.13%
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการอบชุบที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกลและความเป็นสปริงของโลหะเงินผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุเงิน 93.5% โดยเติมธาตุทองแดง 6.37% และเบริลเลียม 0.13%
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะผสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิ เวลาในการอบชุบที่เหมาะสม และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในโลหะเงินผสมทองแดง และเบริลเลียม
2. ทดสอบสมบัติความเป็นสปริงของโลหะเงินผสม ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง โดยเฉพาะค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับความเป็นสปริง
3. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) เพื่อหาลักษณะและชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอุณหภูมิ และเวลาในการอบชุบที่เหมาะสมของโลหะเงินผสมบรอนซ์ เบริลเลียม
2. ทราบถึงอิทธิพลของเบริลเลียมต่อความเป็นสปริงและสมบัติทางกลของโลหะเงินผสม
3. ทราบถึงชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะผสม
4. สามารถนำไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินเพื่อลดการนำเข้าโลหะผสม สำเร็จรูปจากต่างประเทศ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

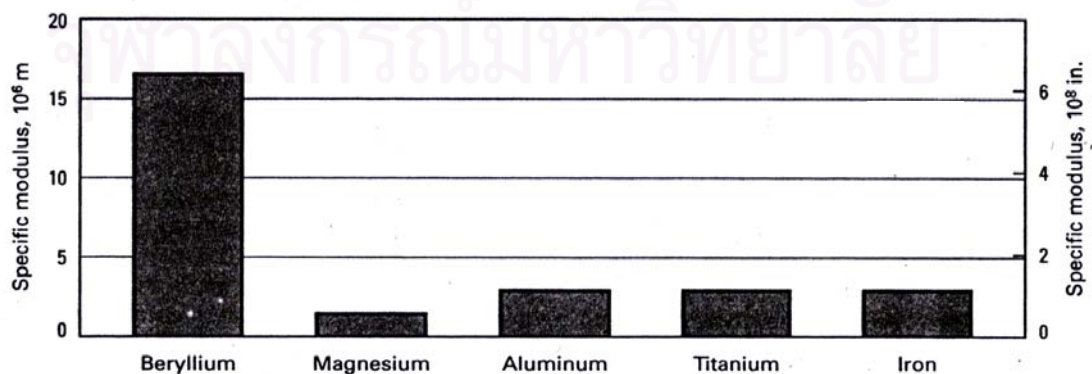
2.1. สมบัติทางกายภาพของเบริลเลียม

เบริลเลียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษทางกายภาพและทางกล เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครื่องมือที่ต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำสูงและชิ้นส่วนทางอากาศยาน เนื่องจากเบริลเลียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งตึง (Stiffness) สูง และสมบัติพิเศษทางกลบางประการ เช่น มีขีดจำกัดความยืดหยุ่นที่แน่นอน (Elastic Limit) นอกจากนี้เบริลเลียมยังมีสมบัติที่น่าสนใจคือ ค่าโมดูลัสจำเพาะ (Specific Modulus) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ต่อความหนาแน่น (Density) สูงกว่าวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในโครงสร้างทางอากาศยาน เช่น เหล็กกล้า อะลูมิเนียม ไทเทเนียม หรือแมกนีเซียม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1⁽¹⁾

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของเบริลเลียม⁽¹⁾

Property	Amount
Elastic modulus, GPa(10^6 psi)	303(44)
Density, g/cm^3 (lb/in^3)	1.8477(0.067)
Ductivity, W/m.K (Btu/h. ft. °F)	210(121)
Coefficient of thermal expansion, $10^{-6}/^{\circ}C$ ($10^{-6}/^{\circ}F$)	11.5(6.4)
Specific heat at room temperature, kJ/kg.K (Btu/lb. °F)	2.17(0.52)
Melting point, $^{\circ}C$ ($^{\circ}F$)	1283(2341)
Mass absorption coefficient (Cu K-alpha), cm^2/g	1.007
Specific modulus, m (in.)(a)	16.7×10^6 (6.56×10^8)

(a) The specific modulus is defined (in inches) from the ratio of the elastic modulus (in psi) and the density (in $lb/in.^3$)



รูปที่ 2.1 ค่าโมดูลัสจำเพาะของวัสดุต่างๆ⁽¹⁾

แต่เบริลเลียมก็มีบางสมบัติที่ไม่พึงประสงค์นั่นคือ เบริลเลียมมีราคาแพงและมีความเป็นพิษสูง เบริลเลียมจะทำให้เกิดโรคปอดชนิดเฉียบพลัน (Acute Berylliosis) หรือ ชนิดเรื้อรัง (Chronic Berylliosis) เมื่อเราหายใจเอาฝุ่นผงหรือควันพิษของเบริลเลียมเข้าไปในปริมาณที่มากกว่ามาตรฐานที่ Occupational Safety and Health Administration กำหนดไว้ คือ มากกว่า $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ของอากาศเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ของอากาศเป็นเวลามากกว่า 30 นาที^{(1),(2)}

2.2. สมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะบรอนซ์เบริลเลียม

บรอนซ์เบริลเลียม จัดเป็นโลหะผสมทองแดงชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรงดึง ความแข็ง และความเหนียวสูงอยู่ในระดับเหล็กกล้าผสม นอกจากนี้ยังทนต่อการขีดตัวในขณะที่ใช้งานได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนอยู่ในเกณฑ์สูง และมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าสูง เนื่องจากโลหะเบริลเลียมมีราคาแพงจึงทำให้ขอบเขตการใช้งานของบรอนซ์เบริลเลียมอยู่ในขอบเขตจำกัด ส่วนใหญ่ใช้ทำอุปกรณ์ เช่น สปริง และไดอะแฟลมที่ใช้ในบรรยากาศที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ใช้ทำเครื่องมือประเภทไม่เกิดประกายไฟ (Non-Sparking Tools) ใช้ในโรงงานแยกแก๊สหรือภายในเหมืองที่อาจมีแก๊สติดไฟรั่วซึมออกจากท่อได้ และใช้ทำส่วนประกอบของแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่ดีทนการกัดกร่อนของพลาสติก แม้จะมีราคาแพงก็ตามแต่ทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานยาวนาน

เนื่องจากบทบาทของเบริลเลียมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมใช้ผสมเพียงไม่เกิน 2.7% ซึ่งจะละลายเป็นสารละลายของแข็ง และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงปริมาณของเบริลเลียมจะละลายได้น้อยลงมาก ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้ด้วยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) โดยให้ความแข็งภายหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งสูงถึง $40 H_{RC}$ และความแข็งแรงดึงสูงถึง 1300-1400 MPa โดยมีอัตราการขีดตัวประมาณ 2 % ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าโลหะผสมทองแดงอื่นๆ การเพิ่มปริมาณของเบริลเลียมให้สูงกว่า 2.7% จะไม่ทำให้ได้โลหะบรอนซ์ที่มีคุณภาพในการใช้งานได้ดีกว่า โลหะบรอนซ์บางชั้นคุณภาพที่ผสมเบริลเลียมต่ำกว่า 2.7% แต่ผสมโลหะชนิดอื่นด้วยเช่น โคบอลต์ จะทำให้ได้บรอนซ์ที่มีคุณภาพเทียบเท่าภายหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็ง โดยมีความเหนียวที่ดีกว่าและอาจจะมีราคาถูกลงกว่าบรอนซ์เบริลเลียม 2.7%⁽³⁾

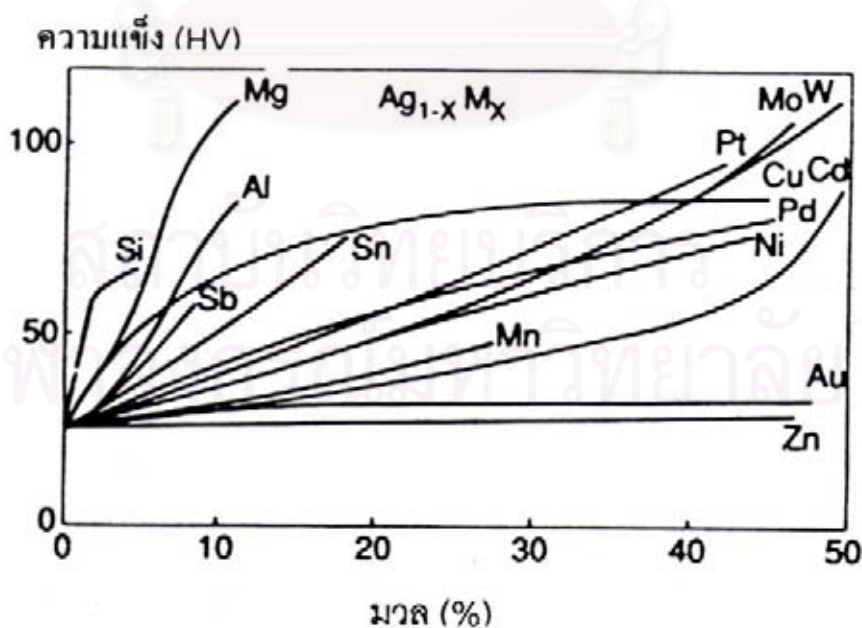
2.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงินและธาตุที่ผสมในโลหะเงิน

ในงานวิจัยนี้ธาตุผสมที่ใช้ คือ ทองแดงและเบริลเลียม และโลหะหลักคือเงิน โดยมีสมบัติทางกายภาพแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ผสมในเงินสเตอร์ลิง⁽⁴⁾

ธาตุ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	โครงสร้างผลึกที่ 20 °C	รัศมีอะตอม (nm)	ความหนาแน่นที่ 20 °C (g/cm ³)	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (10 ⁶ psi)
เงิน	Ag	47	107.87	FCC	0.144	10.49	960	16.3
ทองแดง	Cu	29	63.54	FCC	0.128	8.94	1083	36
เบริลเลียม	Be	4	9.01	HCP	0.149	1.85	1278	40-44

ธาตุผสมหลายชนิดที่มีบทบาทเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะเงินแสดงในรูปที่ 2.2 โดยจะเห็นได้ว่าธาตุแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมให้ความแข็งสูง และสามารถบ่มเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนโดยการตกตะกอนได้ แต่ธาตุทั้ง 2 นี้สามารถออกซิไดซ์กับอากาศเป็นสารประกอบออกไซด์ได้ง่ายและยังทำให้น้ำโลหะมีความหนืดเพิ่มขึ้นสูง ธาตุสังกะสีและนิกเกิลเพิ่มความแข็งในโลหะเงินด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งแบบสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) จึงไม่อาจนำมาใช้ได้ ส่วนธาตุทองแดงและเบริลเลียมมีสมบัติเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนในเนื้อเงินได้ ดังนั้นจึงเป็นธาตุที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผสมกับเงินเพื่อผลิตสปริงโดยนิยมนำมาใช้เป็นโลหะผสมทองแดงเบริลเลียมหรือโลหะบรอนซ์เบริลเลียมก่อน แล้วจึงนำมาใช้ผสมกับเงินภายหลัง ปริมาณธาตุเบริลเลียมที่ผสมอยู่ในช่วง 0.2 – 2.7% โดยน้ำหนัก^{(5), (6)}



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับปริมาณของธาตุชนิดต่างๆ
ในโลหะเงินผสม⁽⁷⁾

2.4 ระบบสมดุลของเงิน - ทองแดง – เบริลเลียม

2.4.1 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม

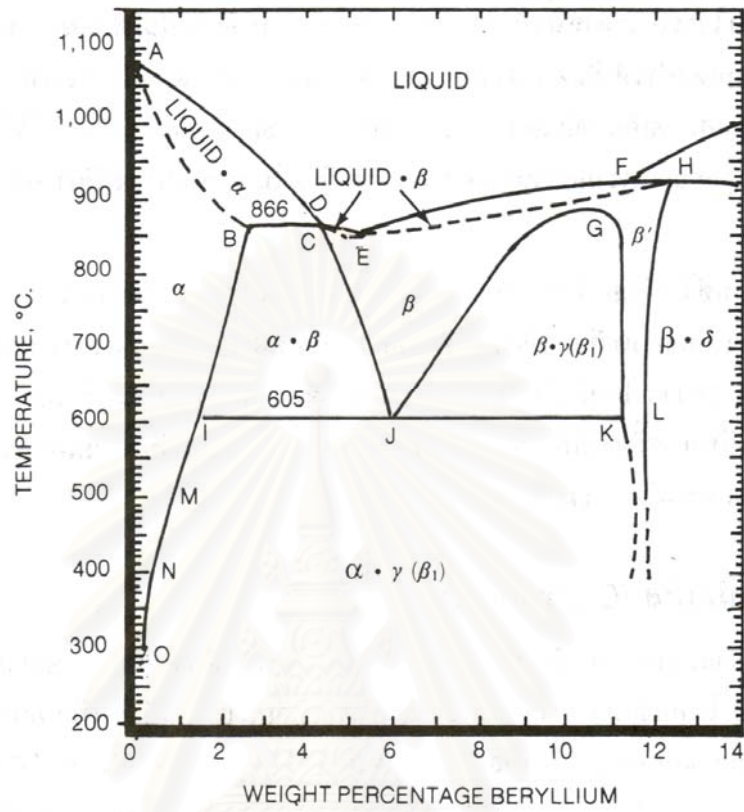
จากแผนภูมิสมดุลในรูปแบบที่ 2.3(ก) และ 2.3(ข) จะพบว่าเบริลเลียมสามารถละลายให้สารละลายของแข็ง (α) สูงสุดได้ 2.7% ที่อุณหภูมิ 866 °C เฟส α มีระบบผลึกเป็น FCC เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความเหนียวสูง ที่อุณหภูมิ 866 °C จะเกิดปฏิกิริยาเพอร์ริเทคติก โดยโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมินี้ทำปฏิกิริยากับเฟส α ให้เฟส β ระบบผลึกเป็น BCC โดยการวางตัวของอะตอมเบริลเลียมไม่เป็นระเบียบ (Disordered Phase) มีความแข็งสูงกว่าเฟส α

ที่อุณหภูมิ 605 °C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ โดยเฟส β จะเปลี่ยนแปลงเป็นเฟส α กับเฟส β_1 ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งอีกชนิดหนึ่งที่มีระบบผลึกเป็น BCC แต่การวางตัวของอะตอมเบริลเลียมเป็นระเบียบ (Ordered Phase) บางครั้งจะเรียกเฟส β_1 หรือ γ

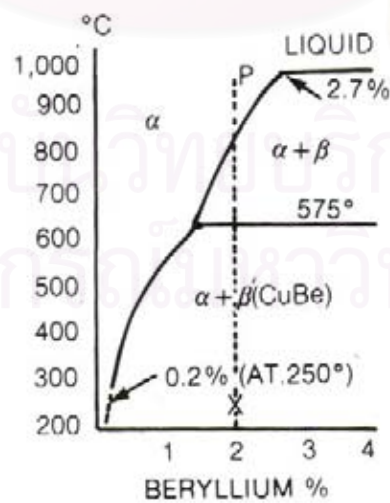
อัตราการละลายของเบริลเลียมในทองแดงจะสูงสุดที่ 866 °C เบริลเลียมละลายได้ 2.7% แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการละลายของเบริลเลียมจะลดลงอย่างรวดเร็วและเหลือเพียง 0.25% ที่อุณหภูมิปกติ ในขณะที่อะตอมของเบริลเลียมถูกผลักออกจากเฟส α อะตอมของเบริลเลียมจะไปรวมตัวกันทำให้เกิดเฟส β หรือ β_1 จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Precipitation Hardening ขึ้น เช่นเดียวกับโลหะผสม Al-Cu

ปรากฏการณ์ Precipitation Hardening ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดเฉพาะบรอนซ์ที่ผสมเบริลเลียมไม่เกิน 2.7% เพราะถ้าเกินขอบเขตนี้จะให้ผลด้านความแข็งน้อยกว่า สมมติบรอนซ์ผสมเบริลเลียม 2% โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติจะประกอบไปด้วยเฟส α และเฟส β_1 (CuBe) เมื่อเผาให้ร้อนเฟส β_1 จะค่อยๆ สลายตัวเหลือน้อยลง โดยมีเฟส α เพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิ 575 °C หรือ 605 °C เฟส β_1 จะเปลี่ยนไปเป็นเฟส β และในขณะที่เดียวกับเฟส β จะค่อยๆ สลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C เฟส β จะสลายตัวหมดคงเหลือแต่เฟส α เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 800 °C หลังจากที่ทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่งที่ 800 °C เพื่อให้การเปลี่ยนเป็นเฟส α สมบูรณ์ นำเอาแท่งโลหะบรอนซ์ออกจากเตาทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำ โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟส α' คือ สารละลายของแข็งที่อยู่ในสภาพเกินจุดอิ่มตัว (Supersaturation) ของเบริลเลียมที่จะมีได้ที่อุณหภูมิปกติ เรียกว่าเป็นการทำ Solution Treatment ความแข็งของบรอนซ์เบริลเลียมในสภาพนี้จะสูงเพียง 60 HR_B สามารถนำไปขึ้นรูปเย็นได้

เมื่อนำโลหะบรอนซ์ไปอบบ่มเพิ่มความแข็งโดยเผาที่อุณหภูมิประมาณ 330 °C ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย เฟส α' จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็น เฟส α กับเฟส β_1 ในลักษณะการตกผลึกขนาดเล็กของเฟส β_1 กระจุกกระจายโดยทั่วไปในเฟส α และจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งอาจสูงถึงระดับ 40 HR_C ในกรณีที่ขึ้นรูปเย็นก่อนอบบ่มเพิ่มความแข็งจะยังได้ความแข็ง และความเค้นแรงดึงสูงขึ้นอีกแต่ค่าอัตราการยืดตัวจะลดลงเหลือประมาณ 2-5 %⁽³⁾



รูปที่ 2.3 (ก) แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม⁽³⁾



รูปที่ 2.3 (ข) แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-เบริลเลียม⁽³⁾

2.4.2 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ทองแดง

จากแผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ทองแดงในรูปที่ 2.4 พบว่าทองแดงสามารถละลายในเงินเป็นสารละลายของแข็งเฟส α ได้สูงสุด 8.8% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 779.1°C และที่อุณหภูมินี้จะเกิดปฏิกิริยายูเทกติกที่ส่วนผสมของทองแดง 28.1% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายของทองแดงในสารละลายของแข็งเฟส α ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่วนเงินสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็งเฟสเบต้า (β phase) ได้สูงสุด 8% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้องโลหะผสมเงินและทองแดงประกอบไปด้วยเฟส 2 เฟส คือ เฟส α และเฟส β

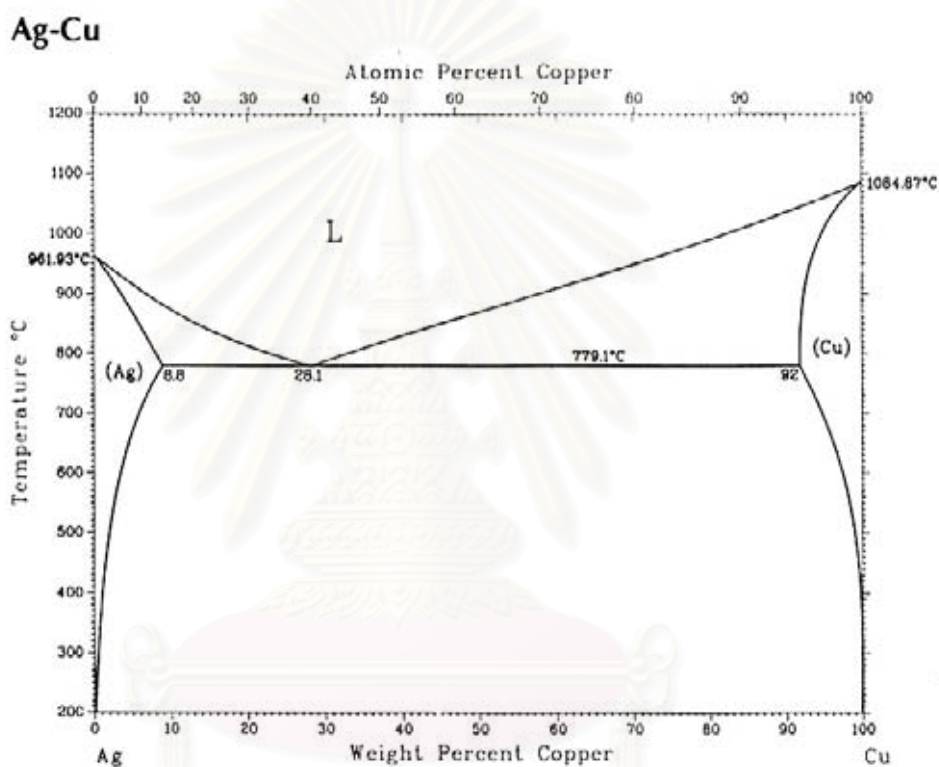
โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ถูกหล่อขึ้นภายใต้สภาวะสมดุล เมื่อปล่อยให้เกิดการแข็งตัว เฟสที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยสารละลายของแข็งปฐมภูมิ (Primary Solid Solution) ที่เป็นเนื้อเดียว แต่โดยปกติการแข็งตัวของงานหล่อจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุล นั่นคือ โครงสร้างภายหลังที่ได้จะประกอบด้วยสารละลายของแข็ง α ปฐมภูมิที่มีธาตุเงินสูง (Primary Silver-rich Phase, α Phase) ซึ่งเริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 896°C ในลักษณะการแข็งตัวแบบกิ่งไม้หรือเดนไดรต์ (Dendritic Solidification) ส่วนของเหลวที่เหลืออยู่จะมีส่วนผสมของทองแดงสูงกว่าของเหลวเริ่มต้น เมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงเย็นตัวลง ความสามารถในการละลายของทองแดงในโลหะเงินเฟส α จะลดลงและตกตะกอนออกมาเป็นสารละลายของแข็ง β ทุติภูมิที่มีธาตุทองแดงสูง (Secondary Copper-rich Phase, β Phase) ขณะเดียวกันของเหลวที่เหลือซึ่งมีปริมาณทองแดงสูงขึ้นไปจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างยูเทกติกที่ประกอบด้วย เฟส α ผสมกับ เฟส β แทรกอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ที่อุณหภูมิประมาณ 796 °C ดังนั้นเฟสที่เกิดขึ้นทั้งหมดของโลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อที่อุณหภูมิห้องจะประกอบไปด้วยสารละลายของแข็ง α ปฐมภูมิที่มีธาตุเงินสูง สารละลายของแข็ง β ทุติภูมิที่มีธาตุทองแดงสูง และโครงสร้างยูเทกติก เฟส β ทุติภูมิที่ตกตะกอนในเฟส α ปฐมภูมิจะมีขนาดเล็กมาก และสามารถละลายกลับเข้าไปในสารละลายได้เมื่อให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิโซลิวัส (Solvus Temperature) ที่ประมาณ 745 °C

กระบวนการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนของโลหะเงินสเตอร์ลิง อธิบายได้ดังนี้

1. การทำให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solutionizing) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 745 °C จะได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็ง เพื่อให้อะตอมตัวถูกละลายกระจายอย่างสม่ำเสมอ
2. เมื่อหุบลงในน้ำเพื่อให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง จุดประสงค์ก็เพื่อป้องกันการแพร่ และการเกิดเฟส β เฟส α ของโลหะผสมจะอยู่ในสภาวะแบบกึ่งเสถียร คือ เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ซึ่งมีปริมาณธาตุทองแดงมากกว่าสมดุล ในขั้นตอนนี้โลหะผสมจะค่อนข้างอ่อนนุ่ม และเกิดการแพร่ช้าจนเฟส α สามารถคงสภาพอยู่ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลานาน

3. การบ่มเพิ่มความแข็ง (Aging) สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงมักบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300°C โดยจะเกิดการตกตะกอนของเฟส β ที่มีทองแดงสูง และมีขนาดเล็กมาก สามารถเพิ่มความแข็งได้

เงินสเตอร์ลิงสามารถเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนได้โดยให้ความร้อนแก่โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ - 1 ชั่วโมง แล้วชุบแข็งในน้ำ หลังจากนั้นบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีความแข็งสูงถึง 145 HB

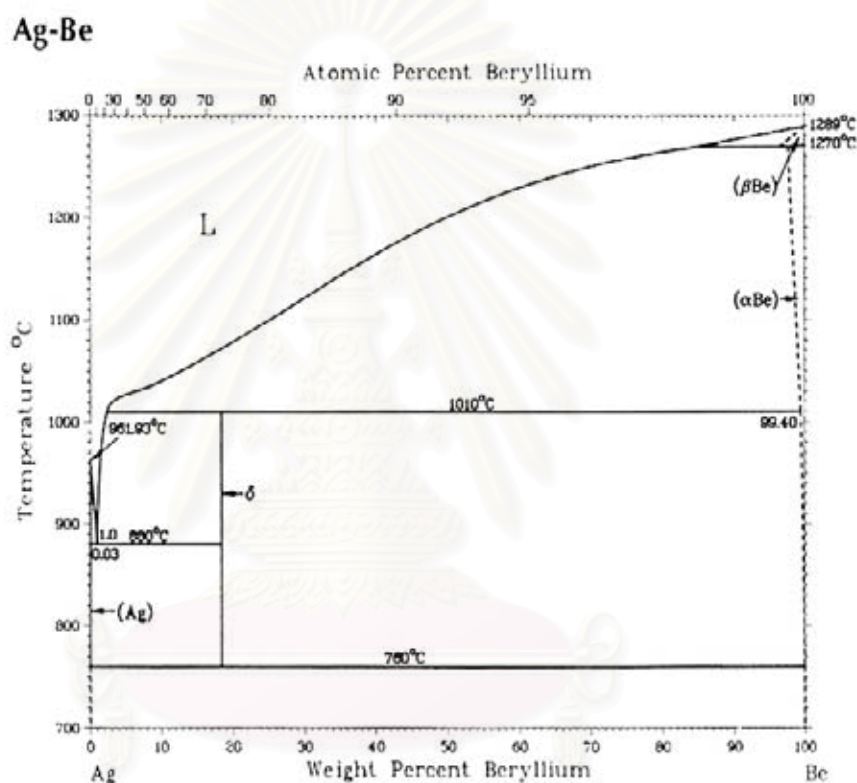


รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน - ทองแดง⁽⁸⁾

2.4.3 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียม

จากแผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียมในรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าความสามารถในการละลายของเบริลเลียมในโลหะเงินมีปริมาณสูงสุด 0.03% โดยน้ำหนัก และความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง มีสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นซึ่งมีสมบัติเปราะคือเฟส δ มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และเสถียรระหว่างช่วงอุณหภูมิ 760 - 1010°C ที่อุณหภูมิประมาณ 880°C จะเกิดปฏิกิริยาแยกตัวซึ่งส่วนประกอบมีส่วนผสมของเบริลเลียม 0.03% โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณของเบริลเลียมมากกว่า 1.5% สารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูง (α) จะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1010°C

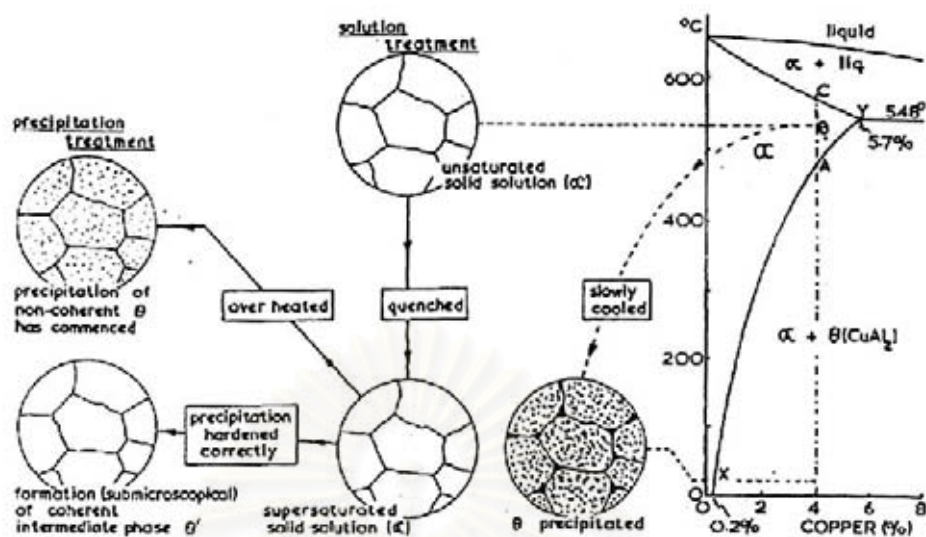
สำหรับในงานวิจัยนี้ธาตุที่จะใช้ผสมในโลหะเงินคือ ธาตุทองแดง 6.37% และเบริลเลียม 0.13% โดยคาดว่าจะการเติมเบริลเลียมซึ่งเป็นโลหะในกลุ่มที่ตกตะกอนได้ดีในโลหะเงิน หลังจากการทำเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 593-760 °C แล้วบ่มเพิ่มความแข็ง (Age Hardening Treatment) ที่อุณหภูมิ 298 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะสามารถเพิ่มความแข็งของเงินสเตอร์ลิงเกรด 935 ได้⁽⁶⁾



รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-เบริลเลียม⁽⁸⁾

2.5 การเพิ่มความแข็งจากการตกตะกอน (Precipitation Strengthening/ Hardening)

วิธีที่จะทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงมากขึ้น แต่ยังคงรักษารูปร่างเดิมของชิ้นงานไว้ได้คือ การเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) โดยการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) ในลักษณะต่างๆ จะทำให้ได้โครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกันไป กลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบการบ่มด้วยความร้อนหรือการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนนี้ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการ 3 ขั้นตอน ดังตัวอย่างกรณีของโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง ในรูปที่ 2.6 ดังนี้



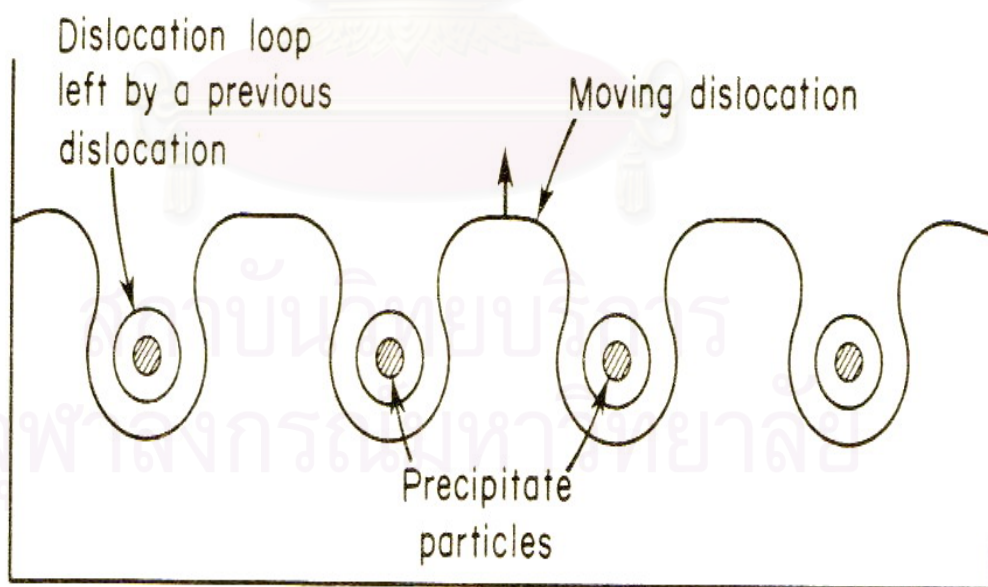
รูปที่ 2.6 กลไกและโครงสร้างการเย็นตัวของการอบชุบแบบตกตะกอนของโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง⁽³⁾

1. การอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solutionization Treatment) จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้คือทำให้เฟสที่สอง (θ - Phase) ที่อยู่ตามรอยต่อเกรนของเฟสที่หนึ่ง (α -Phase) ละลายกลับเข้าไปในเกรนของเฟสแอลฟาทั้งหมด โดยการปฏิบัติในขั้นตอนนี้คือการอบด้วยความร้อนให้อุณหภูมิการอบสูงกว่าอุณหภูมิขีดจำกัดของการละลาย (Solvus Temperature) ดังนั้นเนื้อโลหะที่ได้จากการอบจะมีเฟสเดียวและเป็นเฟสสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ (Saturated Solid Solution) ที่อุณหภูมิดังกล่าว

2. การชุบอย่างรวดเร็ว (Quenching) ในขั้นตอนนี้เป็นการนำโลหะออกจากเตาอบที่อุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 แล้วรีบจุ่มลงในตัวกลางซึ่งอาจจะเป็นน้ำหรือน้ำเย็น เพื่อให้โลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นการยับยั้งการแพร่ของอะตอมธาตุผสมไม่ให้กลับมาที่รอยต่อเกรนหรือเป็นการขัดขวางไม่ให้โลหะผสมเปลี่ยนแปลงไปตามแผนภูมิสมดุล ในขั้นตอนนี้จะได้สารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution)

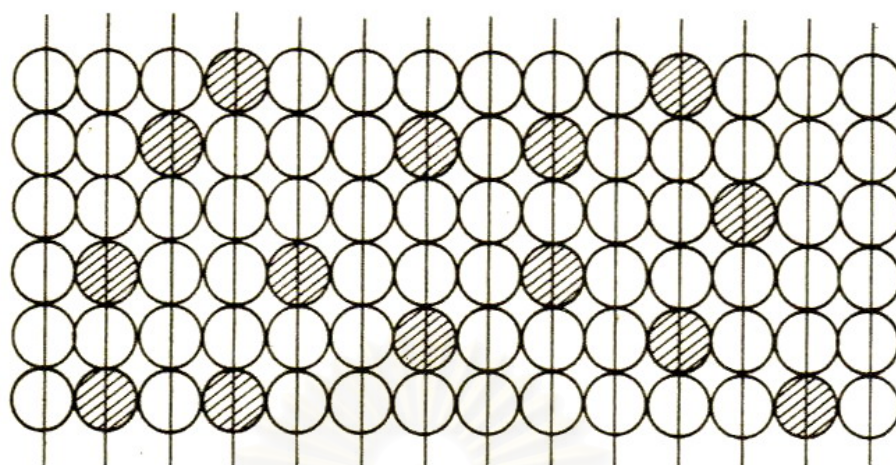
3. การบ่มเพิ่มความแข็ง (Aging) เนื่องจากโลหะในขั้นตอนที่ 2 เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ซึ่งจะไม่เสถียร เมื่ออบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้เฟส θ' ตกตะกอนในเฟสแอลฟา (α) ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่หากบ่มนานเกินไป (Over Aging) จะทำให้ขนาดของเฟส θ' ใหญ่ขึ้นจนค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นเฟส θ ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงลดลงได้

กลไกการเพิ่มความแข็งแรงเป็นผลมาจากการที่ดิสโลเคชัน (Dislocation) เคลื่อนที่ลำบากขึ้น โดยที่ ดิสโลเคชัน (Dislocation) จะเคลื่อนที่ผ่านตะกอน (Precipitate) โดยใช้ความเค้นมากกว่าธรรมดา รูปที่ 2.7 แสดงถึงกลไก (Mechanism) ที่เสนอโดย Orowan จะเห็นว่าอนุภาคของตะกอนจะทำหน้าที่คล้ายกับ Frank-Reed Source ทำให้เกิดลูปดิสโลเคชัน (Dislocation Loop) ขึ้นรอบๆ อนุภาคเมื่อดิสโลเคชัน เส้นหนึ่งวิ่งผ่านไป ซึ่งลูป (Loop) นี้มีสนามความเค้น (Stress Field) เกิดเพิ่มขึ้นทำให้ดิสโลเคชันเส้นต่อไปวิ่งผ่านไปได้อย่างขึ้น เชื่อกันว่าสนามความเค้นรอบๆ ดิสโลเคชันเป็นตัวทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างยาก และจะมีผลอย่างมากเมื่ออนุภาคนั้น โคฮีเรนต์ (Coherent) กับเนื้อพื้น (Matrix) รูปที่ 2.8 แสดงถึงการเป็นโคฮีเรนต์ (Coherency) ของอนุภาคโดยรูปที่ 2.8 (ก) แสดงถึงสภาพของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) โดยอะตอมที่จะเป็นอะตอมของตัวถูกละลาย (Solute Atoms) ส่วนรูป 2.8 (ข) เป็นอนุภาคที่โคฮีเรนต์ (Coherent) กับเนื้อพื้น จะเห็นว่ามี ความเครียดของแลตทิซ (Lattice) เกิดขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะขนาดของอะตอมของตัวถูกละลาย (Solute Atoms) กับอะตอมของตัวทำละลาย (Solvent Atoms) ไม่เท่ากัน ความเครียดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคนั้น จะเพิ่มไปจนกระทั่งอนุภาคแยกตัวออกมาจากเนื้อพื้นโดยเกิดรอยต่อเกรน (Grain Boundary) ขึ้นมาทำให้สูญเสียการเป็นโคฮีเรนต์ (Coherency) ไปและก็มีผลทำให้ความเครียดลดลง⁽⁹⁾

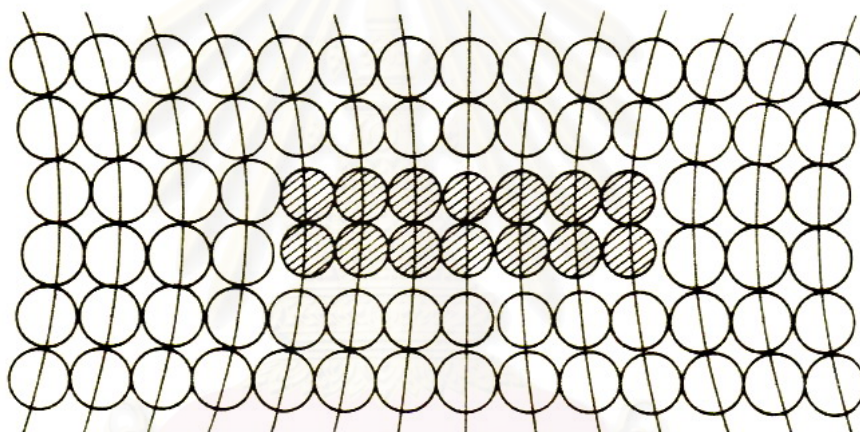


รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ผ่านผลึก ที่มีอนุภาคของตะกอน โดยกลไกแบบ

Orowan⁽⁹⁾



(ก) สภาพของสารละลายอิมตัวยิ่งยวดในเนื้อพื้น⁽⁹⁾



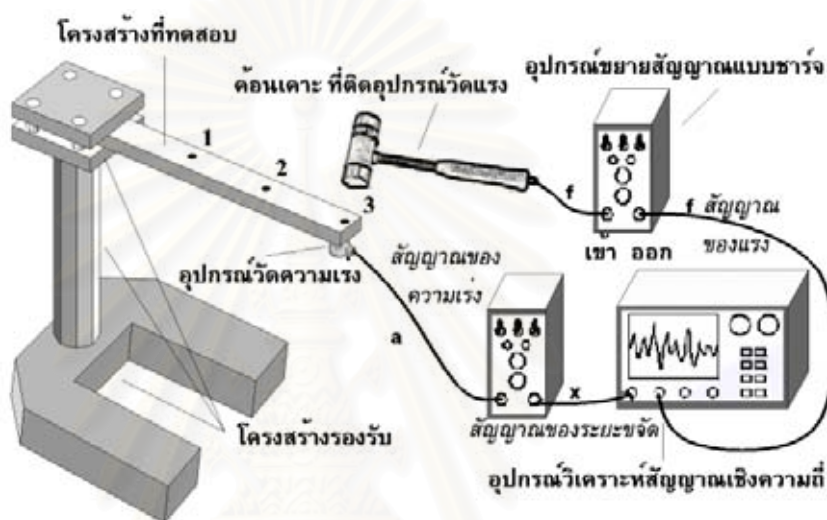
(ข) อนุภาคของตะกอนซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอะตอมตัวถูกละลาย (สีดำ) ซึ่งโคฮีเรนต์กับเนื้อพื้น⁽⁹⁾

รูปที่ 2.8 การเป็นโคฮีเรนต์ (Coherency) ของอนุภาค

2.6 สมบัติทางกลของวัสดุ

2.6.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) มีหน่วยเป็น GPa หรือ GN/m^2 คือ อัตราส่วนของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ในบริเวณที่ต่ำกว่าขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional Limit) บนกราฟความเค้น-ความเครียด ความชันของเส้นตรงคือค่า Stiffness หรือ Springiness โดยที่ Stiffness คือความสามารถของวัสดุที่ยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้เมื่อถูกกระทำด้วยภาระ ถ้าภาระเป็นแบบแรงดึงหรือแรงอัดจะเรียกว่า Young's modulus หรือ Modulus of Elasticity (E) ถ้าเป็นแรงเฉือนจะเรียกว่า Modulus of Rigidity หรือ Shear Modulus (G) ซึ่งค่าโมดูลัสจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

การวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Measurement of Elastic Modulus) สามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการใส่แรงกดที่ปลายของวัสดุและวัดความเครียด โดยจะได้ค่า $E = \sigma / \epsilon$ แต่ค่าที่ได้จากวิธีการวัดแบบนี้เป็นการวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ไม่ถูกต้องเท่าใดนัก เพราะถ้าโมดูลัสมีค่ามาก ความเที่ยงตรงของค่าที่ได้จะน้อยมาก วิธีการวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ดีกว่าวิธีการนี้คือการวัดโดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติจากการสั่นสะเทือนทางกล (Natural Frequency of Vibration) ดังรูปที่ 2.9 โดยค่าความถี่ธรรมชาติ f_n มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hertz) ^{(10), (11), (12)}



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์การวัดความถี่ธรรมชาติ

ซึ่งสามารถคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้จากสมการ ⁽¹³⁾

$$f_n = (1.875^2 / 2\pi) * (EI / \rho AL^4)^{1/2} \text{ หรือ} \\ E = (2\pi f_n / 1.875^2)^2 * (\rho AL^4 / I) \quad (2.1)$$

เมื่อ f_n = ความถี่ธรรมชาติ (Hz)

E = Young's Modulus (GPa)

I = Moment of Inertia (m^4)

ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Kg/m^3)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

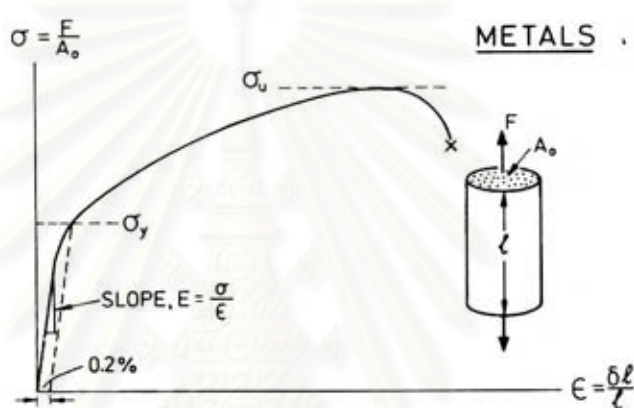
L = ความยาวของชิ้นงาน (m)

$I = 1/12 bh^3$

b = ความกว้างของชิ้นงาน (m)

t = ความหนาของชิ้นงาน (m)

2.6.2 ความเค้นจุดคราก (Yield Stress หรือ Yield Strength, σ_y) มีหน่วยเป็น MPa หรือ MN/m^2 จะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม หรือทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เรามีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10-0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gauge Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.10 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความเค้น - ความเครียดของโลหะ

2.6.3 ความเป็นสปริง

2.6.3.1 การพิจารณาความเป็นสปริง

ค่าที่จะนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสม คือ ค่าโมดูลัสรีไซเคียน (Modulus of Resilience) $\sigma_y^2/2E$ เนื่องจากสปริงเป็นชิ้นส่วนที่เมื่อได้รับแรงกระทำแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง(Deformation) แต่เมื่อเอาแรงออกก็สามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ดังนั้นสมบัติที่สำคัญของสปริงก็คือ การเก็บพลังงานช่วงยืดหยุ่น (Elastic Energy Storing) สมบัติทางกลที่บ่งชี้ถึงรีไซเคียนคือ โมดูลัสของรีไซเคียน (U_r) ซึ่งก็คือพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรในการออกแรงทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นจากสภาพที่ไม่มีภาวะกรรมใดๆ ไปจนถึงจุดที่เกิดการคราก (Yielding)

การคำนวณค่าโมดูลัสรีไซเคียนของวัสดุที่ถูกทดสอบแรงดึงตามแนวแกนแบบทิศทางเดียวหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม

$$U_r = \int_{\sigma_y=0}^{\sigma_y=\sigma_y} \sigma_y d\epsilon_y \quad (2.2)$$

หากสมมติว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นสามเหลี่ยม

$$U_r = 1/2 \sigma_y \varepsilon_y \quad (2.3)$$

โดย σ_y คือ ค่าความเค้น ณ จุดที่เกิดการคราก
 ε_y คือ ค่าความเครียดที่เกิดจากการคราก

หน่วยของริโซเลียนจึงเท่ากับผลคูณของหน่วยแกนทั้งสองในกราฟความเค้น-ความเครียด สำหรับระบบ SI จะมีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3 เทียบเท่ากับ Pa) ในระบบอังกฤษมีหน่วยเป็น นิ้ว-ปอนด์แรงต่อลูกบาศก์นิ้ว ($in-lb/in^3$ หรือเทียบเท่ากับ psi) สรุปได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-เครียด คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั่นเอง จากกฎของฮุก (Hook's Law)

$$E = \sigma_y / \varepsilon_y \quad (2.4)$$

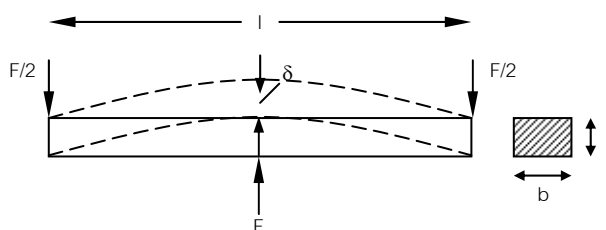
เมื่อแทนค่า ε_y ในสมการ 2.3 จะได้

$$U_r = 1/2 \sigma_y \varepsilon_y = 1/2 \sigma_y (\sigma_y / E) = \sigma_y^2 / 2E \quad (2.5)$$

สำหรับสปริงเราต้องการค่าตามสมการ (2.4) ที่สูง และเพื่อไม่ให้สปริงเกิดความเสียหายค่าความเค้นที่ใช้ได้ต้องไม่เกินค่าความเค้นจุดคราก σ_y นั่นคือ $\sigma \leq \sigma_y$

2.6.3.2 การเลือกวัสดุสำหรับสปริง (Elastic Design: Materials for Spring)

ถึงแม้ว่า Leaf Spring จะมีหลายรูปแบบแต่โดยพื้นฐานจะมีลักษณะเป็นคานอิลาสติกรับแรงคด โดยคานที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัวรองรับอย่างง่ายรับภาระ F ตรงกลาง จะมีระยะแฉ่น δ ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 Leaf Spring ภายใต้การรับ Load ⁽¹⁰⁾

ดังนั้นระยะแอ่น

$$\delta = \frac{Fl^3}{4Ebt^3} \quad (2.6)$$

จากสมการข้างต้น

$$\begin{aligned} F &= \text{แรงค้ำ} \\ l &= \text{ความยาวของคาน} \\ t &= \text{ความหนา} \\ b &= \text{ความกว้าง} \\ E &= \text{โมดูลัสของวัสดุที่จะนำมาทำสปริง} \end{aligned}$$

ค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ผิวตรงจุดกึ่งกลางของคาน (เพราะมีโมเมนต์ค้ำคามากที่สุด) ดังนั้น

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bt^2} \quad (2.7)$$

สปริงจะไม่เสียรูปอย่างถาวรระหว่างใช้งาน นั่นคือเกิด Spring Back จะต้องมีความเค้นสูงสุดต่ำกว่าค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength)

$$\frac{3Fl}{2bt^2} < \sigma_y \quad (2.8)$$

แทนสมการ 2.8 ในสมการ 2.6 จะได้

$$(\sigma_y / E) > 6\delta l / l^2 \quad (2.9)$$

จากสมการ 2.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสปริงรับภาระ F แล้วจะแอ่นตัวไปเป็นระยะ δ ดังนั้นอัตราส่วน σ_y / E จะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะหลีกเลี่ยงการเสียรูปแบบถาวร สปริงที่ดีควรทำด้วยวัสดุที่มีค่านี้สูง ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ σ_y / E วัสดุที่จะนำมาทำสปริงจะต้องมีความเค้นจุดคราก (Yield Strength) ที่สูง ซึ่งสามารถทำได้โดย Solid Solution, Strengthening, Work-Hardening และ Precipitate Strengthening เช่นใน Spring Steel การอบอ่อนจะทำให้ความแข็งแรงต่ำลงและเป็นสาเหตุให้อ่อนภาคตกตะกอนหยาบขึ้น ค่าความเค้นจุดครากที่ลดลงจะทำให้วัสดุดังกล่าวไม่เหมาะจะทำสปริง

ตัวอย่างการเลือกวัสดุสำหรับสปริง

กำหนดให้แกนสปริงมี ความหนา	$(t) = 2$ มิลลิเมตร
ความกว้าง	$(b) = 50$ มิลลิเมตร
ความยาว	$(l) = 127$ มิลลิเมตร
ระยะแอน	≤ 6.35 มิลลิเมตร

แทนค่าในสมการ 2.9 จะได้

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

เมื่อเทียบค่า σ_y / E จากตารางที่ 2.3 แล้วจะเห็นได้ว่า Spring Steel ซึ่งเป็นวัสดุที่ราคาถูกที่สุดในตารางก็สามารถนำมาเป็นวัสดุสำหรับสปริงได้ แต่จะมีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) น้อย ส่วนบรอนซ์เบริลเลียม (Beryllium-Copper) มีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุสำหรับสปริงมาก เนื่องจากมีค่าความปลอดภัยมากที่สุด แต่มีราคาแพงกว่า

ตารางที่ 2.3 ค่าโมดูลัสรีไซเคิลของวัสดุชนิดต่างๆ ^{(10), (14), (15)}

วัสดุ	E	σ_y	σ_y / E	$\sigma_y^2 / 2E$
	(GPa)	(MPa)	(KPa)	(KPa)
(1)Medium-carbon Steel	207	310	1.50×10^{-3}	232
(2)High-carbon Spring Steel	207	965	4.66×10^{-3}	2250
(3)Duraluminium	72	124	1.72×10^{-3}	107
(4)Copper	110	28	0.25×10^{-3}	3.5
(5)Brass	120	638	5.32×10^{-3}	1696
(6)Bronze	120	640	5.33×10^{-3}	1707
(7)Beryllium Copper	120	1380	11.5×10^{-3}	7935
(8)Acrylic Polymer	3.4	14	4.11×10^{-3}	28
(9)Phosphor Bronze	120	770	6.43×10^{-3}	2470
(10)Spring Steel	200	1300	6.8×10^{-3}	4225
(11)Stainless Steel	200	1000	5.0×10^{-3}	2500
(12)Nimonic	200	614	3.08×10^{-3}	3.07
(13)Silver-Magnesium-Nikel	83	360	4.33×10^{-3}	781

No.1-6 อ้างอิงข้อมูลจาก (10)

No.7-12 อ้างอิงข้อมูลจาก (14)

No.13 อ้างอิงข้อมูลจาก (15)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ใน European Patent No. 399,261⁽⁵⁾ Oesterheld ได้ศึกษาระบบของเบริลเลียม-เงิน และเบริลเลียม-ทองแดง พบว่าในระบบของเบริลเลียม-เงินที่มีปริมาณเบริลเลียมน้อยจะช่วยต้านทานการหมอง และสัดส่วนของเบริลเลียม 3% จะช่วยต้านทานไอของสารประกอบซัลเฟอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าความเหนียว (Ductility) ของโลหะผสมจะลดลงเมื่อปริมาณเบริลเลียมเพิ่มขึ้น เงินผสมเบริลเลียม 3-5% เมื่อนำไปรีดจะเปราะมาก และเงินผสมเบริลเลียมที่มีส่วนผสม 90% Ag, 1.5%Be และ 8.5%Cu ที่อุณหภูมิ 880°C จะเกิดปฏิกิริยาอุเทกติก ซึ่งมีส่วนผสมของเบริลเลียม 1% เมื่อปริมาณของเบริลเลียมมากกว่า 1.5% ความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็งเบริลเลียมในเงินจะลดลง ทำให้ปฏิกิริยาอุเทกติก เกิดขึ้นที่ 0.3% เบริลเลียม และอุณหภูมิของปฏิกิริยาอุเทกติกจะต่ำลง อีกทั้งสารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูงจะเริ่มแยกตัว หากขนาดและปริมาณเพียงพอจะทำให้เกิดรอยค่าง (Mirror-like) ซึ่งเป็นเหตุผลในการจำกัดปริมาณของเบริลเลียมในระบบสามส่วนผสมที่มีส่วนผสมของโลหะเงินไม่น้อยกว่า 90% ความสามารถในการละลายของเบริลเลียมและการเริ่มแยกตัวของสารละลายของแข็งที่มีเบริลเลียมสูง จะไม่แตกต่างกับแบบสองส่วนผสม ซึ่งเป็นความจริงเฉพาะในกรณีของโลหะผสม Ag-Cu-Be มาตรฐานทางการค้าของโลหะเงินที่ผสมเบริลเลียม 1.5% กำหนดว่าต้องมีโลหะเงิน 92.5% ส่วนที่เหลือคือทองแดง ดังนั้นมาตรฐานของโลหะเงินผสมที่ใช้ทำเครื่องประดับควรจะมี 92.5%Ag, 7%Cu และ 0.5%Be สำหรับการขึ้นรูปโลหะผสมเงินที่มีสัดส่วนของเบริลเลียมเล็กน้อย เช่นการทุบ การรีดร้อนหรือรีดเย็น จะทำเหมือนกับโลหะเงินปกติที่ไม่มีเบริลเลียมผสมอยู่ โดยไม่ต้องอบชุบด้วยความร้อนหรืออบอ่อนอีก ในการผลิตโลหะผสมมักจะเติมเบริลเลียมในรูปโลหะผสม Cu-Be โลหะผสม Ag-Cu-Be มีอุณหภูมิหลอมเหลว และสมบัติการหล่อจะเหมือนกับโลหะผสมที่ไม่มีเบริลเลียม สิ่งที่ยากในการผลิตเพื่อการค้าของโลหะผสมเบริลเลียมคือการเกิดออกซิเดชันของเบริลเลียม โดยเฉพาะการนำเศษวัสดุมาหลอมใหม่ เนื่องจากการปนเปื้อนของออกไซด์มากับเศษวัสดุ ซึ่งจะลอยขึ้นมาด้านบนยากต่อการควบคุมส่วนผสมให้ถูกต้องได้ สำหรับโลหะผสม 0.5% เบริลเลียม จะควบคุมส่วนผสมได้ง่ายที่สุด

ใน U.S. Patent No 1,984,225⁽⁶⁾ Mcfarland ได้ศึกษาถึงการเพิ่มความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงโดยการบ่มแข็ง พบว่าการเติมโลหะในกลุ่มที่ตกตะกอนได้ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ตะกั่ว พลวง และเบริลเลียม ในปริมาณ 0.1 – 5% โดยทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution Heat treatment) ที่อุณหภูมิ 593-760° C และบ่มเพิ่มความแข็ง (Age Hardening Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 298°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเพิ่มความแข็งของเงินสเตอร์ลิงจาก 80 HRB เป็น 94 HRB โดยธาตุที่นิยมคือเบริลเลียมเนื่องจากให้สมบัติที่ดีกว่าทุกธาตุในกลุ่ม

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ยาง

- กรอบอะลูมิเนียมวัดขนาดแม่พิมพ์ (Aluminium Mold Frame)
- ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ (Mold Rubber)
- มีดผ่าแม่พิมพ์ (Mold Knife)
- หัวจุกทางน้ำโลหะเข้่า (Sprue Former)
- ต้นแบบตัวเรือน (Jewelry Model)
- เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง (Vulcanizer Machine)

อุปกรณ์ในการหล่อเทียนและติดต้น

- เครื่องฉีดเทียน (Digital Vacuum Wax Injector) Yasui รุ่น D-VWI
- เทียน (Wax)
- สเปรย์ แป้ง และแปรงสำหรับทำความสะอาดแม่พิมพ์ยาง
- ฐานยาง (Sprue Base)
- หัวแรงไฟฟ้า

อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อและอบเผา

- กระบอกล่อ
- ปูนปลาสเตอร์หล่อแบบต้นเทียน
- เครื่องผสมปูนหล่อ และเครื่องสุญญากาศ (Mixer and Vacuum Investment) Tektai
- กระบอกลงน้ำและตาชั่ง
- เตาอบแม่พิมพ์ Oldmoon รุ่น BU-450
- อุปกรณ์ในการหล่อและหลอมโลหะ
- เตาหล่อและหลอมแบบสุญญากาศ VPC (Vacuum Pressure Casting Machine) Vetter Technik รุ่น IHG 6000 พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมโลหะ
- กระบอกล่อที่ได้จากการอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ
- อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการหลอมและหล่อโลหะ
- เครื่องทำความสะอาดชิ้นงานความดันสูง Manit

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)
- เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Universal Tensile Testing machine)
- เครื่องทดสอบสมบัติความเป็นสปริงแบบสั่น (Vibration Testing machine)
- เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing machine)
- เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยวิธี ICP (Inductively Coupled Plasma Atomic Spectroscopy)

3.3 วัสดุดิบ

- เม็ดโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์
- เม็ดโลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์
- โลหะผสมทองแดงและเบริลเลียม : 97.3%Cu-2.7%Be โดยน้ำหนัก

3.4 สารเคมี

- แอลกอฮอล์ (C_2H_6O) Absolute (AR)
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) 30%
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 50%
- น้ำกลั่น (H_2O)
- กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 40%
- ผงเพชร (Diamond Paste) ขนาด 3 และ $\frac{1}{4}$ ไมครอน

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 สืบค้นข้อมูลจากเอกสารต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

3.5.2 ศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองแดงผสมเบริลเลียมที่นำมาใช้เป็นวัสดุดิบ

3.5.3 ทดลองหล่อชิ้นงานและศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ

- 3.5.3.1 ทำต้นแบบตัวเรือนแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากโลหะเงินผสมขนาดกว้าง 9 มิลลิเมตร ยาว 26 มิลลิเมตร และหนา 1.5 มิลลิเมตร และต้นแบบที่ใช้ทดสอบแรงดึง ฉีดเทียนที่หลอมละลายให้เข้าไปในแม่พิมพ์อย่างค้ำด้วยเครื่องฉีดเทียนได้แบบเทียนลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าและลักษณะตามแบบมาตรฐาน ASTM E8 M-96

- 3.5.3.2 นำแบบเทียน (Wax Pattern) ที่ได้มาติดต้นเทียนเพื่อจัดให้เป็นกลุ่มอย่างมีระเบียบเพื่อสามารถหล่อชิ้นงานได้ครั้งละจำนวนมาก
- 3.5.3.3 ชั่งน้ำหนักต้นเทียนที่ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาส่วนผสมโลหะที่ต้องการหล่อ
- 3.5.3.4 นำต้นเทียนใส่ในกระบอกล่อ แล้วดวงอัตราส่วนระหว่างปูนหล่อและน้ำให้เหมาะสม โดยให้น้ำมีน้ำหนัก 37 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนหล่อ
- 3.5.3.5 ผสมปูนหลอกับน้ำด้วยเครื่องผสมปูนหล่อแล้วดูดอากาศออกจากเนื้อปูนหล่อด้วยเครื่องสุญญากาศ (Vacuum Machine) หลังจากนั้นเทปูนลงในกระบอกล่อ แล้วดูดอากาศออกอีกครั้ง
- 3.5.3.6 รอให้กระบอกล่อแห้งโดยทิ้งไว้ในสภาวะปกติ แล้วนำกระบอกล่อเข้าเตาอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ เพื่อจัดเทียนออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อและเพิ่มความแข็งแรงของปูน โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาขึ้นช้าๆ แล้วปรับอุณหภูมิให้คงที่ ณ 580°C ใช้เวลาในการอบเผาทั้งสิ้นประมาณ 12 ชั่วโมง
- 3.5.3.7 เตรียมส่วนผสมและอุปกรณ์ในการหล่อและหลอมโลหะผสมเงิน 935 ทั้งหมด 2 ชุด โดยชั่งน้ำหนักเม็ดเงินบริสุทธิ์ 99.99% ปริมาณ 1,634.57 กรัม เม็ดทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ปริมาณ 67.54 กรัม และโลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม 97.3:2.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 76.52 กรัม ให้มีปริมาณเบริลเลียม 0.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับเงิน 935 อัตราส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 3.5.3.8 หลอมและหล่อโลหะผสมด้วยเครื่องหลอมและหล่อแบบสุญญากาศแล้วหล่อที่อุณหภูมิ 1000°C สำหรับโลหะเงินผสม 935 และโลหะเงิน 935 ผสมทองแดง-เบริลเลียม
- 3.5.3.9 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องหล่อโลหะ ทิ้งไว้ให้โลหะเย็นตัวลงประมาณ 30 นาที แล้วนำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาดชิ้นงานหล่อด้วยเครื่องฉีดน้ำความดันสูง เพื่อทำลายปูนหล่อออกจากกระบอกล่อ
- 3.5.3.10 นำต้นชิ้นงานโลหะที่ได้ทำความสะอาดด้วยการจุ่มกรดกัดแก้วเพื่อกัดผิวชิ้นงานให้สะอาด ตัดแต่งและจัดชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบต่อไป

3.6 การศึกษากระบวนการบ่มเพิ่มความแข็ง

- 3.6.1 นำชิ้นงานหล่อจากแบบหล่อต้นเทียนมาอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลโดยอุณหภูมิในการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750°C
- 3.6.2 จุ่มลงน้ำเย็นอย่างรวดเร็วเพื่อลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับชุด	ส่วนผสม (%wt)		
	เงิน	ทองแดง	เบริลเลียม
1	93.5	6.5	0
2	93.5	6.33	0.17

3.6.3 บ่มเพิ่มความแข็งชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 250 °C, 300 °C และ 350 °C โดยใช้ระยะเวลาการบ่ม 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

3.6.4 นำชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อต้นเทียนและหลังจากการบ่มเพิ่มความแข็งมาทดสอบแรงดึง ค่าความแข็ง สมบัติความเป็นสปริง ตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน

3.7 การศึกษาสมบัติความเป็นสปริง

3.7.1 หล่อชิ้นงานให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 มม. ยาว 90 มม.หนา 2 มม. นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติความเป็นสปริงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติความเป็นสปริงแบบสั่น (Vibration Testing Machine) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n)

3.7.2 คำนวณค่า Young's Modulus จากสมการ

$$f_n = (1.875^2 / 2\pi) * (EI / \rho AL^4)^{1/2} \text{ หรือ}$$

$$E = (2\pi f_n / 1.875^2)^2 * (\rho AL^4 / I)$$

3.7.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.8 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเบริลเลียมด้วยเครื่องมือ ICP

ส่งชิ้นตัวอย่างทดสอบไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเบริลเลียม ที่ศูนย์พัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ ด้วยเครื่องมือ ICP

การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุด้วย ICP ทำได้โดย

- 3.8.1 ชั่งตัวอย่างปริมาณ 0.3000 กรัม ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 10.00 มิลลิลิตร
- 3.8.2 ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จนละลายหมดแล้ว จากนั้นผสมน้ำให้ได้ปริมาตรรวม 50.00 มิลลิลิตร
- 3.8.3 จากนั้นวิเคราะห์สารละลายโดยสารละลายจะถูกเปลี่ยนให้เป็นตะกอน แล้วถูกพาเข้าพลาสมาของ ICP Torch ซึ่งสารละลายจะกลายเป็นไอและอะตอม แล้วเกิดการกระตุ้น อะตอมที่ถูกกระตุ้นจะเปล่งแสงซึ่งมีลักษณะเฉพาะออกมา
- 3.8.4 แสงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อแยกเอาเฉพาะแสงที่ต้องการวัดความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วให้แสงดังกล่าวตกลงบนดีเท็กเตอร์ เพื่อวัดออกมาเป็นสัญญาณซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นได้

3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

- 3.9.1 เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานหล่อ แล้วเตรียมผิวโดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 แล้วขัดละเอียด (Polishing) ด้วยผงเพชรขนาด 3, 1 และ ¼ ไมครอน ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าให้แห้ง
- 3.9.2 จากนั้นนำไปกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลาย $50\text{vol}\% \text{H}_2\text{O}_2 + 25\text{vol}\% \text{NH}_4\text{OH} + 25\text{vol}\% \text{H}_2\text{O}$ ประมาณ 5-10 วินาที
- 3.9.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-5910LV และเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของบริษัท Oxford Instrument รุ่น ATW 2
- 3.9.4 วิเคราะห์และสรุปผล

3.10 การตรวจวัดค่าความแข็ง

เนื่องจากชิ้นงานสำหรับทดลองมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาตัวแปรการบ่มเพิ่มความแข็งที่เหมาะสมเสียก่อน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาการบ่ม สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้อุณหภูมิที่อบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชุบอย่างรวดเร็วในน้ำเย็นที่ลดอุณหภูมิโดยน้ำแข็งจนมีอุณหภูมิตั้งแต่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทดลองบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาเท่ากับ 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดเพื่อเอาชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการอบออกไป โดยความลึกที่ขัดออกไปไม่ต่ำกว่า $200\text{ }\mu\text{m}$ แล้วจึงวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยทั่วไปสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงที่สูงจะมีค่าความแข็งสูงด้วย

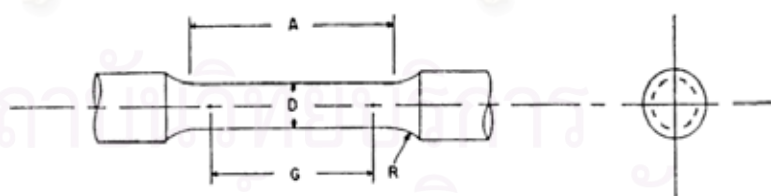
เหตุผลที่เลือกใช้อุณหภูมิ 250, 300, 350°C เนื่องจากมีงานวิจัยของ US. Patent No 1,984,225 โดย James C. Mcfarland⁶ ได้ศึกษาถึง การเพิ่มความแข็งของโลหะ เงินสเตอร์ลิงโดยอบบ่มเพิ่มความแข็ง พบว่าการเติมเบริลเลียม ในปริมาณ 0.1 – 5% โดยอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 593-760°C และอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 298°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเพิ่มความแข็งของเงินสเตอร์ลิง จาก 80 HRB เป็น 94 HRB

โดยมีวิธีการทดสอบความแข็งดังนี้

- 3.10.1 ชัดชิ้นงานให้ได้ระนาบและขนานกันทั้ง 2 ด้านด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 3, 1, และ ¼ ไมครอน ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าให้แห้ง
- 3.10.2 วัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล โดยใช้น้ำหนักกด 15 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที
- 3.10.3 วัดขนาดรอยกดทั้ง 2 แกน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Hv)
- 3.10.4 หาค่าเฉลี่ยของความแข็งแล้ววิเคราะห์และสรุปผล

3.11 การทดสอบแรงดึง

ต้นแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-96 ดังรูปที่ 5 จะถูกนำไปทำเป็นแม่พิมพ์ยางเพื่อใช้สำหรับหล่อชิ้นงาน



รูปที่ 3.1 ภาพชิ้นทดสอบแรงดึง⁽¹⁶⁾

$$G\text{-Gauge Length} = 20.0 \pm 0.1 \text{ mm}$$

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

$$R\text{-Radius of Fillet} = 4.0 \text{ mm}$$

$$A\text{-Length of Reduced Section} = 24.0 \text{ mm}$$

3.11.1 นำชิ้นงานแต่ละชุดที่มีส่วนผสมของเงินผสม 935 ทั้งในสภาพหล่อและภายหลังอบชุบทางความร้อน มาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Tensile Test ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น Series IX โดยบริษัท Instron Corporation กำหนดความเร็วในการดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาทีเพื่อหาค่าต่างๆ คือ ค่าแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) ค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation)

3.11.2 วิเคราะห์และสรุปผล

3.12 การตรวจสอบชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะผสมด้วยกล้อง TEM (Transmission Electron Microscope)

3.12.1 ตัดชิ้นงานเป็นแผ่นด้วยใบตัดคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (CBN) โดยใช้เครื่องตัดความแม่นยำสูง Accutom II ของบริษัท Struers ให้มีความหนาประมาณ 200 μm

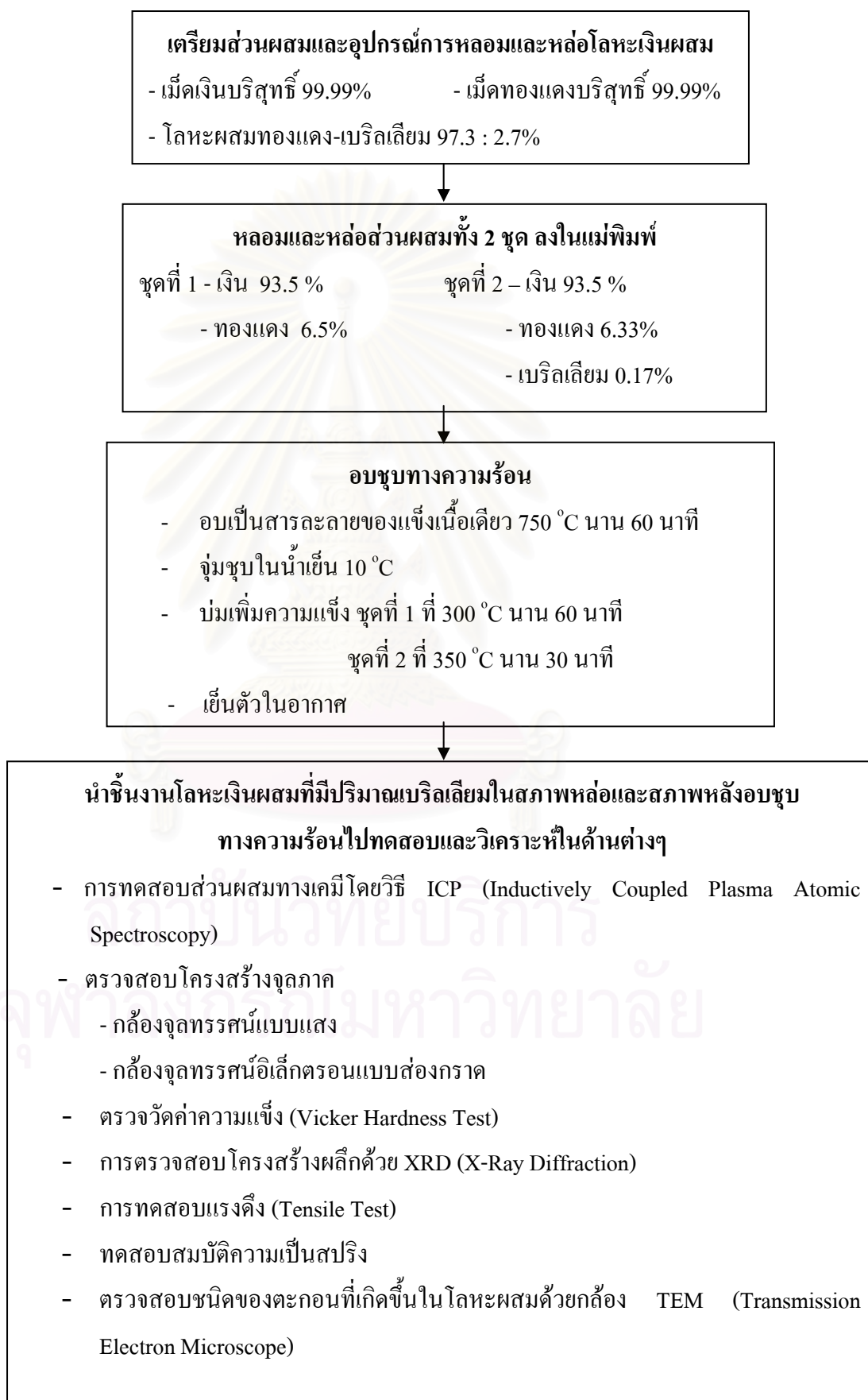
3.12.2 ขัดแผ่นชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 1200 จนมีความหนาลดลงเป็น 50-100 μm

3.12.3 ใช้เครื่องปั๊มให้ได้แผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

3.12.4 นำไปกัดให้ทะลุด้วยเครื่อง Tenupol-3 Twin-jet Electropolisher ของบริษัท Struers โดยใช้สภาวะการกัดที่ 40 V ที่อุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้คือ กรดไนตริก 15vol% ในน้ำ

3.12.5 นำชิ้นงานไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านรุ่น JEM2010 ของบริษัท JEOL ทำงานที่ 200 kV

แผนผังกระบวนการทดลอง



บทที่ 4

รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดงและเบริลเลียม จากการตรวจสอบด้วยวิธี ICP แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมหลังการหล่อและหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็ง

โลหะผสม	ส่วนผสมหลังหล่อ (wt%)			ส่วนผสมหลังอบบ่มเพิ่มความแข็ง (wt%)		
	Cu	Be	Ag	Cu	Be	Ag
Ag 6.50%Cu	6.43	-	Balance	6.68	-	Balance
Ag 6.33%Cu-0.17%Be	6.42	0.126	Balance	6.34	0.10	Balance

หมายเหตุ: ผลตรวจส่วนผสมทางเคมีได้มาจากสถาบันวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อและการอบบ่มเพิ่มความแข็งของโลหะผสมทั้ง 2 ชุด ปริมาณทองแดงที่ตรวจพบในโลหะผสมหลังการหล่อของ Ag6.50%Cu ลดลงจากส่วนผสมตั้งต้นที่ 6.50% โดยน้ำหนัก เหลือ 6.43% โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณทองแดงหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็น 6.68% โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะเกิดจากการสุมตัวอย่างตรวจสอบในบริเวณที่มีปริมาณทองแดงกระจุกตัวอยู่อย่างหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น หรือเกิดจากการที่ทองแดงแพร่ออกมาบริเวณผิว และนำตัวอย่างบริเวณนี้ไปวิเคราะห์ส่วนผสมโดยไม่ได้จัดทำความสะอาดเอาออกไซด์ออก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อจะพบว่าปริมาณธาตุเบริลเลียมที่ตรวจพบในโลหะผสมมีปริมาณลดลงจากปริมาณเบริลเลียมตั้งต้น 0.17%โดยน้ำหนัก เหลือเบริลเลียมในเงิน โลหะสเตอร์ลิง 0.126% โดยน้ำหนัก การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็ง จะพบว่าปริมาณเบริลเลียมที่ตรวจพบในโลหะผสมมีปริมาณลดลงจากปริมาณเบริลเลียมหลังการหล่อเหลือ

เบริลเลียมในเงินโลหะสเตอร์ลิง 0.10% โดยน้ำหนักปริมาณการสูญเสียเบริลเลียมในขั้นตอนการหล่อจะมากกว่าในขั้นตอนการบ่มเพิ่มความแข็ง ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียธาตุเบริลเลียมและทองแดงในโลหะผสม คือธาตุเบริลเลียมและทองแดงสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเบริลเลียมออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ลอยปกคลุมที่ผิวหน้าโลหะขณะกวนโลหะหลอมเหลวในขั้นตอนการหลอมหลังจากโลหะเย็นตัวจะเหลือเศษโลหะหรือสแลก (Slag) แยกตัวออกมาอยู่บริเวณผิวหน้าตรงรูเทของงานหล่อ

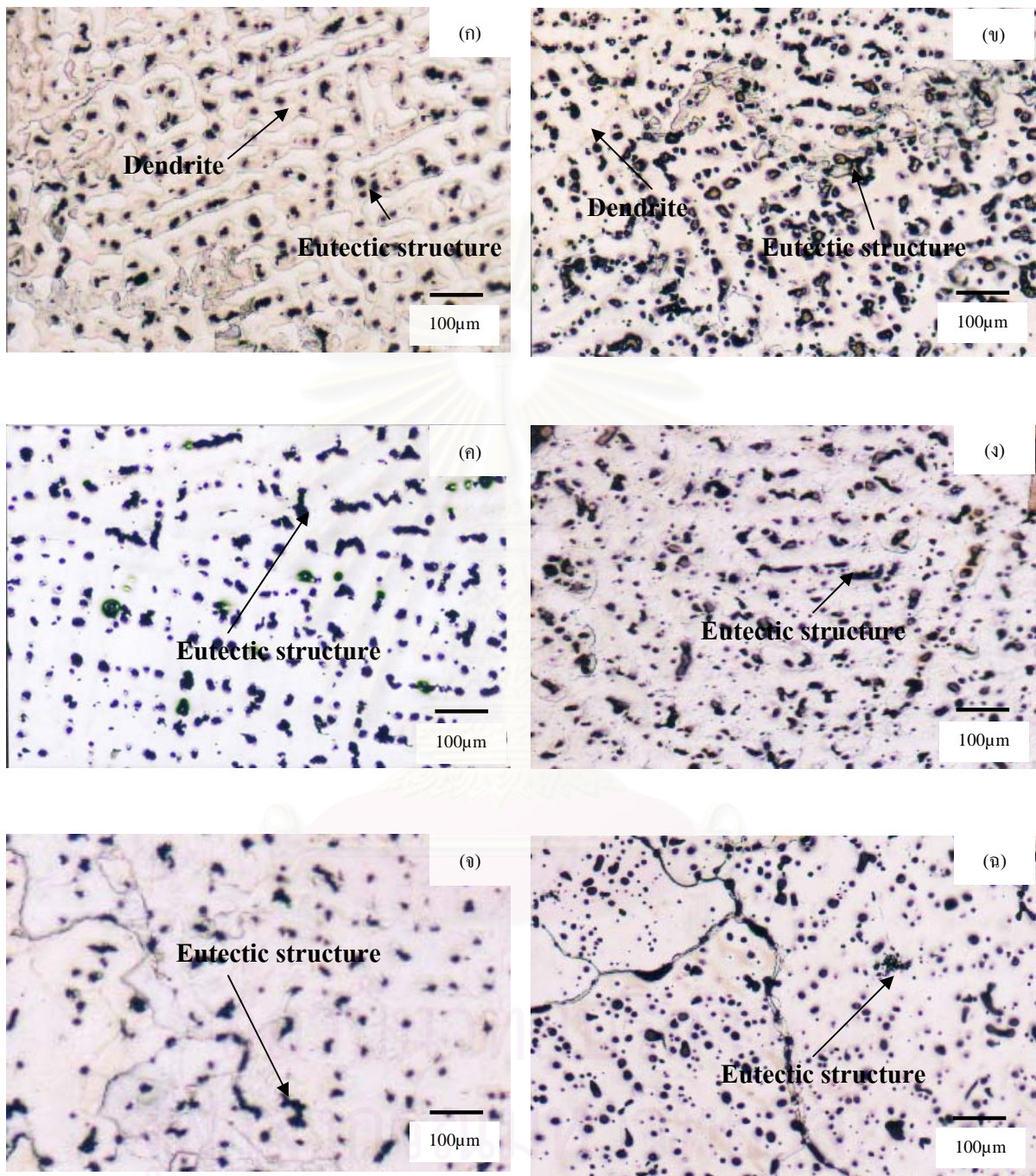
ส่วนผสมทางเคมีของชุดโลหะผสม Ag 6.33%Cu-0.17%Be ขอเปลี่ยนรหัสเรียกใหม่เพื่อความเหมาะสมเป็น Ag-6.37%Cu-0.13%

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง หลังการกัดผิวด้วยสารเคมี (50vol% NH_4OH +25vol% H_2O_2 +25vol% H_2O) แสดงไว้ในรูปที่ 4.1(ก) ถึง 4.1(ฉ) ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมในสภาพการหล่อหลังการกัดผิวด้วยสารเคมี (รูปที่ 4.1(ก)) จะเห็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) ได้ชัดเจน และพบโครงสร้างยูเทคติกอยู่ระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งแสดงถึงการเย็นตัวในภาวะไม่สมดุล ส่วนเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (รูปที่ 4.1(ข)) จะเห็นโครงสร้างเดนไดรต์เช่นกัน เมื่ออบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ที่อุณหภูมิ 750 °C นาน 60 นาที โครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อของชิ้นงานทั้งที่เติมและไม่เติมเบริลเลียม (รูปที่ 4.1(ค) และ 4.1(ง)) ถูกขจัดหมดไปและไม่ปรากฏให้เห็นหลังจากการบ่มเพิ่มความแข็งจะสามารถเห็นรอยต่อเกรนของเงินสเตอร์ลิง 935 ทั้งสองชนิดได้ชัดเจนขึ้นแต่ยังไม่สามารถเห็นตะกอนขนาดเล็กได้ (รูปที่ 4.1(จ) และรูปที่ 4.1 (ฉ))

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (ก) Ag-6.50%Cu หลังการหล่อ, (ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังการหล่อ, (ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว, (ง) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว, (จ) Ag-6.50%Cu หลังผ่านการอบเนื้อเดียวแล้วบ่มเพิ่มความแข็ง, (ฉ) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังผ่านการอบเนื้อเดียวแล้วบ่มเพิ่มความแข็ง

4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิค EDS ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 เนื่องจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) รุ่นนี้มีข้อจำกัดในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี กล่าวคือ จะไม่สามารถตรวจสอบธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic Number) ต่ำกว่า 6 ได้ เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของธาตุเบริลเลียมที่อยู่ในโครงสร้างจุลภาคได้ เนื่องจากเบริลเลียมมีเลขอะตอม เท่ากับ 4

ผลตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง (Ag-rich Solid Solution) หรือเฟสแอลฟา (α -Phase) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic Structure) มีลักษณะเป็นแถบสลับกับแถบสีขาวกระจายอยู่ โดยแถบสีขาวจะเป็นเฟสแอลฟา (α -Phase) ส่วนแถบสีดำจะเป็นเฟสที่มีทองแดงสูง (Cu-rich Solid Solution) หรือเฟสเบต้า (β -Phase) ปริมาณของธาตุเงินและทองแดงในโครงสร้างต่าง ๆ สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค EDS ดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณทองแดงในเฟสเบต้า (β -Phase) ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมจะสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ทั้งในสภาพหล่อ สภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว และสภาพบ่มเพิ่มความแข็ง ส่วนในโครงสร้างเนื้อพื้นหรือเฟสแอลฟา (α -Phase) ปริมาณทองแดงที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมในสภาพหล่อและสภาพบ่มเพิ่มความแข็งจะสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ส่วนในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวจะพบปริมาณทองแดงใกล้เคียงกัน ในโครงสร้างโดยรวม จะพบว่ามีปริมาณทองแดงในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 สูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม ซึ่งปริมาณทองแดงในโครงสร้างจุลภาคจะสามารถบ่งบอกแนวโน้มของค่าความแข็งของชิ้นงานได้ เนื่องจากทองแดงเป็นธาตุที่สามารถเพิ่มความแข็งชิ้นงานได้

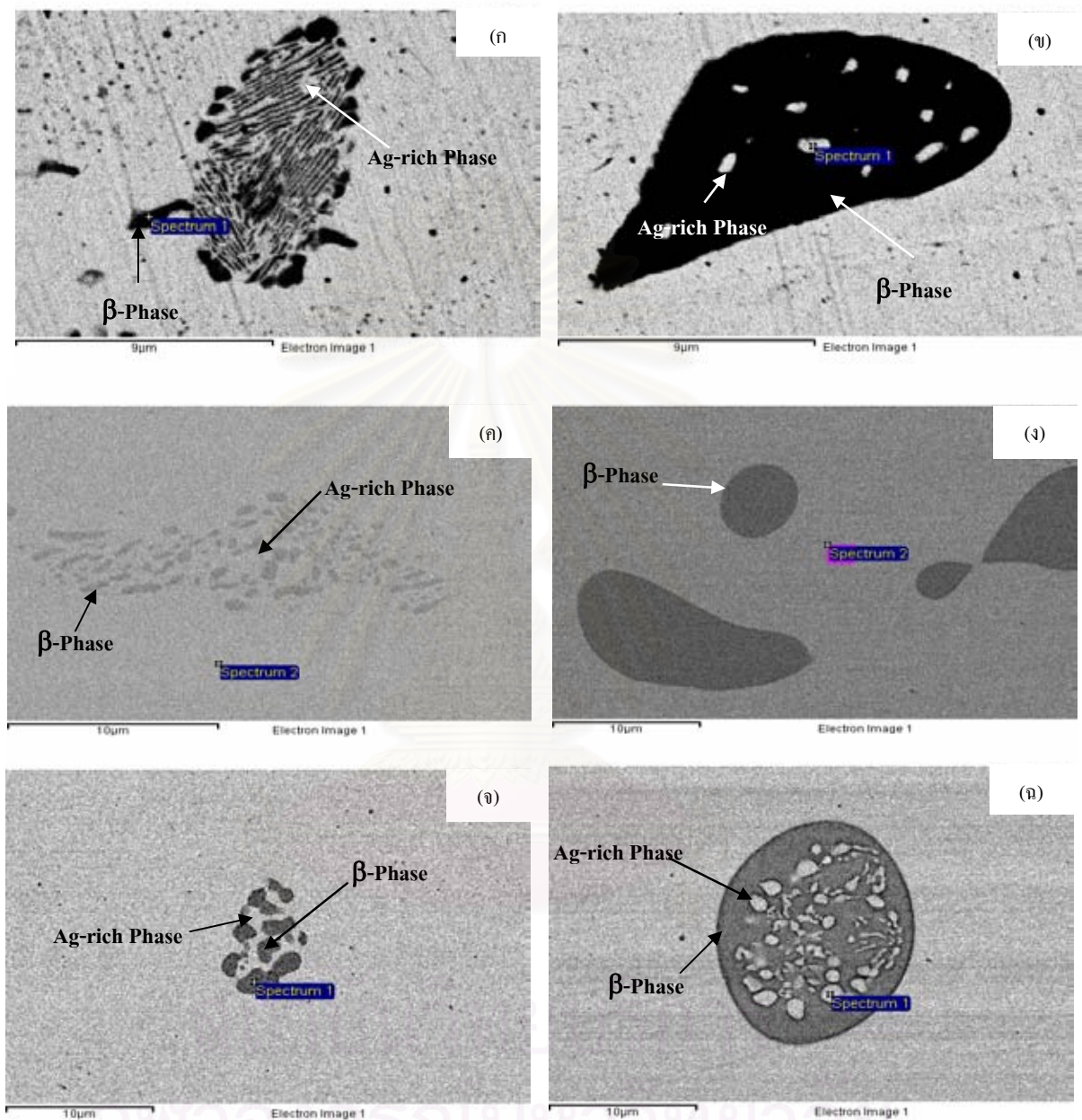
ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

ชุดโลหะผสม	ส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) (wt%)(Beryllium-free basis)											
	โดยเฉลี่ยทั้งหมด			เนื้อพื้น (α -phase)			β -phase ใน โครงสร้างยูเทกติก			Ag rich-phase ในโครงสร้างยูเทกติก		
	Cu	Be	Ag	Cu	Be	Ag	Cu	Be	Ag	Cu	Be	Ag
As-cast (Ag-6.50%Cu)	5.49	—	94.51	81.09	—	18.91	81.09	—	18.91	36.79	—	63.21
As-cast(Ag-6.37%Cu-0.13%Be)	5.11	ND	94.89	97.14	ND	2.86	97.14	ND	2.86	35.56	ND	64.44
Solution(Ag-6.50%Cu)	5.79	-	94.21	93.16	-	6.84	93.16	-	6.84	9.61	-	90.39
Solution(Ag-6.37%Cu-0.13%Be)	5.21	ND	94.79	97.79	ND	2.21	97.79	ND	2.21	-	ND	-
Aged(Ag-6.50%Cu)	6.12	-	93.88	92.23	-	7.77	92.23	-	7.77	11.81	-	88.19
Aged(Ag-6.37%Cu-0.13%Be)	5.37	ND	94.63	96.06	ND	3.94	96.06	ND	3.94	7.59	ND	92.41

ND-ตรวจไม่พบ

เมื่อถ่ายภาพโครงสร้างยูเทกติกที่กำลังขยายสูง โลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมในสภาพหลังการหล่อ (Ag-6.50%Cu) (รูปที่ 4.2 (ก)) จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะแถบขาวดำระหว่างเฟส α และเฟส β ในขณะที่โลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) ในสภาพหลังการหล่อ (รูปที่ 4.2 (ข)) เฟสในโครงสร้างยูเทกติกจะมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น โดยมี Ag-rich Phase แทรกอยู่ภายในโครงสร้างยูเทกติก คาดว่าเบริลเลียมน่าจะเกิดการสะสมระหว่างแกนของเดนไดรต์ระหว่างที่โลหะแข็งตัวด้วย นอกจากนี้ ยังพบ Cu-rich Phase บริเวณใกล้โครงสร้างยูเทกติกในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม มากกว่ากรณีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

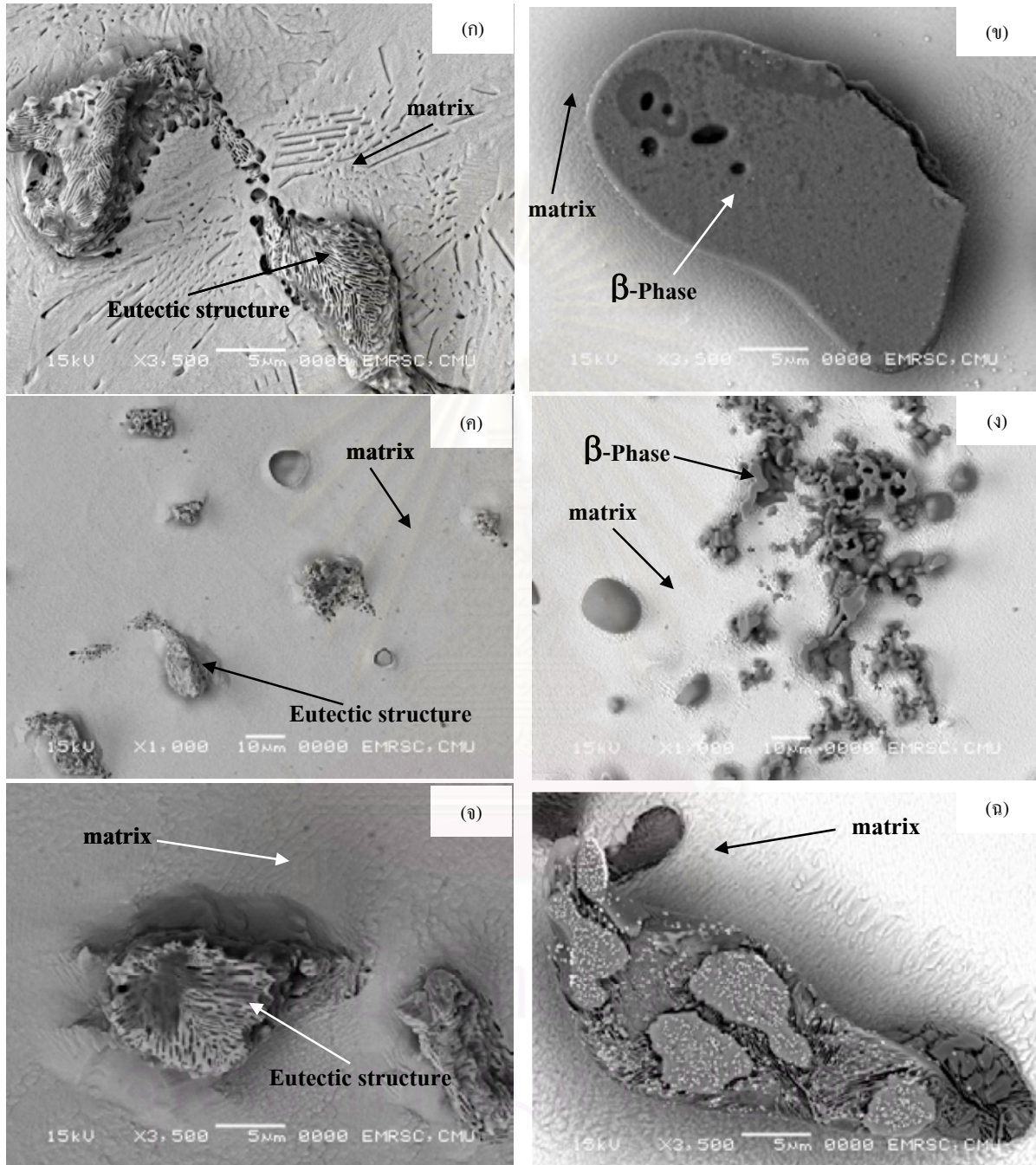


รูปที่ 4.2 โครงสร้างยูเทคติกของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) Ag-6.50%Cu หลังการหล่อ (ภาพ BEI), (ข) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังการหล่อ (ภาพ BEI), (ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว, (ง) Ag-6.37%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว, (จ) Ag-6.50%Cu หลังบ่มเพิ่มความแข็ง, (ฉ) Ag-6.37%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง

หลังการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว เท่าจะพบว่าโครงสร้างเดนไดรต์ของเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม และ เงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (รูปที่ 4.2 (ค) และ 4.2 (ง)) ในชิ้นงานสภาพหล่อจะถูกขจัดหมดไป และพบว่าโครงสร้างยูเทคติกบางส่วนของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม จะละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้น โครงสร้างยูเทคติกที่เหลือมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น และในส่วนของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม ไม่พบ Ag-rich Phase ภายในโครงสร้างยูเทคติก

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม โครงสร้างยูเทคติกของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (รูปที่ 4.2 (จ)) ปรากฏ Ag-rich Phase ขึ้นภายในแต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในกรณีโครงสร้างยูเทคติกของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ ไม่ได้เติมเบริลเลียม (รูปที่ 4.2 (จ))

เมื่อกัดผิวชิ้นงานด้วยสารเคมี ($50\text{vol}\%\text{NH}_4\text{OH}+25\text{vol}\%\text{H}_2\text{O}_2+25\text{vol}\%\text{H}_2\text{O}$) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และ โลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมในสภาพหลังการหล่อ และสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว และสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็งดังรูป 4.3 มีโครงสร้างสอดคล้องกับที่ได้บรรยายไปแล้วในรูป 4.2 แต่ยังไม่สามารถสังเกตเห็นตะกอนขนาดเล็กที่น่าจะเกิดขึ้นหลังการบ่มได้ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านต่อไป



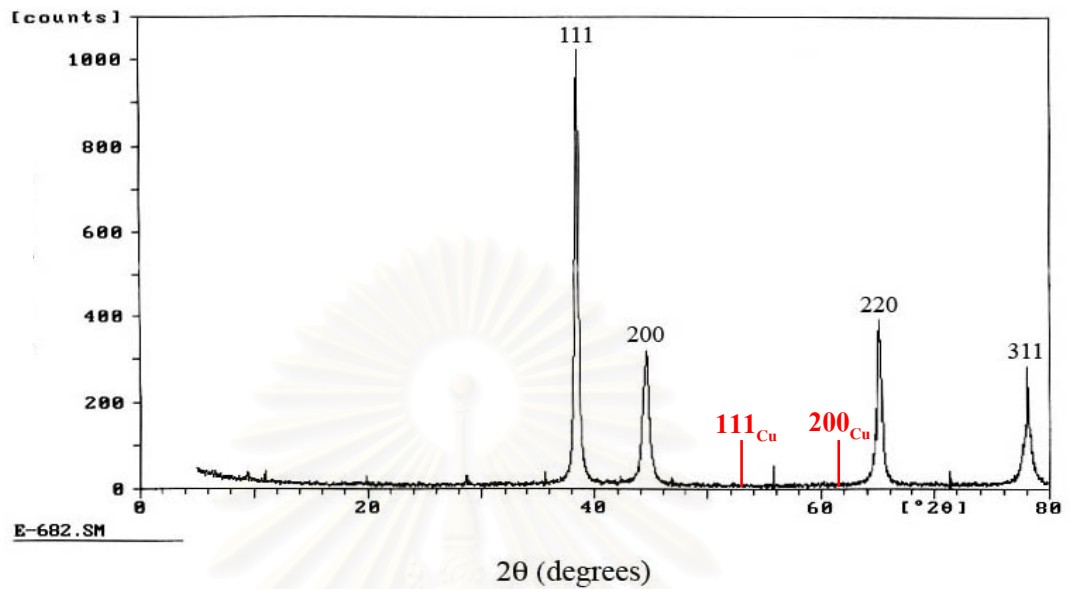
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ภายหลังการกัดผดด้วยสารเคมี (50vol% NH_4OH +25vol% H_2O_2 +25vol% H_2O) (ก) Ag-6.50%Cu ในสภาพหลังการหล่อ, (ข) Ag-6.50%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังการหล่อ, (ค) Ag-6.50%Cu หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (ง) Ag-6.50%Cu-0.13% Be หลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว, (จ) Ag-6.50%Cu ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง, (ฉ) Ag-6.50%Cu-0.13% Be ในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็ง

4.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD

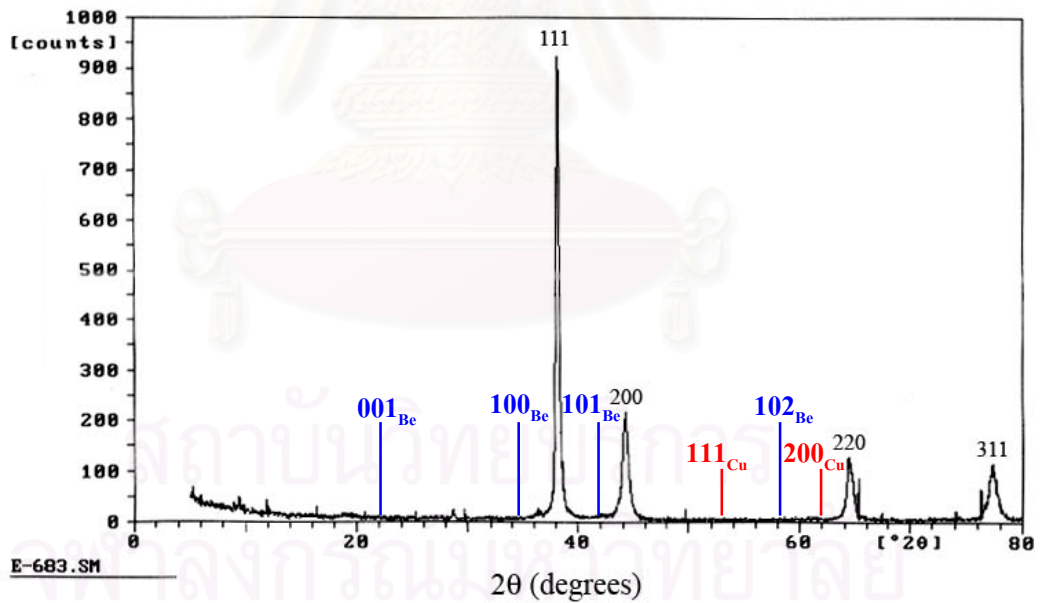
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Pattern) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ของชิ้นงานในสภาพหลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งทั้งสองส่วนผสม พบว่าสอดคล้องกับเฟส α ที่มุม 2θ ประมาณ 38° 44° 65° และ 77° ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนจากระนาบ 111, 200, 220 และ 311 ตามลำดับ ผลจากการคำนวณแสดงว่ารูปแบบของค่า $h^2 + k^2 + l^2$ สอดคล้องกับรูปแบบที่ได้จากโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบ FCC ในส่วนของเฟส β และตะกอนที่น่าจะเกิดขึ้นหลังการบ่มไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค EDS ในการทดลองนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



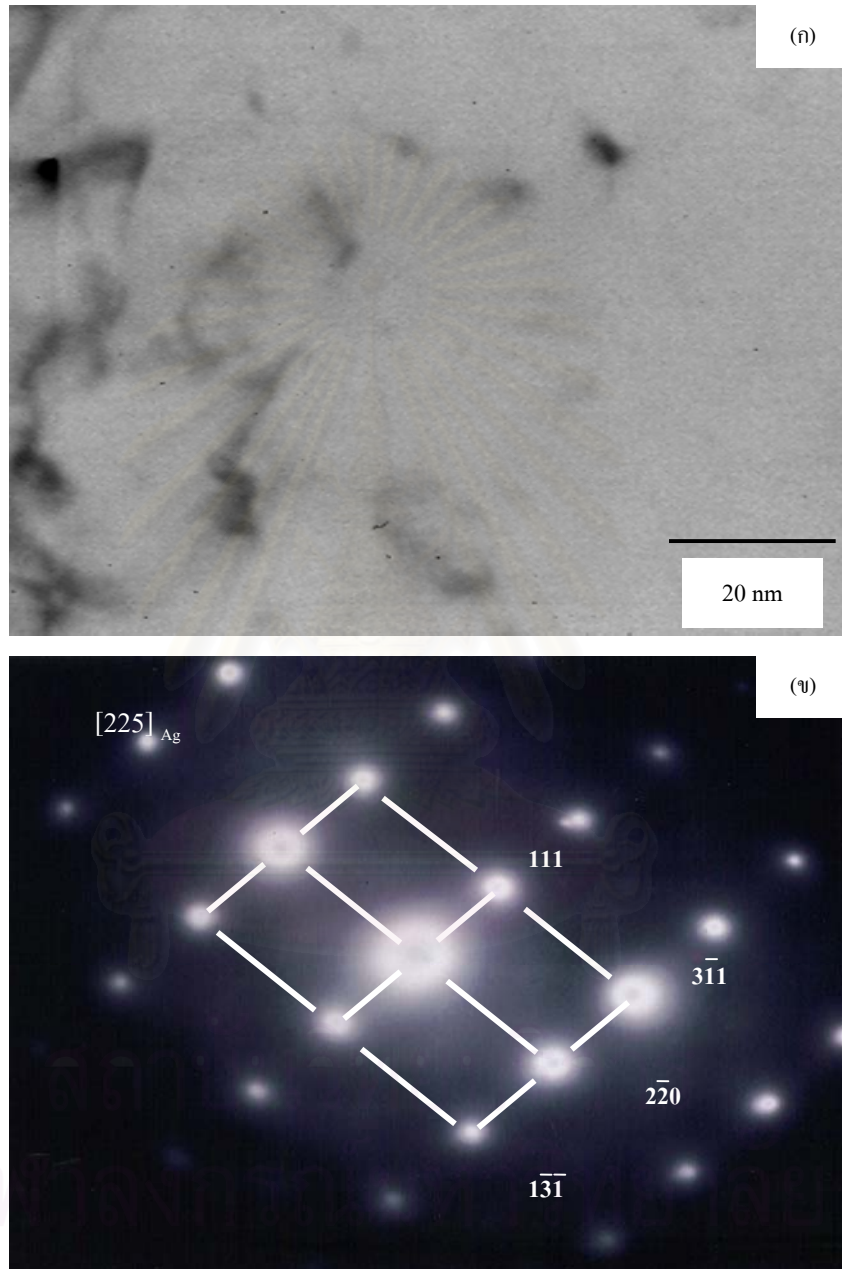
(ก) โลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) หลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 30 นาที



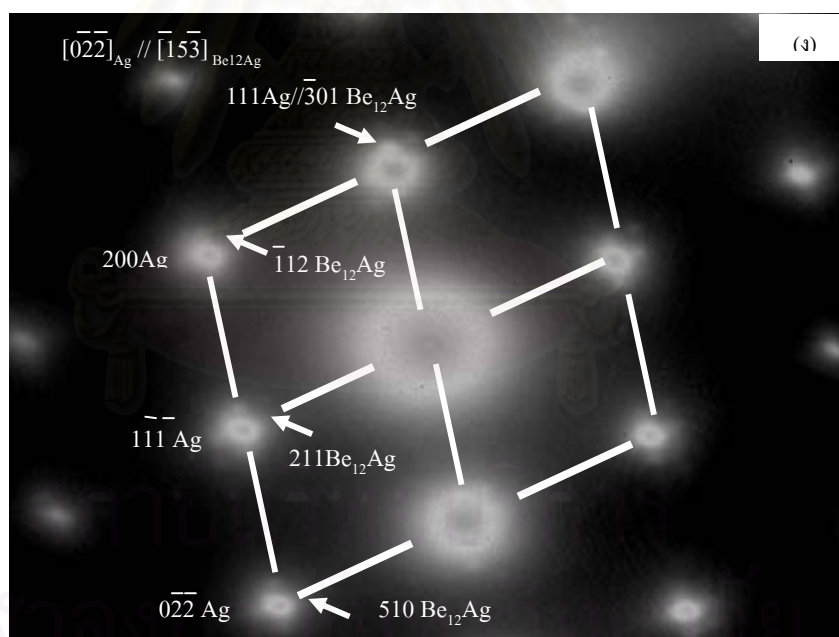
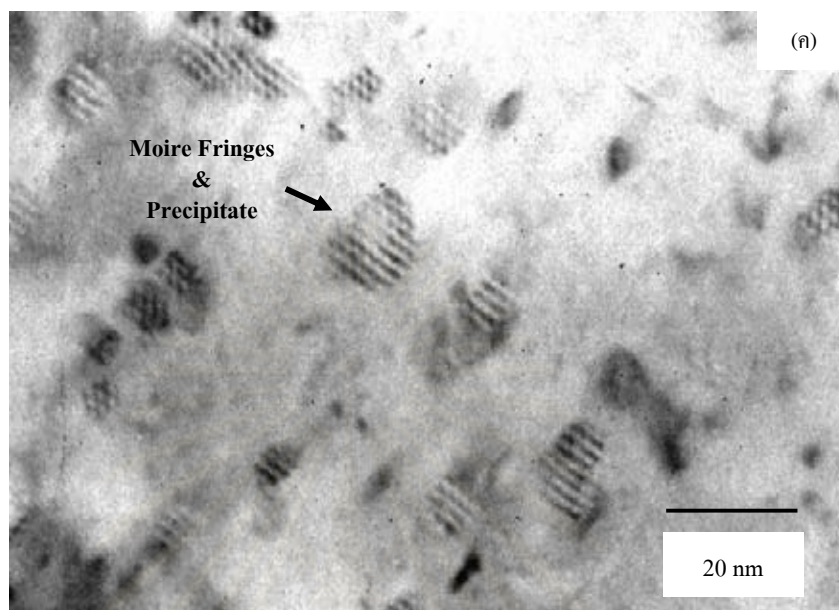
(ข) โลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) หลังการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 60 นาที

รูป 4.4 สเปกตรัมการกระเจิงรังสีเอกซ์

4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy (TEM))



รูปที่ 4.5 โลหะผสมหลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว แล้วอบบ่มเพิ่มความแข็ง (ก) ภาพไบรท์ฟิลด์แสดงโครงสร้างภายในเดนไดรต์ของAg-6.50%Cu (ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ และตำแหน่งอะตอมจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ของAg-6.50%Cu



รูปที่ 4.5 (ต่อ) โลหะผสมหลังทำการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว แล้วอบบ่มเพิ่มความ (ค) ภาพไบรท์ฟิลด์แสดงโครงสร้างภายในเดนไดรต์ของAg-6.37%Cu-0.13% Be (ง)แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์และตำแหน่งจะต่อมจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณเดนไดรต์ของAg-6.37%Cu-0.13% Be

ในรูปที่ 4.5 (ก) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในกรณีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม จะมีตะกอนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรกระจายอยู่ในเนื้อพื้น(Matrix) (ตามที่ระบุโดยลูกศร) ตะกอนเหล่านี้ทำให้เกิดมอร์ฟริงจส์ (Moire Fringes) ปรากฏเป็นแถบขาวสลับดำในบริเวณที่ผลึก ของตะกอนซ้อนทับกับของเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งไม่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ดังรูป 4.5 (ก)

รูป 4.5 (ข) และ 4.5 (ง) แสดงแบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากบริเวณที่แสดงในรูป 4.5 (ก) และ 4.5 (ค) ตามลำดับ แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนทั้งสองยืนยันว่าเนื้อพื้น ทั้งในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และ โลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC สอดคล้องกับผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และพบว่าตะกอนขนาดเล็กที่ตกตะกอนในเนื้อพื้นของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมน่าจะเป็น ตะกอนเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) แบบโคฮีเรนต์ (Coherent) หลักฐานอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ผลการวิเคราะห์สมเหตุสมผล คือ รูปแบบของ มอร์ฟริงจส์ (Moire Fringes) ที่สังเกตพบนั้นเป็นแบบเดียวกัน หากอนุมานว่ามอร์ฟริงจส์ที่พบ เป็นแบบขนานเนื่องจากการตกตะกอนแบบโคฮีเรนต์ จากแบบรูปการเลี้ยวเบนจะเห็นว่า $g[111]_{\text{Ag}}//g[301]_{\text{Be}_{12}\text{Ag}}$ และสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างมอร์ฟริงจส์แบบขนานได้เท่ากับ $D = (d_{111}_{\text{Ag}} \times d_{301}_{\text{Be}_{12}\text{Ag}}) / (d_{111}_{\text{Ag}} - d_{301}_{\text{Be}_{12}\text{Ag}}) = 16.7687 \text{ \AA}$ ซึ่งใกล้เคียงกับที่วัดได้จากรูป 4.5(ค) กลไกที่ทำให้ความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม สูงกว่าของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 จึงน่าจะเป็นเพราะตะกอนเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) แบบโคฮีเรนต์ (Coherent) ขนาดเล็กเหล่านี้ ในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation)

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM92-82 ในสภาพหล่อวัดโดยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล Mitutoyo Model MVK-H2 ใช้น้ำหนักกด 15 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ค่าความแข็งเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) เฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมในสภาพหล่อ

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
	Cu	Be	Ag	
1	6.50	—	Balance	66.07
2	6.37	0.13	Balance	61.57

จะพบว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) มีค่าความแข็งสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu, 0.13%Be) เนื่องจากมีปริมาณทองแดงสูงกว่า และโครงสร้างยูเทคติกที่เป็นแบบลามลลา และพบว่าการเติมเบริลเลียมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งในสภาพการหล่อ ซึ่งลดลงเพียงเล็กน้อยประมาณ 4.15%

4.3.1.1 ผลทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

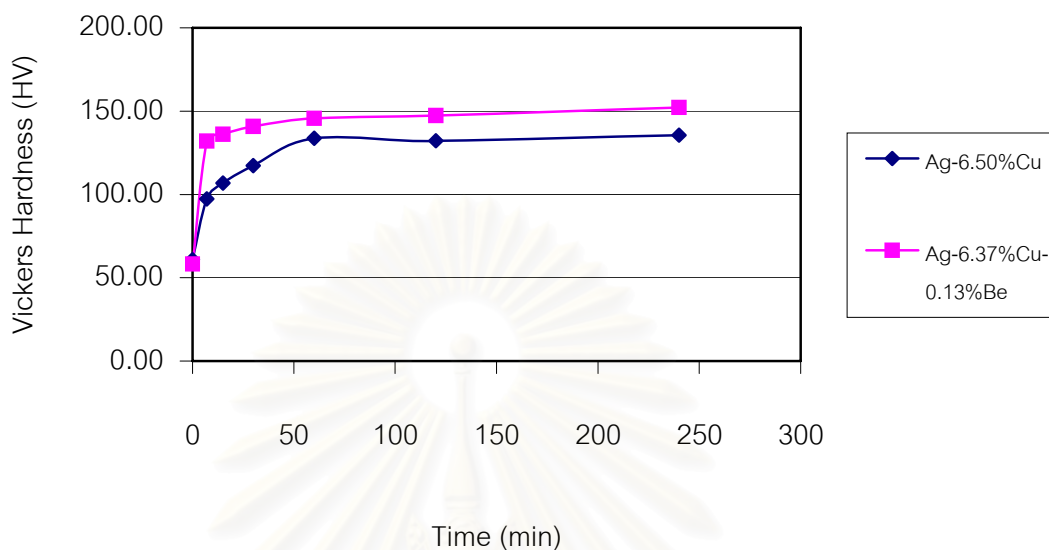
ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม ในสภาพอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 750°C พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ 935 (Ag-6.50%Cu) และ โลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เท่ากับ 60.84 HV และ 58.32 HV (ดังตารางที่ 4.4) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานในสภาพหล่อ เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกละลายกลับเข้าไปในโครงสร้างเนื้อพื้นทำให้ความแข็งลดลง

4.3.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 250°C

ตารางที่ 4.4 โลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) ได้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 135.54 HV ซึ่งใช้เวลาในการบ่ม 240 นาที ส่วนโลหะผสมเงิน 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 152.28 HV โดยใช้เวลาในการบ่ม 240 นาทีเท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งเงินสเตอร์ลิงที่เติมเบริลเลียมมีค่าสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมเบริลเลียม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งคาดว่าเป็นเพราะมีการตกตะกอนขนาดเล็กของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) ภายในเฟสปฐมภูมิ

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 250 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

ชนิด	อุณหภูมิ(°C)		เวลาบ่ม(นาที)	ค่าความแข็ง(HV)					
	อบเป็นเนื้อเดียว	บ่ม		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Ag-6.50%Cu	750(60นาที)	250	0	59.7	60.4	63.6	62.4	58.1	60.84
			7	97.6	99.5	95.9	96.9	96.3	97.24
			15	109.9	108.1	104.9	104.3	106.9	106.82
			30	120.7	120	115.1	104.4	125.8	117.20
			60	133	134.3	135.8	133.3	131.7	133.62
			120	132.7	135.2	131	128.5	133.4	132.16
			240	138.5	138.3	132.6	137.2	131.1	135.54
Ag-6.37%Cu- 0.13%Be	750(60นาที)	250	0	60.8	59.4	59.1	56.9	55.4	58.32
			7	132.6	130.2	133.6	131.4	131.9	131.94
			15	135.8	134.8	137.3	135.7	136.9	136.10
			30	137.4	145.9	138.8	141.5	140.2	140.76
			60	141.4	148.3	151.7	143.2	143.6	145.64
			120	145.8	149.2	151.7	148.3	142.1	147.42
			240	154.6	153.8	149.2	155.3	148.5	152.28



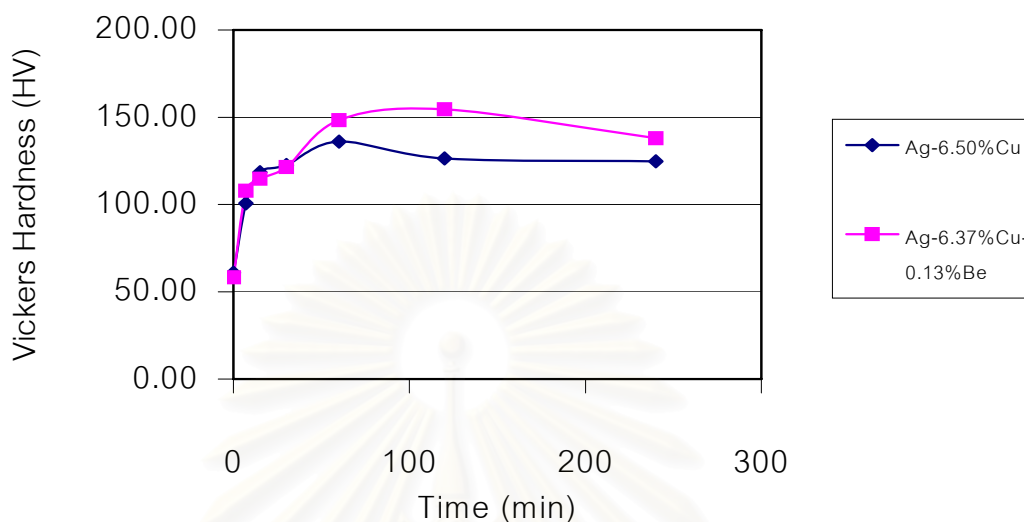
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 250 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

4.3.1.3 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 300 °C

จากตารางที่ 4.5 โลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) ได้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 136.04 HV ซึ่งใช้เวลาในการบ่ม 60 นาที ส่วนโลหะผสมเงิน 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) มีค่าความแข็งเท่ากับ 148.34 HV ในเวลาการบ่มที่เท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งเงินสเตอร์ลิงที่เติมเบริลเลียมมีค่าสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมเบริลเลียม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งคาดว่า เป็นเพราะมีการตกตะกอนขนาดเล็กของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) ภายในเฟสปฐมภูมิ เช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 250 °C ซึ่งค่าความแข็งสูงสุดของโลหะผสมเงินที่เติมเบริลเลียม คือ 154.50 HV โดยใช้เวลาบ่ม 120 นาที

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 300 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

ชนิด	อุณหภูมิ(°C)		เวลาบ่ม(นาที)	ค่าความแข็ง(HV)					ค่าเฉลี่ย
	อบเป็นเนื้อเดียว	บ่ม		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
Ag-6.50%Cu	750(60นาที)	300	0	59.7	60.4	63.6	62.4	58.1	60.84
			7	100	102.8	99.3	97.5	103.9	100.70
			15	112.1	112.5	120	125.7	122.4	118.54
			30	119.2	124.7	125.5	118.6	125.3	122.66
			60	136.5	138.4	134.5	134.5	136.3	136.04
			120	127.2	128.5	123.4	127.8	124.9	126.36
			240	124.6	127.3	120.1	130.6	121.2	124.76
Ag-6.37%Cu-0.13%Be	750(60นาที)	300	0	60.8	59.4	59.1	56.9	55.4	58.32
			7	107.3	108.5	107.8	106.6	108.9	107.82
			15	110.4	114.5	119.4	115.2	113.9	114.68
			30	121.8	119.1	124.7	118.4	122.9	121.38
			60	147.9	150.2	143.4	148.3	151.9	148.34
			120	157.4	149.7	158.2	155.1	152.1	154.50
			240	135.8	138.2	141.2	134.9	139.8	137.98



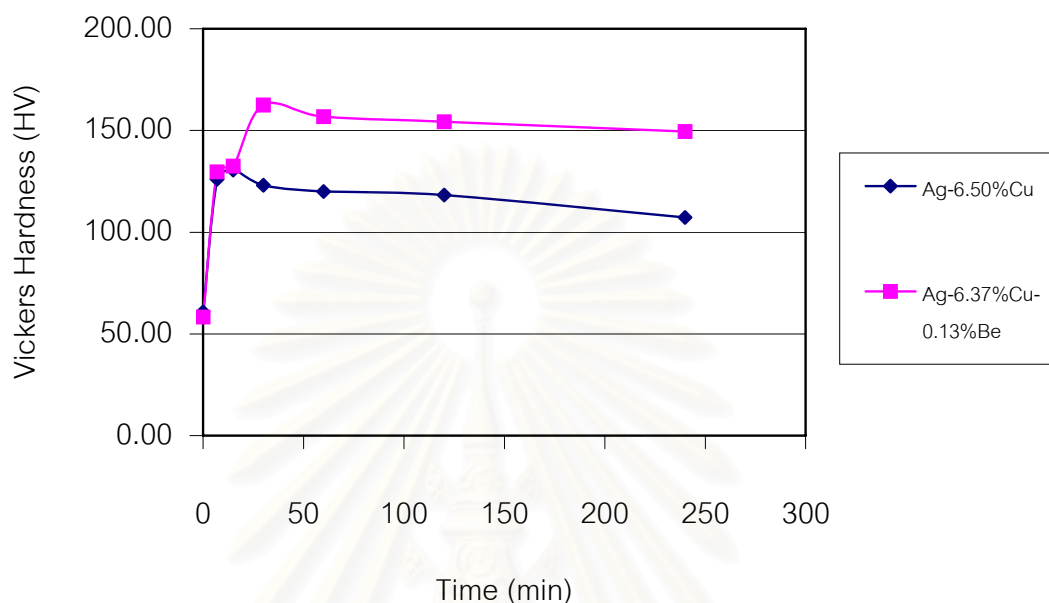
รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 300 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

4.3.1.4 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C

จากตารางที่ 4.6 โลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) ได้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 130.50 HV ซึ่งใช้เวลาในการบ่ม 15 นาที ส่วนโลหะผสมเงิน 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) ให้ความแข็งที่ 132.40 HV โดยใช้เวลาบ่มเท่ากัน ค่าความแข็งเงินสเตอร์ลิงที่เติมเบริลเลียมมีค่าสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมเบริลเลียม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งคาดว่าเป็นเพราะมีการตกตะกอนขนาดเล็กลงของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) ภายในเฟสปฐมภูมิ เช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C นอกจากนี้จะพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาบ่มนานขึ้น ซึ่งค่าความแข็งสูงสุดของโลหะผสมเงินที่เติมเบริลเลียม คือ 162.54 HV ที่อุณหภูมิ 350°C โดยใช้เวลาบ่ม 30 นาที เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเกิน 30 นาที เป็น 60, 120 และ 240 นาที ค่าความแข็งจะลดลงเป็น 156.76, 154.30 และ 149.52 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากผลของ Overaging ทำให้ตะกอนของเงินเบริลเลียม (Be_{12}Ag) แบบโคฮีเรนต์ น่าจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสูญเสียความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherency) กับเนื้อพื้น ความแข็งจึงลดลง

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

ชนิด	อุณหภูมิ(°C)		เวลาบ่ม (นาที)	ค่าความแข็ง(HV)					
	อบเป็นเนื้อเดียว	บ่ม		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Ag-6.50%Cu	750(60นาที)	350	0	59.7	60.4	63.6	62.4	58.1	60.84
			7	126.9	127.8	123.6	126.4	125.6	126.06
			15	131.5	129.8	126.1	129.9	135.2	130.50
			30	120.6	126.5	121.2	124.7	122.4	123.08
			60	116.3	121.9	119.3	123.7	118.6	119.96
			120	118.3	119.1	117.9	120.7	115.3	118.26
			240	105.8	109.3	107.8	103.1	110.4	107.28
Ag-6.37%Cu-0.13%Be	750(60นาที)	350	0	60.8	59.4	59.1	56.9	55.4	58.32
			7	125.8	129.5	138.7	122.8	131.9	129.74
			15	138.4	132.7	129.9	127.6	133.4	132.40
			30	163.8	161.4	163.5	159.3	164.7	162.54
			60	158.5	161.9	155.4	148.3	159.7	156.76
			120	152.5	156.3	149.8	157.4	155.7	154.30
			240	150.3	147.2	149.4	152.9	147.8	149.52



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

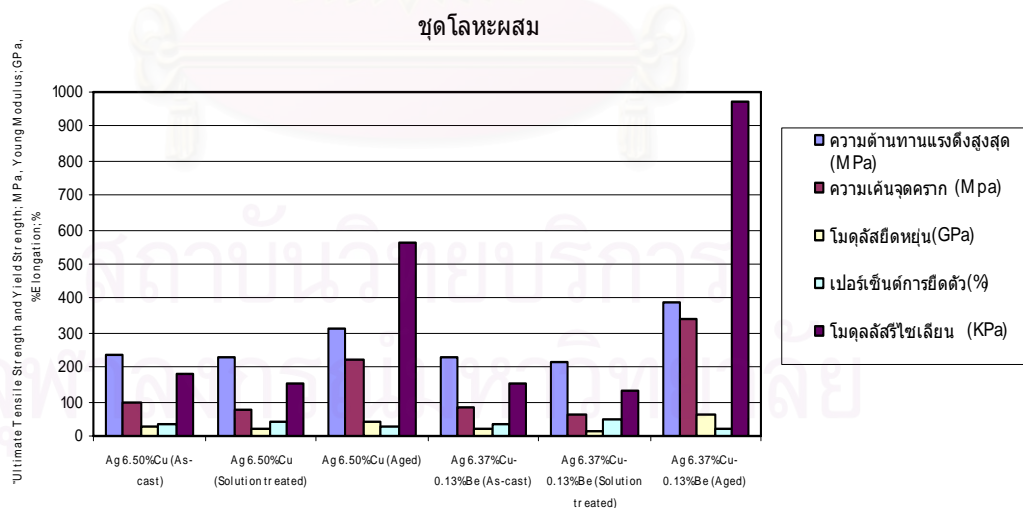
จากค่าความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เติมเบริลเลียมจะเกิดการตกตะกอนของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) แบบโคฮีเรนซ์ (Coherency) กับโครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C จะใช้ระยะเวลาในการอบบ่มเพิ่มความแข็งนานกว่าการอบบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำการเคลื่อนที่ของอะตอมจะช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้การตกตะกอนต้องใช้เวลานานเพื่อให้ได้ขนาดของตะกอนที่เหมาะสมกับการได้ค่าความแข็งสูงสุด ถ้าใช้ระยะเวลาในการอบบ่มเพิ่มความแข็งนานเกินไป (Overaging) และอุณหภูมิไม่เหมาะสมจะทำให้ได้ตะกอนขนาดใหญ่เกินไป และสูญเสียความเป็นโคฮีเรนซ์ (Coherency) กับเนื้อพื้น ซึ่งทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานลดลง

4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength; σ_y) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus; E) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังกราฟรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 935 และ เงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม

โลหะผสม	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)	ความเค้นจุดคราก (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	โมดูลัสรีไซเคิล (KPa)
Ag 6.50%Cu (As-cast)	236.2	95.0	25.0	36.5	180.8
Ag 6.50%Cu (Solution treated)	229.8	73.4	17.9	38.9	150.2
Ag 6.50%Cu (Aged)	315.5	224.1	44.5	27.3	564.7
Ag 6.37%Cu-0.13%Be (As-cast)	228.5	81.5	21.5	36.9	154.4
Ag 6.37%Cu-0.13%Be (Solution treated)	216.8	61.0	13.8	45.1	135.1
Ag 6.37%Cu-0.13%Be (Aged)	387.7	339.7	59.2	18.6	974.8



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง 935 และ เงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม

ผลการทดลองพบว่า เบริลเลียมมีผลเพิ่มค่าสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-เบริลเลียมหลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วจุ่มชุบลงในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 60.95 MPa และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 13.75 GPa การบ่มต่อไปจะทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อเพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้อค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 339.70 MPa และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 59.19 GPa ที่อุณหภูมิบ่ม 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับกรณีโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม หลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่สภาวะเดียวกัน มีค่าความเค้นจุดครากเท่ากับ 73.35 MPa และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 17.91 GPa หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จึงได้อค่าความเค้นจุดครากและโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดเพียง 224.06 MPa และ 44.45 GPa ตามลำดับ การที่สมบัติทางกลหลังจากการบ่มได้รับการปรับปรุงให้สูงขึ้นในกรณีที่ได้เติมเบริลเลียม น่าจะเกิดจากการตกตะกอนขนาดเล็กลงของเงิน-เบริลเลียม (Be_{12}Ag) ภายในโครงสร้างเนื้อพื้น และในโครงสร้างยูเทกติก ส่วนสาเหตุที่สมบัติทางกลของโลหะผสมที่ไม่มีการเติมเบริลเลียม หลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวและจุ่มชุบลงในน้ำเย็นมีค่าสูงกว่าของโลหะผสมที่มีการเติมเบริลเลียม คาดว่าเป็นเพราะมีปริมาณทองแดงที่มากกว่าโครงสร้างยูเทกติกแบบลามลลา และโครงสร้างยูเทกติกละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นน้อยกว่า

4.3.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ด้วยวิธีการสั่นสะเทือนทางกล

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธีการสั่นสะเทือนทางกลเป็นวิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีความถูกต้องแม่นยำมาก¹⁰ ซึ่งจะหาได้จากกรณำค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ f_n ที่ได้จากกรทดสอบในตารางที่ 4.8 มาแทนลงในสมการ 2.1

$$f_n = (1.875^2 / 2\pi) * (EI / \rho AL^4)^{1/2} \text{ หรือ}$$

$$E = (2\pi f_n / 1.875^2)^2 * (\rho AL^4 / I)$$

ก็จะได้อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดังตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม ในสภาพหลังการหล่อและสภาพหลังการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงถึง 59.19 GPa ขณะที่เงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพียง 44.45 GPa

4.3.4 ผลการทดสอบสมบัติความเป็นสปริง (Spring Properties Test)

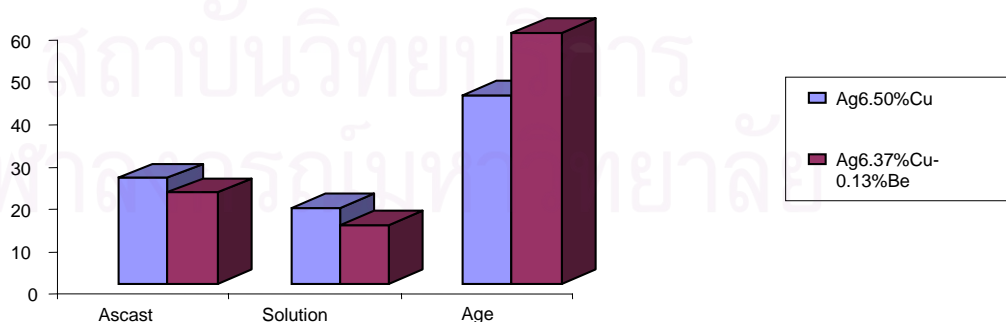
จากข้อมูลสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบเราจะนำมาพิจารณาเพื่อหาสมบัติความเป็นสปริงของโลหะที่เหมาะสมต่อการนำมาทำลึ้นสปริง โดยค่าที่จะนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสม คือ ค่าโมดูลัสรีไซเคิล ($\sigma_y^2/2E$) (แสดงในตารางที่ 4.8)

เมื่อนำค่าทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า โลหะผสมเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) หลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที แล้วจุ่มชุบลงในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่าโมดูลัสรีไซเคิลเท่ากับ 135.08 KPa ส่วนชุดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมเบริลเลียม (Ag-6.50%Cu) หลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่สภาวะเดียวกัน จะมีค่าโมดูลัสรีไซเคิลเท่ากับ 150.20 KPa เมื่ออบเพิ่มความแข็งที่ 350 °C เป็นเวลา 30 นาที โลหะผสมเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be) จะมีค่า $\sigma_y^2/2E$ สูงที่สุด คือ 974.79 (KPa) จึงเหมาะสมที่จะนำมาทำสปริง เปรียบเทียบกับกรณีโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่ไม่ได้เติมเบริลเลียมหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่สภาวะเดียวกัน และ บ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที มีค่าโมดูลัสรีไซเคิลสูงที่สุดเพียง 564.71 KPa

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยวิธีความถี่ธรรมชาติ

Sample	Number	Width (mm.)	Thickness (mm.)	Length (mm.)	Mass (Kg.)	Frequency (Hz)	Density (Kg/m ³)	Beam Length (mm.)	Elastic (GPa)	Elastic Average (GPa)
Ag 6.50%Cu (As-cast)	1	8.8×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.95×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.80×10^2	9.69×10^3	8.89×10^{-2}	25.8	24.96
	2	9.3×10^{-3}	3.1×10^{-3}	6.95×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.63×10^2	9.82×10^3	8.83×10^{-2}	24.3	
	3	9.3×10^{-3}	3.4×10^{-3}	5.85×10^{-2}	2.50×10^{-2}	2.50×10^2	1.02×10^4	7.74×10^{-2}	24.8	
Ag 6.50%Cu (Sol)	1	8.7×10^{-3}	3.1×10^{-3}	7.20×10^{-2}	2.30×10^{-2}	1.30×10^2	9.71×10^3	8.78×10^{-2}	17.5	17.91
	2	8.8×10^{-3}	3.4×10^{-3}	6.95×10^{-2}	2.40×10^{-2}	1.58×10^2	9.03×10^3	8.89×10^{-2}	17.5	
	3	9.2×10^{-3}	3.1×10^{-3}	6.96×10^{-2}	2.30×10^{-2}	1.48×10^2	9.13×10^3	8.83×10^{-2}	18.7	
Ag 6.50%Cu (Aged)	1	8.5×10^{-3}	3.3×10^{-3}	7.10×10^{-2}	2.50×10^{-2}	2.22×10^2	1.02×10^4	8.78×10^{-2}	44.7	44.45
	2	8.8×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.95×10^{-2}	2.50×10^{-2}	2.34×10^2	9.69×10^3	8.89×10^{-2}	43.6	
	3	9.3×10^{-3}	3.1×10^{-3}	6.95×10^{-2}	2.50×10^{-2}	2.22×10^2	9.82×10^3	8.83×10^{-2}	45.1	
Ag 6.37%Cu- 0.13%Be (As-cast)	1	7.8×10^{-3}	3.5×10^{-3}	5.40×10^{-2}	2.10×10^{-2}	2.93×10^2	9.99×10^3	7.70×10^{-2}	22.8	21.50
	2	9.6×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.30×10^{-2}	2.80×10^{-2}	1.90×10^2	1.01×10^4	8.79×10^{-2}	20.1	
	3	9.6×10^{-3}	3.4×10^{-3}	6.20×10^{-2}	2.70×10^{-2}	2.11×10^2	9.92×10^3	8.34×10^{-2}	21.7	
Ag 6.37%Cu- 0.13%Be (Sol)	1	8.6×10^{-3}	3.2×10^{-3}	6.40×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.42×10^2	1.03×10^4	8.78×10^{-2}	13.2	13.75
	2	9.8×10^{-3}	3.5×10^{-3}	6.12×10^{-2}	2.80×10^{-2}	1.82×10^2	9.29×10^3	8.79×10^{-2}	13.5	
	3	9.9×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.40×10^{-2}	2.60×10^{-2}	1.61×10^2	9.54×10^3	8.34×10^{-2}	14.6	
Ag 6.37%Cu- 0.13%Be (Aged)	1	8.9×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.70×10^{-2}	2.60×10^{-2}	2.87×10^2	1.01×10^4	8.78×10^{-2}	59.0	59.19
	2	9.7×10^{-3}	3.4×10^{-3}	6.15×10^{-2}	2.90×10^{-2}	3.56×10^2	1.00×10^4	8.79×10^{-2}	60.0	
	3	9.7×10^{-3}	3.3×10^{-3}	6.30×10^{-2}	2.60×10^{-2}	3.29×10^2	9.74×10^3	8.34×10^{-2}	58.5	

Elastic Value From Vibration Testing



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบโดยวิธีความถี่ธรรมชาติ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเติมเบริลเลียมลงในเงินสเตอร์ลิง 935 สามารถเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงมากขึ้น ประมาณสองเท่า ซึ่งค่าที่แสดงสมบัติความเป็นสปริง คือ โมดูลัสรีไซเคิล โดยโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมเบริลเลียมในสภาพหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่มีค่าโมดูลัสรีไซเคิลเพียง 564.71 KPa สามารถเพิ่มค่าโมดูลัสรีไซเคิลเป็น 974.79 KPa เมื่อเติมเบริลเลียม 0.13% โดยน้ำหนัก

5.1.2 อุณหภูมิในการอบบ่มเพิ่มความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม หลังอบบ่มเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 องศาเซลเซียส คือ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5.1.3 เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม คือ ตะกอนของสารประกอบเบริลเลียม-เงิน (Be_{12}Ag) ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้ได้สมบัติความเป็นสปริงมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานที่จะใช้ตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านควรจะใช้เทคนิค Ion Milling แทนการใช้สารเคมี เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ในชิ้นงาน

5.2.2 ควรปรับปรุงโลหะเงินสเตอร์ลิงโดยเติมธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นสปริงมากขึ้น โดยให้มีโมดูลัสยืดหยุ่น(E) ต่ำลง

รายการอ้างอิง

1. Stonehouse, A. James and James M. Marder. Beryllium. ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Vol 2. 10th ed. Ohio: ASM International, 2000:684.
2. Harkness, John C., William D. Spiegelberg and W. Raymond Cribb. Beryllium-Copper and Other Beryllium-Containing Alloys. ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Vol 2.10th ed. Ohio: ASM International, 2000:687.
3. มนัส สติริจินดา. บรอนซ์เบริลเลียม. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543:36-40.
4. Patnaik, Pradyot, ph.D, Handbook of Inorganic Chemicals , McGraw-Hill, New York, 2002:97-255.
5. Sloman, Hedley Archibald. Improvement in and Relating to Alloys Containing Beryllium and Silver. Patent Specification. No 399, 216. Application Date: May 25, 1932:1-4 .
6. McFarland, James C. and Fort Thomas. Age Hardening Silver of Sterling or Higher Standard. United State Patent. No. 1, 984, 225. Application Date: Sept 14, 1932:1-2.
7. สมนึก วัฒนศรียกุล และคณะ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). 2544:13.
8. Ag-Cu Phase Diagram. ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams. Vol 3 .10th ed. Ohio: ASM International, 2000:28.
9. Reed-Hill, Robert E.. Physical Metallurgy Principle. New York: D. Van Nostrand Company, Inc.,19683:70-375.
10. Ashby, Michael F. and David RH Jones. Engineering Materials: An Introduction to Their Properties and Applications. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1985:32-35.
11. Chantalakhana, Chak and Worathep Kusamankiet. Determination of Material Modulus of Elasticity from Dynamic Stiffness Using Modal Testing and Analysis. Bangkok: King Monkut's Institute of Technology North Bangkok, 2005:1-7.
12. Griffiths, Alan Aubert, Edward R. Green and Jin Ding. A Technique for Relating Vehicle

- Structural Modes to Stiffness as Determined in Static Determinate Tests. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001:1-7.
13. Belvin, Robert D.. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. New York: Krieger Publishing Company, 2001:43-52 .
14. Dieter, George E.. Mechanical Metallurgy. London: McGraw-Hill, Inc.,1988:282.
15. Properties of Precious Metals. ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Vol 2.10th ed. Ohio: ASM International, 2000:699-702.
16. ASTM E8M-96: Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Material. Annual Book of ASTM Standard. Vol 03.01, New York: American Society of Testing and Materials, 1996:87.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



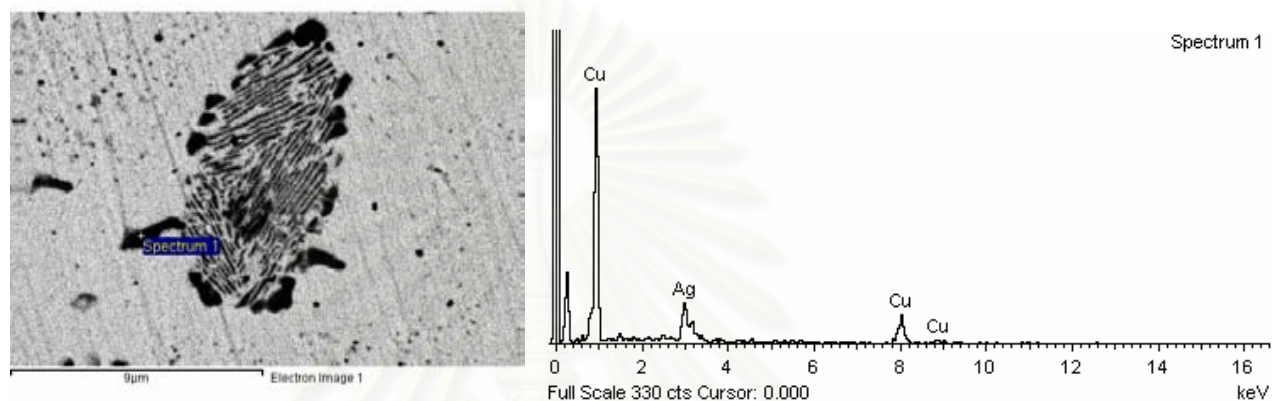
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

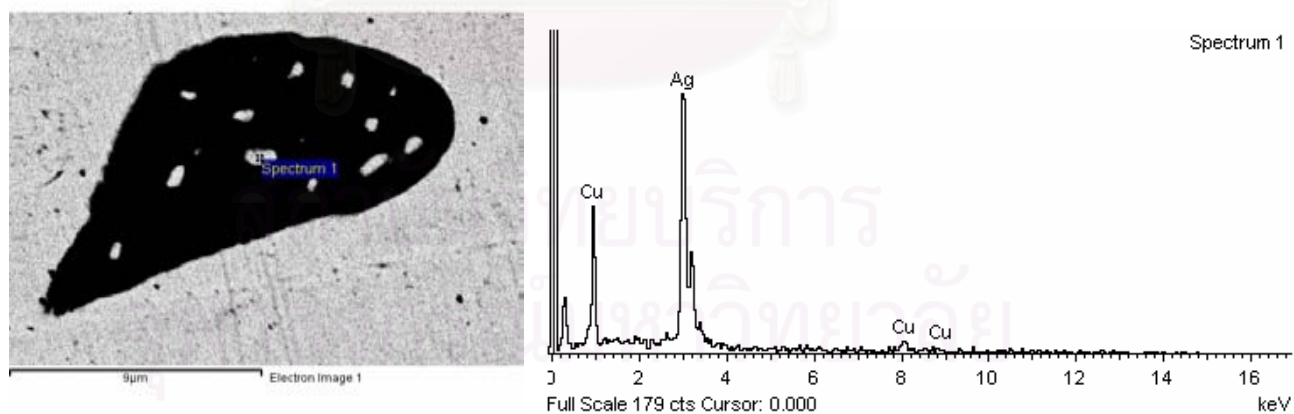
รูป ก โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 และเงินสเตอร์ลิง 935 - ทองแดง-เบริลเลียมที่ไม่ผ่านการกัดกรวด ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และ EDS

รูป ก1 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการหล่อ



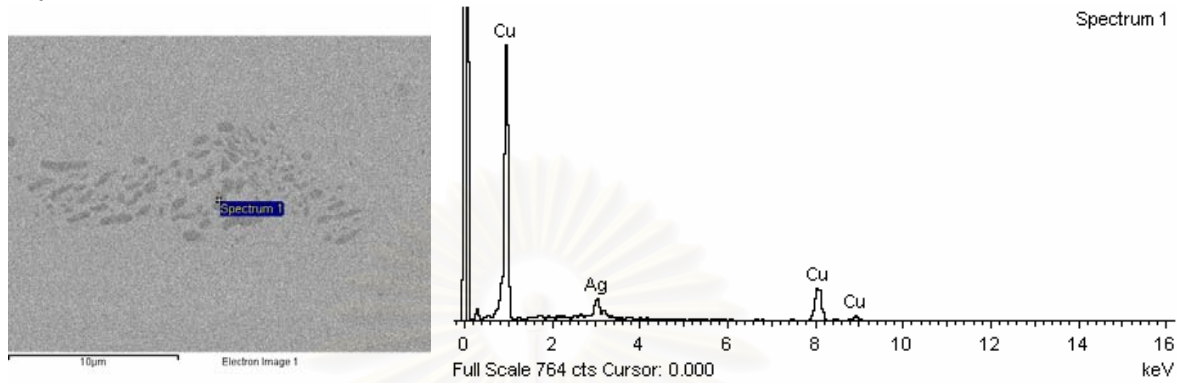
Element	Weight%	Atomic%
Cu L	81.09	87.92
Ag L	18.91	12.08
Totals	100.00	

รูป ก2 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 - ทองแดง-เบริลเลียม สภาพหลังการหล่อ



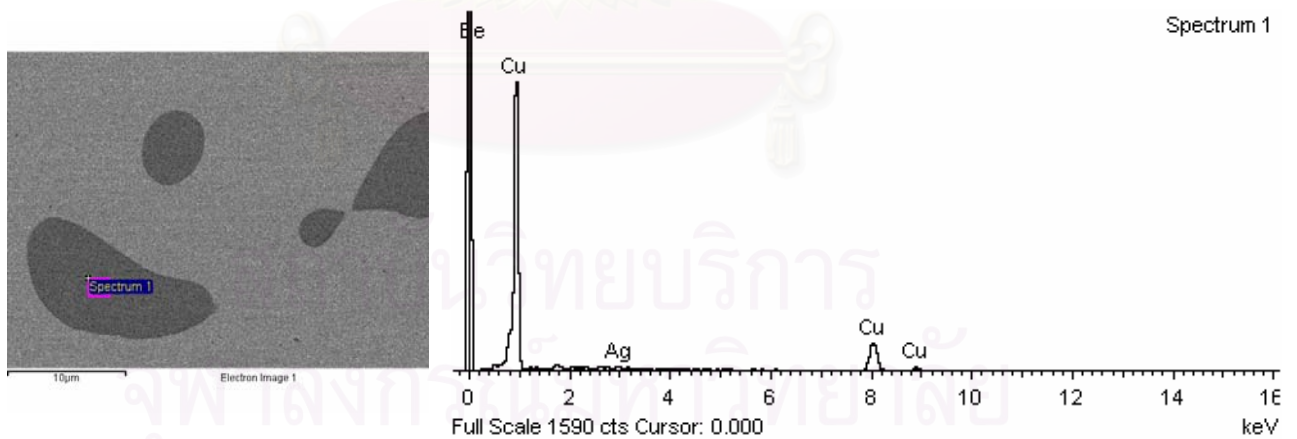
Element	Weight%	Atomic%
Cu L	35.56	48.36
Ag L	64.44	51.64
Totals	100.00	

รูป ก3 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว



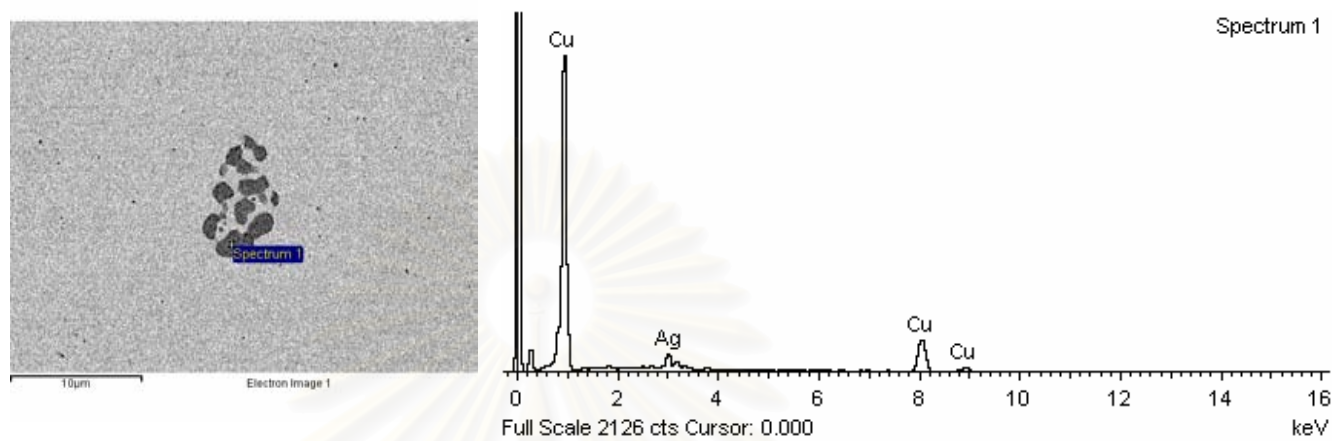
Element	Weight%	Atomic%
Cu K	87.59	92.30
Ag L	12.41	7.70
Totals	100.00	

รูป ก4 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียมสภาพหลังการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว



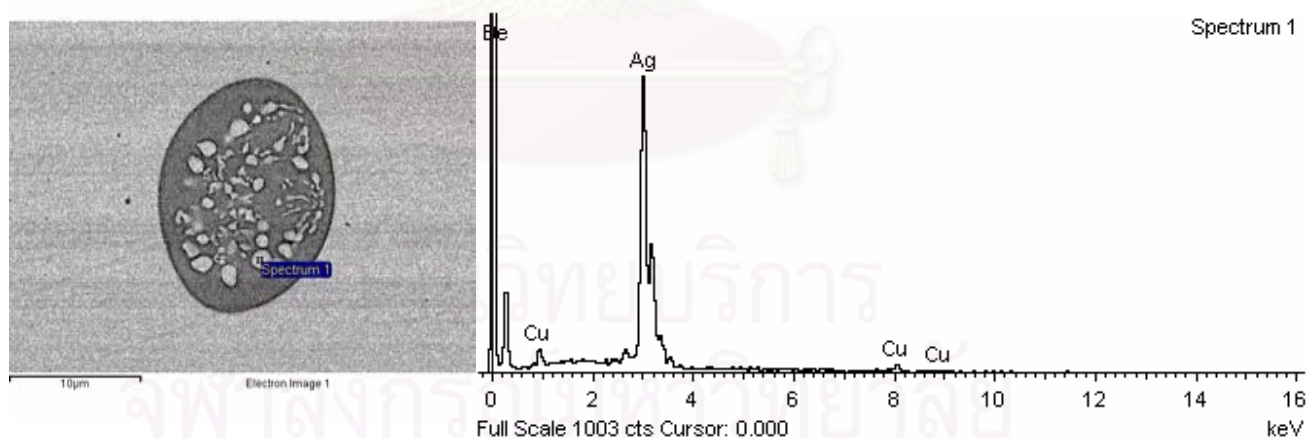
Element	Weight%	Atomic%
Cu K	97.79	98.68
Ag L	2.21	1.32
Totals	100.00	

รูป ก5 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการบ่มเพิ่มความแข็ง



Element	Weight%	Atomic%
Cu K	89.12	93.29
Ag L	10.88	6.71
Totals	100.00	

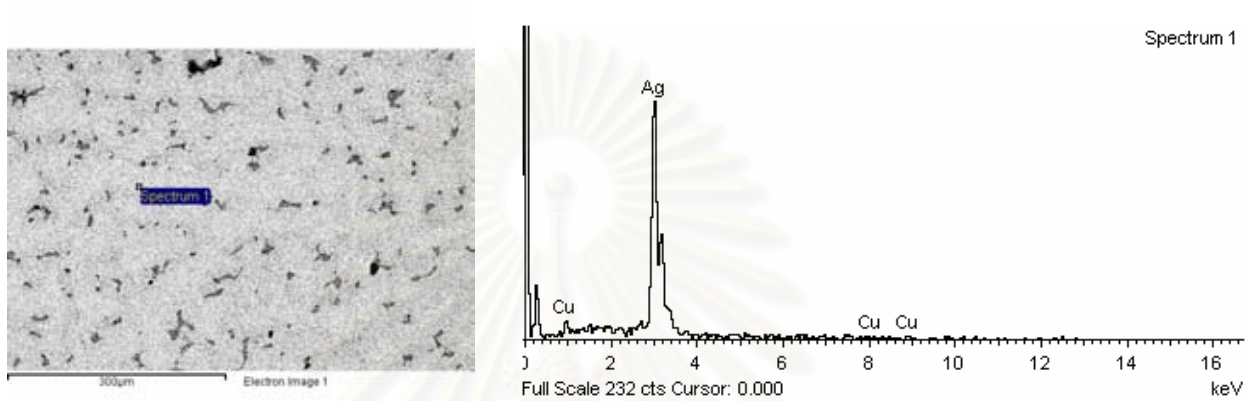
รูป ก6 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม สภาพหลังการบ่มเพิ่มความแข็ง



Element	Weight%	Atomic%
Cu K	7.59	12.23
Ag L	92.41	87.77
Totals	100.00	

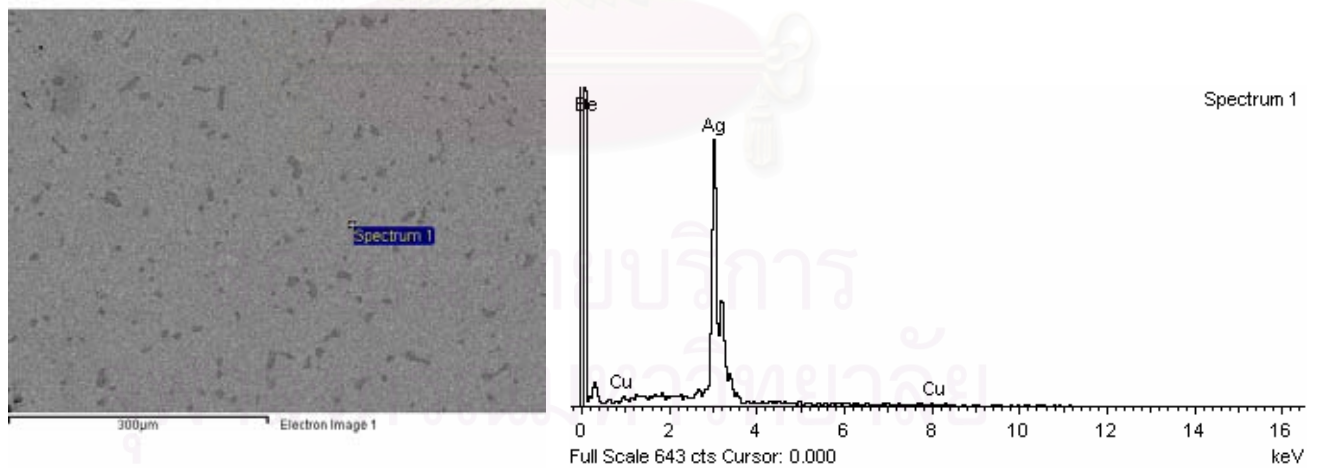
โครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix)

รูป ก7 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการหล่อ



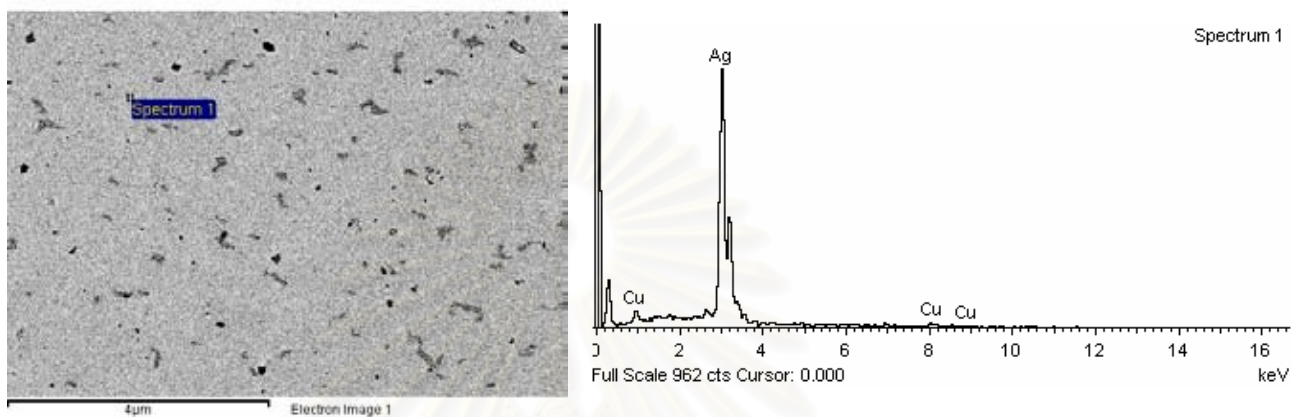
Cu L	8.95	14.30
Ag L	91.05	85.70
Totals	100.00	

รูป ก8 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม สภาพหลังการหล่อ



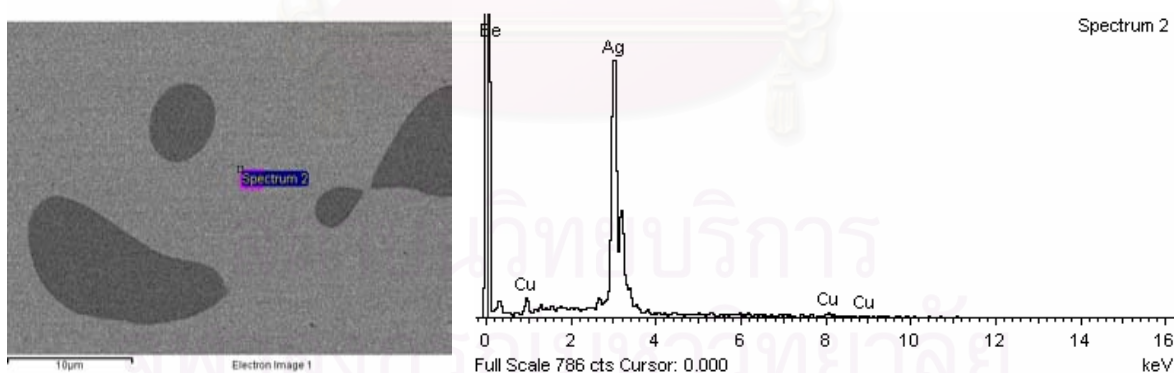
Element	Weight%	Atomic%
Cu K	0.56	0.94
Ag L	99.44	99.06
Totals	100.00	

รูป ก9 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อ



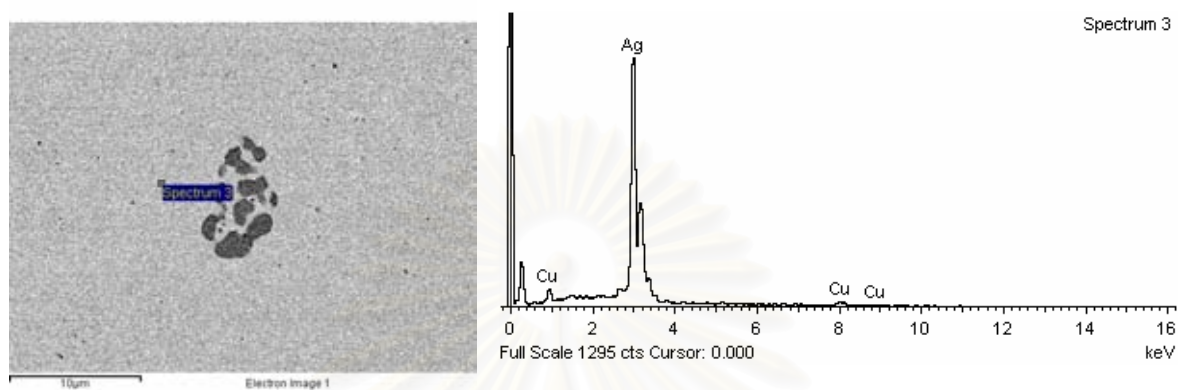
Element	Weight%	Atomic%
Cu L	4.25	7.00
Ag L	95.75	93.00
Totals	100.00	

รูป ก10 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม สภาพหลังการอบเป็น



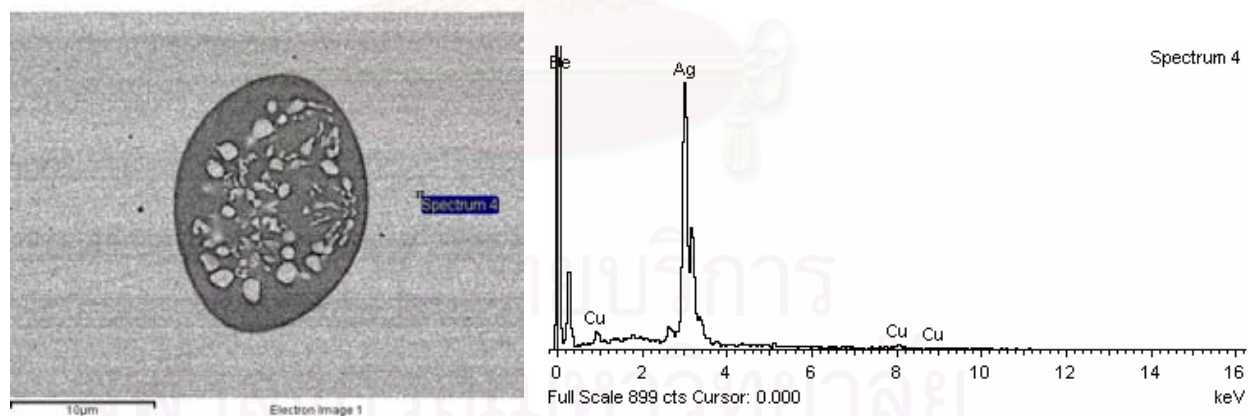
Element	Weight%	Atomic%
Cu K	4.41	7.26
Ag L	95.59	92.74
Totals	100.00	

รูป ก11 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935 สภาพหลังการบ่มเพิ่มความแข็ง



Element	Weight%	Atomic%
Cu K	6.03	9.83
Ag L	93.97	90.17
Totals	100.00	

รูป ก12 โครงสร้างเนื้อพื้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม สภาพหลังการบ่มเพิ่มความแข็ง



Element	Weight%	Atomic%
Cu K	4.94	8.10
Ag L	95.06	91.90
Totals	100.00	



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข1. การคำนวณและวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากข้อมูลการเลี้ยวเบนด้วยเทคนิค θ - 2θ ดิฟแฟรคชัน

เราสามารถระบุชนิดของระบบผลึกได้ ดังต่อไปนี้

$$\text{จากกฎของแบรกก์} \quad : \quad 2d_{hkl} \sin\theta = n \lambda$$

$$\text{สำหรับระบบลูกบาศก์} \quad : \quad d_{hkl} = a / [h^2+k^2+l^2]^{1/2}$$

แทนค่า d_{hkl} ลงในสมการของแบรกก์จะได้ว่า

$$2 \{ a / [h^2+k^2+l^2]^{1/2} \} \sin\theta = n \lambda$$

สามารถจัดให้สมการในรูปแบบใหม่ได้

$$h^2+k^2+l^2 = \sin^2\theta [2a / n \lambda]^2$$

เนื่องจากพจน์ทางด้านซ้ายมีค่าเป็นจำนวนเต็มเสมอ จึงทำให้พจน์ทางด้านขวามีค่าเป็นจำนวนเต็มด้วยเช่นกัน ในทางปฏิบัติจะมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

1. อ่านค่า 2θ จากตำแหน่งพีค
2. คำนวณค่า $\sin^2\theta$
3. ทำให้เป็นจำนวนเต็มโดยหาตัวคูณ
4. เปรียบเทียบรูปแบบของค่า $h^2+k^2+l^2$ กับ รูปแบบของระบบผลึกลูกบาศก์แบบต่างๆ กัน

ข2. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากแบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กทรอนิกส์

เราสามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบน โดยวัดระยะระหว่างระนาบ (d-spacing) จากจุดศูนย์กลางไปยังตำแหน่งที่เรากำหนดไว้และนำค่าคงที่ของกลังมาคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม จากสมการดังต่อไปนี้

$$Rd_{hkl} = \lambda L$$

- โดย R คือ ระยะจากจุดศูนย์กลาง (000) ถึงจุดเลี้ยวเบน (hkl)
 d_{hkl} คือ ค่าระยะระหว่างระนาบของอะตอม (hkl)
 λ คือ ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน ($\lambda = 0.0251$ อังสตรอม สำหรับความต่างศักย์ 200 กิโลโวลต์)
L คือ ความยาวกล้อง (Camera Length)

ค่า λL เป็นค่าคงที่ของกล้อง (Camera Constant) ซึ่งสามารถคำนวณได้ เพราะเราทราบทั้งค่า λ และค่า L แต่ในความเป็นจริงแล้ว λL ที่ได้จากการวัดอาจจะไม่ตรงกับค่าการคำนวณ ดังนั้นในทางปฏิบัติ จึงนิยมใช้ค่าที่ปรับเทียบ (Calibration) หลังจากนั้นนำค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมที่คำนวณจากสมการข้างต้นเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงจากข้อมูล JCPDF ของตำแหน่งระนาบ (h, k, l) ที่กำหนดในแบบรูปการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและตรวจสอบระนาบจากสมการดังนี้

$$R_1 + R_2 = R_3$$

$$R_1 + \bar{R}_2 = R_4$$

ตรวจสอบมุมระหว่างเวกเตอร์ (Vectors) แล้วเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดจริงโดยค่าความผิดพลาดต้องไม่เกิน 2 องศา แล้วคำนวณแกนโซน (Zone Axis) [u,v,w] ของระนาบระหว่าง (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข3. ข้อมูลอ้างอิงจากฐานข้อมูล JCPDF

Name : Silver

Reference Pattern : 04-0783

Wave Length :1.54060 Å

d-value (Å)	Angle (2θ)	Relative Intensity	(h,k,l)
2.3590	38.117	100	1 1 1
2.0440	44.279	40	2 0 0
1.4450	64.428	25	2 2 0
1.2310	77.475	26	3 1 1
1.1796	81.539	12	2 2 2
1.0215	97.891	4	4 0 0
0.9375	110.501	15	3 3 1
0.9137	114.928	12	4 2 0
0.8341	134.890	13	4 2 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

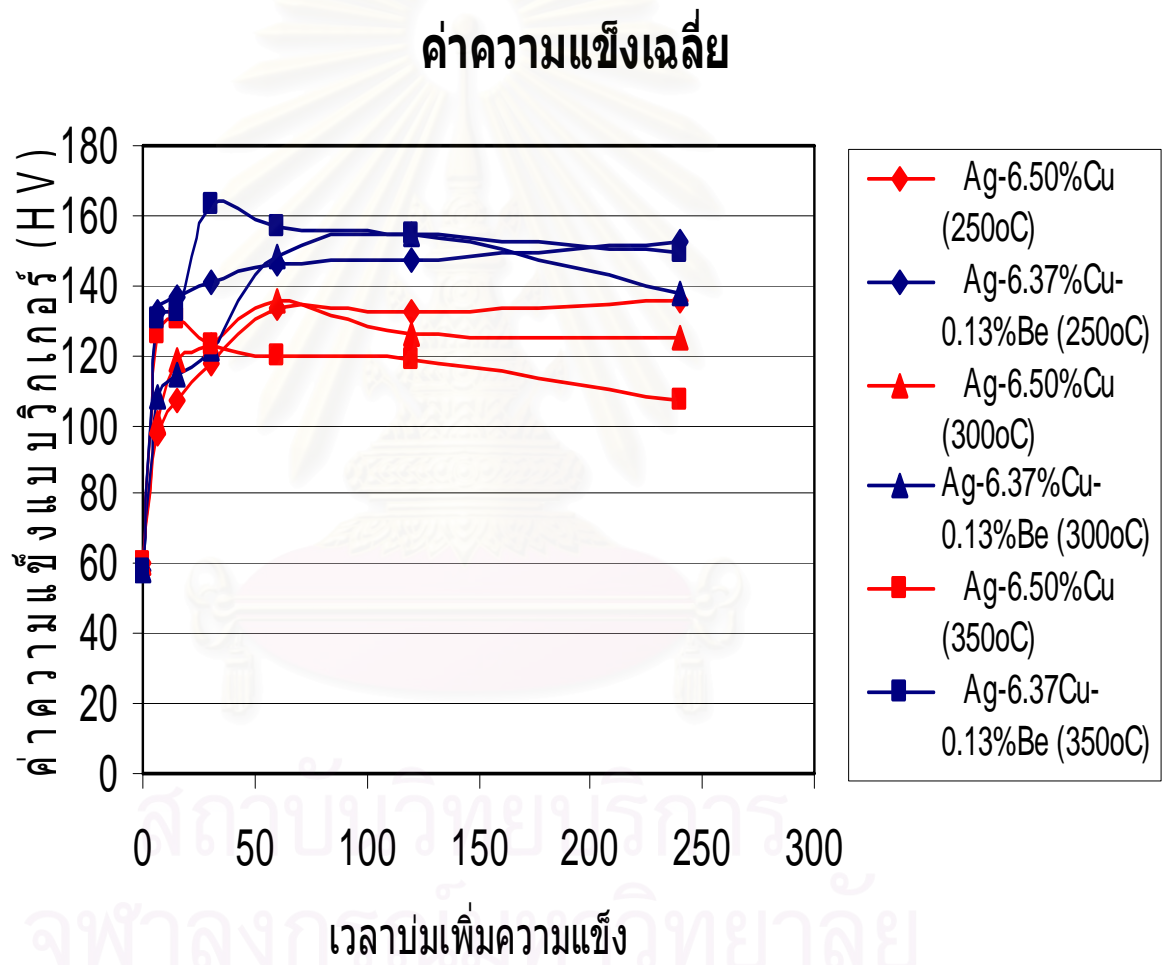
ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 (Ag-6.50%Cu) และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-เบริลเลียม (Ag-6.37%Cu-0.13%Be)

ตาราง ค1 ตารางแสดงค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)

ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)						
เวลา บ่ม (นาท)	Ag- 6.50%Cu (250°C)	Ag-6.37%Cu- 0.13%Be (250°C)	Ag- 6.50%Cu (300°C)	Ag-6.37%Cu- 0.13%Be (300°C)	Ag- 6.50%Cu (350°C)	Ag-6.37%Cu- 0.13%Be (350°C)
0	60.84	58.32	60.84	58.32	60.84	58.32
7	97.24	131.94	100.70	107.82	126.06	129.74
15	106.82	136.10	118.54	114.68	130.50	132.40
30	117.20	140.76	122.66	121.38	123.08	162.54
60	133.62	145.64	136.04	148.34	119.96	156.76
120	132.16	147.42	126.36	154.50	118.26	154.34
240	135.54	152.28	124.76	137.98	107.28	149.52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป ค1 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)



ตาราง ก2 ตารางแสดงความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS (MPa)) ความเค้นจุดคราก (σ_y (MPa))
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic (GPa))

Sample	Number	UTS (MPa)	σ_y (MPa)	%Elongation	Elastic (GPa)
Ag-6.50%Cu (As-cast)	1	236.19	94.99	36.46	2.91498
	2*	147.66	-	18.82	9.09231
	3**	-	49.47	49.72	6.35185
Ag-6.50%Cu (Solution)	1***	-	55.86	52.60	8.66945
	2	229.81	73.35	38.89	8.26490
Ag-6.50%Cu (Age)	1****	164.90	53.05	-	8.16354
	2	315.47	224.06	27.28	1.388200
	3*	304.82	-	19.51	1.411710
Ag-6.37%Cu-0.13%Be (As-cast)	1	228.45	81.49	36.89	3.36166
	2*	157.49	-	23.14	6.72691
	3*	120.13	-	14.79	4.52692
Ag-6.37%Cu-0.13%Be (Solution)	1**	-	58.75	40.04	5.19401
	2	216.78	60.95	45.14	7.34544
Ag-6.37%Cu-0.13%Be (Age)	1****	348.53	311.21	-	2.47180
	2****	359.45	320.18	-	2.09442
	3	387.65	339.70	18.61	3.19992

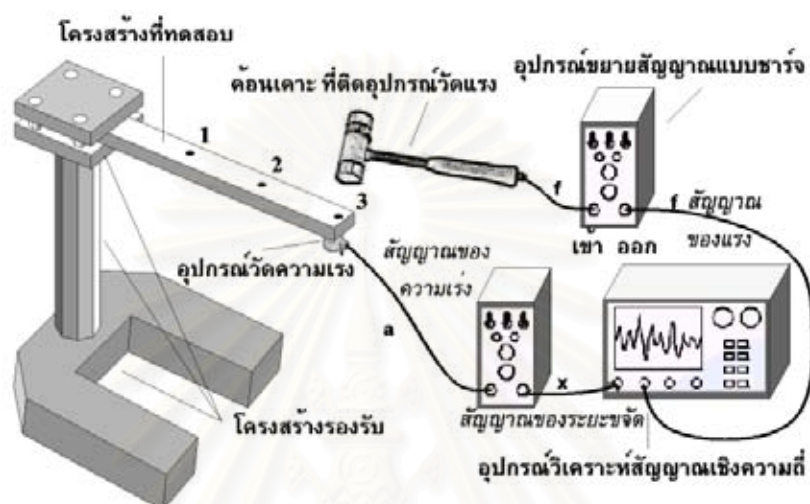
หมายเหตุ *ค่าความเค้นจุดครากใช้ไม่ได้ เนื่องจากกราฟช่วงแรกไม่สม่ำเสมอ

**บริเวณรอยแตกมีรูพรุนและรอยแตกมีสีดำ

***บริเวณรอยแตกมีรูพรุน

****ชิ้นงานแตกนอก Gauge Length

รูป ค2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ



การคำนวณค่า Young's Modulus จากสูตร

$$f_n = (1.875^2 / 2\pi) * (EI / \rho AL^4)^{1/2} \text{ หรือ}$$

$$E = (2\pi f_n / 1.875^2)^2 * (\rho AL^4 / I)$$

เมื่อ f_n = ความถี่ธรรมชาติ (Hz)

E = Young's Modulus (GPa)

I = Moment of Inertia (m^4)

ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Kg/m^3)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

L = ความยาวของชิ้นงาน (m)

$I = 1/12 bh^3$

b = ความกว้างของชิ้นงาน (m)

t = ความหนาของชิ้นงาน (m)



ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

รูป ง1 รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่เติมเบริลเลียม ด้วย ICP ในสภาพหลังการหล่อ



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (สอว)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT)

อาคารวิจัยและตรวจสอบอัญมณี โบสถ์วัดคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
 Gemmological Research and Testing Building in Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND
 Tel: (66 2) 218-5470-3, 652-5252 ext. 29 Fax: (66 2) 218-5474, 652-5256 Website: www.git.or.th E-mail: jewelry@git.or.th

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No SI0507-010-2
 วันที่รับของ 29/06/05 วันที่วิเคราะห์ 6/09/05
 ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Silver
 น้ำหนัก / Weight _____
 รายละเอียด / Description No. Be / 2

วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying

XRF

ICP

Auto-Titration

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ร้อยละ / percent	หมายเหตุ / Remark
Ag (Silver)	93.470	
Cu (Copper)	6.430	
Be (Beryllium)	Non-detectable	

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)

ผู้ตรวจลอบ / Assayer

หมายเหตุ : การตรวจความบริสุทธิ์โดยวิธี XRF รับรองความถูกต้องในระดับผิวที่มีความลึกไม่เกิน 100 ไมครอนเท่านั้น
 Remark : Assaying by XRF can guarantee the accuracy through a surface layer up to 100 microns only.

รูป 2 รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่เติมเบริลเลียม 0.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วย ICP (Ag-6.33%Cu-0.17%Be) ในสภาพหลังการหล่อ



รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No SI0507-009-1
 วันที่รับของ 29/06/05 วันที่วิเคราะห์ 6/09/05
 ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Silver
 น้ำหนัก / Weight _____
 รายละเอียด / Description No. Be / 1

วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying

XRF

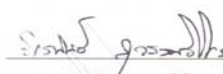
ICP

Auto-Titration

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ร้อยละ / percent	หมายเหตุ / Remark
Ag (Silver)	93.425	
Cu (Copper)	6.420	
Be (Beryllium)	0.138	

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


 (จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : การตรวจความบริสุทธิ์โดยวิธี XRF รับรองความถูกต้องในระดับผิวที่มีความลึกไม่เกิน 100 ไมครอนเท่านั้น
 Remark : Assaying by XRF can guarantee the accuracy through a surface layer up to 100 microns only.

รูป ง3 รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่เติมเบรลเดียมด้วย ICP ในสภาพหลังอบบ่มเพิ่มความแข็ง



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT)

อาคารวิจัยและทดสอบอัญมณี ในบริเวณมหาวิทยาลัย วิทยาเขตปทุมธานี ถนนพหลโยธิน แขวงปทุมธานี กรุงเทพฯ 10230
Gemological Research and Testing Building in Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Pathumthani, Bangkok 10230, THAILAND
Tel: (66 2) 219-5475-3, 552-5252 ext. 25 Fax: (66 2) 219-5474, 552-5256 Website: www.git.or.th E-mail: jewelry@git.or.th

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No ASI0601-0012
วันที่รับของ 14/12/06 วันที่วิเคราะห์ 5/01/06
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Alloy
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 8.27 g
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 7.42 g
รายละเอียด / Description

วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ร้อยละ / percent	หมายเหตุ / remark
Ag (Silver)	93.313	
Cu (Copper)	6.685	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(จักรพันธ์ จูวรรณวิจิตร)

ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : การตรวจความบริสุทธิ์โดยวิธี XRF รับรองความถูกต้องในระดับผิวที่มีความลึกไม่เกิน 100 ไมครอนเท่านั้น
Remark : Assaying by XRF can guarantee the accuracy through a surface layer up to 100 microns only.

รูป ง4 รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่เติมเบริลเลียม 0.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วย ICP (Ag-6.33%Cu-0.17%Be) ในสภาพหลังอบบ่มเพิ่มความแข็ง



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT)

อาคารวิจัยและห้องปฏิบัติการอัญมณีและเครื่องประดับ ชั้น 4 อาคาร 10 ชั้น ถนนพหลโยธิน แขวงสามยุค กรุงเทพฯ 10330
Gemological Research and Training Building in Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phrasarad Road, Pathumwan, Bangkok 10330, THAILAND
Tel: (66 2) 218-5479-3, 232-5252 ext. 25 Fax: (66 2) 218-5474, 532-5256 Website: www.git.or.th E-Mail: jewelry@git.or.th

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

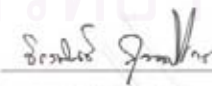
เลขที่ / No ASI0601-0013
วันที่รับของ 14/12/06 วันที่วิเคราะห์ 5/01/08
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Alloy
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 9.94 g
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 9.40 g
รายละเอียด / Description

วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ร้อยละ / percent	หมายเหตุ / remark
Ag (Silver)	93.329	
Cu (Copper)	6.488	
Be (Beryllium)	0.115	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)

ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ: การตรวจความบริสุทธิ์โดยวิธี XRF รับรองความถูกต้องในระดับผิวที่มีความลึกไม่เกิน 100 ไมครอนเท่านั้น
Remark : Assaying by XRF can guarantee the accuracy through a surface layer up to 100 microns only.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ- นามสกุล	นายตระกูลศักดิ์ สุขี
วัน-เดือน-ปีเกิด	7 ตุลาคม 2514
ที่อยู่	107/10 หมู่ 3 ตำบลบ้านครัว อำเภอบ้านหม้อ จังหวัดสระบุรี 18270
วุฒิการศึกษา	- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร ปีการศึกษา 2536 - เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาคการศึกษาที่ 1/ 2546 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย