รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

A Study and Develop the Composition of White Gold Alloy 6k for Jewelry Setting Manufacturing

ธีระวัฒน์ แม้นด้วง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ โดยการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็ง) ของโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ผลการทดลอง พบว่าจากการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองขาว 6k มีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอม ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะทองขาว 6k สูตรส่วนผสม 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.14 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 64% และมีค่าความแข็งเท่ากับ 259.87HV ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงออกมาแบบนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุจะเป็นแบบแข็งเปราะ (Brittle Material) เมื่อนำไปขึ้นรูปจะเกิดการแตกหักได้และการขึ้นรูปจะเป็นไปได้ยาก ส่วนผสมสูตร 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd, 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd และ 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 0.66-0.70 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง 84-90% และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 277.60, 244.60 และ 186.73HV ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมโลหะทองขาว 6k 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 90% และมีค่าความแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 186.73HV จะเหมาะสำหรับการขึ้นรูปเพราะมีคุณสมบัติแข็งเหนียว (Ductile Material) การขึ้นรูปจะทำได้ง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลที่ดีในกระบวนการขึ้นรูปโลหะมีค่า ต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องประดับโลหะทองขาว 6k, กระบวนการขึ้นรูป, คุณสมบัติทางกล

Abstract

This Research is to Study the Development of 6k White Gold Alloys for Jewelry Production. The Influence of Admixtures on Mechanical Properties was Investigated (Tensile Strength and Hardness) of 6k White Gold Alloys at Various Composite Ratios.

The Results of the Experiments Show that the Chemical Composition of 6k White Gold Alloys is Slightly Different when Compared with the XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers). Compare the pre and Post-Melting Quantities. Test results of Mechanical Properties of Test Pieces. The Tensile Strength of the 6k Gold Alloy is 25% Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd The Highest Value was 1.14 kN / mm^2, the Lowest Percentage was 64% and the Hardness was 259.87HV. The Result of this Test is that the Mechanical Properties of the Material are Brittle Material. When the Mold is Formed, the Fracture and Forming will be Difficult. 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd, 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd and 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd Tensile Strength in the Range of 0.66-0.70 kN / mm^2, Percentage of Elongation in the Range of 84-90% and Hardness of 277.60, 244.60 and 186.73HV, Respectively. The Mechanics will Show that the Alloys of White Gold 6k 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd Have Similar Tensile Strength. The Maximum Percentage of Elongation is 90% and the Minimum Hardness is 186.73HV. It is Suitable for Forming because it has Ductile Material. This is a Good Mechanical Property in the Metal Forming Machine.

Keywords : 6k White Gold Jewelry, Forming Process, Mechanical Properties

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดี รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา และคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครมาตั้งแต่เริ่มต้น ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย	7
1.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย	8
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีทองคำ	10
2.2 โลหะวิทยาของทองคำเจือหรือทองคำกะรัต	13
2.3 อิทธิพลธาตุของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของทองคำ	17
2.4 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง	30
2.5 คุณสมบัติของพาเลเดียม	39
2.6 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)	40
2.7 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)	42
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงาน	44
3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ	45
3.3 ขั้นตอนการทำต้นแบบพิมพ์ยาง และขั้นตอนการทำต้นแบบ Wax	50
3.4 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ 58

3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง 59

3.7 การทดสอบความแข็ง 60

3.8 สรุป 61

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k 62

4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k 63

บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย 66

5.2 ข้อเสนอแนะ 67

บรรณานุกรม 68

ภาคผนวก 69

ประวัติย่อผู้วิจัย 70

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1	ระยะเวลาและแผนการดำเนินโครงการวิจัย	7
2.1	สมบัติทางกายภาพของทองคำ	11
2.2	สมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป	11
2.3	การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในทองคำกะรัตต่างๆ	13
2.4	สมบัติพื้นฐานของเงินและทองแดง	18
2.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุเจือ สีและสมบัติที่เกิดขึ้นของทองคำ	18
2.6	แสดงตารางถึงผลของธาตุทองแดงในปริมาณต่างๆ ในโลหะทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน- ทองแดง หลังจากผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด 15% 30% และ 60%	21
2.7	หน้าที่ของธาตุเจือในลักษณะธาตุเจือรองที่เป็นตัวเติม และสารมลทินที่เติมลงในทองคำเจือ	23
2.8	แสดงผลดีและผลเสียของธาตุเจือรองที่ผสมทองไปในทองคำเจือ	23
2.9	ค่าความแข็ง HV 10 ของทองคำเจือธาตุเจือชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันและอัตราการขึ้นรูปต่างๆ	25
2.10	ค่าความแข็งของทองคำเจือที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของธาตุเจือต่างๆ	25
2.11	ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่างๆ	30
2.12	คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส	31
2.13	ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ	32
2.14	ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM	32
2.15	คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน	33
2.16	แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ	36
2.17	ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ	37
2.18	ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง	38
2.19	ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาการรับแรงดึง (DIN 50125) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (สมนึก วัฒนศรียกุล, 2549: 17)	42

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.1	อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6K	49
4.1	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k	62
4.2	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k	63
4.3	ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	63
4.4	ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี (Zn) และพาเลเดียม(Pd) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีผลต่อค่าความแข็ง	65

สารบัญภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน – ทองแดง	14
2.2	แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนของแผนภาพสมดุลเฟสทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ – เงิน-ทองแดง	15
2.3	แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเจือ	15
2.4	ภาคตัดในแนวดิ่งที่ 18 14 และ 10 กะรัต บนแผนภาพสมดุล ทองคำ-เงิน-ทองแดง	15
2.5	แผนแสดงสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน	19
2.6	แผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-ทองแดง	20
2.7	การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างระเบียบโครงสร้างมีระเบียบ	20
2.8	ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของทองคำ	24
2.9	แผนภาพสมดุลทองคำ-ดีบุก (ที่มา : ASM International Handbooks)	26
2.10	แผนภาพสมดุลทองคำ-พลวง (ที่มา : ASM International Handbooks)	28
2.11	แผนภาพสมดุลทองคำ-เจอมาเนียม (ที่มา : ASM International Handbooks)	29
2.12	แผนภาพสมดุลทองคำ-ซิลิกอน (ที่มา : ASM International Handbooks)	29
2.13	แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง	34
2.14	ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน	38
2.15	ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers	40
2.16	ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม (สมนึก วัฒนศรียกุล, 2549: 13)	41
3.1	แผนภาพแสดงการดำเนินงาน	44
3.2	แสดงลักษณะโลหะทองคำที่ใช้การทดลอง	45
3.3	แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง	46
3.4	แสดงลักษณะโลหะทองแดง	47
3.5	แสดงลักษณะพาเลเดียมที่ใช้ในการทดลอง	48
3.6	แสดงลักษณะสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง	49
3.7	แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6K	50
3.8	แสดงขั้นตอนการติดก้านทางเดินน้ำโลหะ	51
3.9	แสดงการวางชิ้นงานลงบล็อกอัดพิมพ์ยาง	52

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 แสดงการอัดพิมพ์ยางสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ 52
3.11 แสดงลักษณะการผ่าพิมพ์ยางสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ 53
3.12 แสดงการฉีด Wax สำหรับทำชิ้นงานทดสอบ 53
3.13 แสดงการติดต้นเทียนสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ 54
3.14 แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์ 55
3.15 แสดงการอบปูน 55
3.16 แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ 56
3.17 การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ 57
3.18 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป 57
3.19 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการตัดต้น 58
3.20 เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ 58
3.21 ภาพแสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร) 59
3.22 ภาพแสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine) (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร) 60
3.23 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E 92-16 61
4.1 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 64
4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่ถือว่ามีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศมากที่สุดสาขาหนึ่ง มูลค่าการส่งออกในแต่ละปีมีมูลค่าประมาณสามแสนล้านบาท และก่อให้เกิดการจ้างงานในตำแหน่งงานต่างๆ มากมาย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ทักษะฝีมือความประณีตในการผลิตค่อนข้างสูงและต้องใช้แรงงานในการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งเครื่องจักรไม่สามารถทดแทนได้ การประกอบการของอุตสาหกรรมสาขานี้ มีทั้งผู้ประกอบการ ที่ดำเนินการผลิตขนาดใหญ่ ขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs.) รวมถึงผู้ประกอบการระดับครัวเรือน สำหรับในส่วนของผู้ประกอบการ (SMEs.) นั้น มีผู้ประกอบการอยู่เป็นจำนวนมากและกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น รัฐบาลจึงให้ความสำคัญและให้การสนับสนุนอุตสาหกรรมสาขานี้เป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีความได้เปรียบและสามารถพัฒนาศักยภาพให้สามารถแข่งขัน หรือเป็นผู้นำทางด้านการผลิตและการค้าในการเปิดเสรีทางการค้ากับประเทศคู่ค้าต่างๆ และที่ผ่านมารัฐบาลได้มีนโยบายต่างๆ ที่จะพยายามผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก โดยมีการจัดทำโครงการแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมสำหรับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การดำเนินการของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมในช่วงปี 2544-2546 ซึ่งรายละเอียดของโครงการได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การบริหารโครงการโดยชุดโครงการอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตัวอย่างโครงการวิจัย อาทิเช่น การศึกษาวิจัยทางด้านการพัฒนาส่วนผสมของโลหะตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่าต่างๆ ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยพัฒนาสร้างเตาเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตเครื่องประดับและอื่นๆ อีก ฯลฯ นอกจากโครงการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับดังที่กล่าวข้างต้น ในช่วงปี 2547-2549 รัฐบาลยังมีการจัดทำโครงการกรุงเทพเมืองแฟชั่นเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ให้มีความเจริญรุดหน้ามากยิ่งขึ้น โดยการสนับสนุนให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาวิจัยและจัดทำโครงการฝึกอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการ และนอกจากนี้รัฐบาลยังได้มอบหมายให้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ (Mtec) ดำเนินการจัดทำแผนยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ในปี 2548-2557 ขึ้นมา เพื่อส่งเสริมให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางด้านวัสดุ ซึ่งยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ยุทธศาสตร์ที่ 3

เป็นยุทธศาสตร์ที่เน้นหนักไปทางด้านวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมแฟชั่น ที่มุ่งส่งเสริมให้มีการวิจัยพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการผลิตสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมในสาขาสิ่งทอ เครื่องหนัง และอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ (ที่มา : แผนยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec.) www.mtec.or.th และความคืบหน้าล่าสุดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน 2552 รัฐบาลโดยการนำของนายอภิสิทธิ์ เวชชาชีวะ นายกรัฐมนตรี ได้มีการประกาศยกเลิกการจัดเก็บภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT) 7% สำหรับวัตถุดิบอัญมณีทุกประเภทที่นำมาผลิตสินค้าสำเร็จรูปเพื่อส่งออก ไม่ว่าจะเป็นเพชร หรือพลอยก้อน ที่ยังไม่เจียระไนรวมถึงโลหะมีค่าอื่นๆ เพื่อสนับสนุนให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการค้าและการผลิตผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลกและเป็นอุตสาหกรรมที่สามารถช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจของประเทศในภาวะที่กำลังประสบกับปัญหาวิกฤติเศรษฐกิจ (ที่มา: **จากหนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ ฉบับที่ 2438 25 มิ.ย. - 27 มิ.ย. 2552)**

จากการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาอุปสรรคในการพัฒนาคุณภาพการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ที่ได้มีการประชุมร่วมกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ได้ข้อสรุปว่าปัญหาสำคัญ (Major Problem) เกี่ยวกับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ได้แก่

1.1.1 ปัญหาด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทั้งในรูปของโลหะมีค่าบริสุทธิ์ โลหะเจือสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่าอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่า และโลหะเจือที่ใช้สำหรับการผลิตเครื่องประดับเทียม (อาทิเช่น ทองคำเจือ เงินเจือ แพลทินัมเจือ ทองเหลือง โลหะสีขาว ดีบุก และตะกั่ว เป็นต้น) การศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านวัตถุดิบนี้ควรที่จะมีการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยขึ้นมาใช้เองภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเริ่มทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของโลหะมีค่า (สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติทางด้านการหล่อขึ้นรูป

1.1.2 ปัญหาด้านวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากในขบวนการผลิตเครื่องประดับจะต้องมีการเชื่อมประสานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการเชื่อมกระเปาะสำหรับฝังพลอยเข้ากับตัวเรือนของจี้ ต่างหู หรือแม้แต่ก้านแหวน และนอกจากนี้ยังรวมถึงการเชื่อมประสานเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จโดยการเชื่อมปิดรอยตำหนิหรือตามด และหรือรอยตำหนิจากการหดตัวของชิ้นงานจากขบวนการหล่อขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานเหล่านี้จะต้องมีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับ แต่จะต้องมีปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าผสมอยู่ตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้สำหรับการแบ่งชนิดของโลหะมีค่าเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และนอกจากนี้สีของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนให้มากที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงความแตกต่างระหว่างสีของวัสดุตัวเรือนและวัสดุเชื่อมประสาน

1.1.3 ปัญหาด้านการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ เนื่องจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ยังมีผลงานการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ค่อนข้างน้อย ไม่

สามารถทำการศึกษาวิจัยได้ครอบคลุมสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ประกอบการที่เป็น SMEs. เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซ LPG และออกซิเจนที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา (Torch หรือ Burner) แบบสัมผัสบรรยากาศเปิดปกติ ตัวแปรของอุณหภูมิน้ำโลหะและแบบหล่อที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของบรรยากาศที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ และอิทธิพลของขนาดทางเดินน้ำโลหะที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ เป็นต้น

1.1.4 ปัญหาด้านการขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกล กล่าวคือ การขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกลนั้น เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและผลิตได้ในปริมาณมากๆ ในลักษณะของ Mass Product ช่วยให้สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง แต่สภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมเกิดจากขาดแคลนบุคลากร และองค์ความรู้ทางด้านการขึ้นรูปโลหะมีค่าด้วยวิธีการทางกล เช่น การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป องค์ความรู้ทางด้านพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับโลหะมีค่าในระหว่างที่ดำเนินการผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกล องค์ความรู้ทางด้านปัจจัยหรือสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการขึ้นรูป (เช่น แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ค่า Clearance ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ให้ประสิทธิภาพการหล่อลื่นสูงสุดสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกล)

1.1.5 ปัญหาทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์การผลิตกล่าวคือ ยังขาดแคลนเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิต เช่น เครื่องหล่อที่สามารถควบคุมบรรยากาศและอุณหภูมิได้เที่ยงตรง เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างต้นแบบได้รวดเร็ว (Rapid Prototype) เทคโนโลยี CAD/CAM

จากวิกฤติเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลา 2-3 ปีที่ผ่านมาและต่อเนื่องจนถึงทุกวันนี้ และราคาของโลหะมีค่าต่างๆ ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ส่งผลให้พฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจสินค้าเครื่องประดับที่มีราคาถูก แต่ยังคงต้องการเครื่องประดับที่ผลิตจากโลหะมีค่าต่างๆ เช่นเดิมโดยมีการลดปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าลง และนอกจากนี้กลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่มหันมาให้ความสนใจเครื่องประดับที่ผลิตจาก สแตนเลส และทองเหลืองมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุที่ใช้ในการผลิตเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภค

จากปัญหาของภาคอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยของโครงการวิจัยนี้ จะทำการศึกษาวิจัยเพื่อการศึกษาพัฒนาส่วนผสมของธาตุเจือที่เหมาะสมของโลหะทองขาว 6k โดยทำการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือเงิน ทองแดง พาเลเดียม และสังกะสี ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล การทดสอบความต้านทานแรงดึง และการทดสอบความแข็ง และนอกจากนี้การดำเนินการของโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนใน

รูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากว่า 20 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมต่อทองขาว 6k

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือโลหะทองขาว 6k ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าความแข็ง)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและดำเนินการวิจัยส่วนผสมธาตุเจือของทองขาว 6k ธาตุทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และ พาเลเดียม(Pd)

สูตร A : 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd

สูตร B : 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd

สูตร C : 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd

สูตร D : 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd

1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมี คุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึง, ค่าความแข็ง)

1.3.3 ศึกษาวิเคราะห์และตรวจสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมี XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง และเครื่องทดสอบความแข็ง

1.3.4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีขององค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1.1 วัสดุ

วัสดุต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัยในโครงการนี้ประกอบด้วย

1) โลหะทองโดยโลหะทองที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นโลหะทองความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ด

2) โลหะเงินโดยโลหะเงินที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นโลหะเงินความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ด

3) ทองแดงโดยทองแดงที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.9% มีลักษณะเป็นเม็ดที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไปตามร้านขายเครื่องมือช่างและวัสดุสำหรับการผลิตเครื่องประดับ

4) สังกะสีเป็นธาตุบริสุทธิ์ 99.99% ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด

5) พาเลเดียม ที่มีลักษณะเป็นเม็ด

1.4.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบด้วย

1) อุปกรณ์สำหรับการหล่อหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปชิ้นสอบนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าหลอมโลหะ ปูนสำหรับทำแบบหล่อ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง และเทียนสำหรับฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียน

2) วัสดุสำหรับการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วย กระดาษทราย ผ้าขัด ผงเพชรขนาดต่างๆ และสารเคมี

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการหลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องปะดับ ซึ่งประกอบไปด้วย หลอมผสมเทเม็ดโลหะ เครื่องหล่อดูดสุญญากาศและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ (เครื่องฉีดเทียน เครื่องผสมปูน เครื่องอบนึ่งไอน้ำและเตาอบปูนแบบหล่อ)

2) เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วย เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Test) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Machine)

3) เครื่องมือวิเคราะห์และตรวจสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาปริมาณส่วนผสมทางเคมี XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers)

1.4.2 การดำเนินการศึกษาวิจัย

1) การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบสำหรับการวิจัยนี้ดำเนินการโดยการหลอมโลหะทองขาวที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ซึ่งทำการหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมเทเม็ดโลหะที่ทำการหลอมโลหะผสมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศและปกคลุมผิวน้ำโลหะด้วยก๊าซอาร์กอน ด้วยเครื่องหล่อ Profitcast รุ่น IC 600 ที่ใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ หลังจากทำการหลอมผสมโลหะจนส่วนผสมต่างๆ หลอมผสมเข้าด้วยกันแล้วทำการเทหยดน้ำโลหะลงในน้ำเป็นเม็ดโลหะ

สภาวะของการหลอมผสมเทเม็ดโลหะเพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบ

1) อัตราส่วนผสมของเม็ดโลหะประกอบด้วย Au+Ag+Cu+Zn+Pd

2) ความจุของการหลอมผสมโลหะครั้งละ 1/2 กิโลกรัม

3) อุณหภูมิหลอมผสมโลหะ 1,150°C

4) ระยะเวลาของการคงอุณหภูมิก่อนทำการเทหยดเม็ดโลหะ 10 นาที

5) หลอมผสมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศและปกคลุมผิวน้ำโลหะด้วยก๊าซอาร์กอน

2) การหล่อหลอมขึ้นรูปชิ้นทดสอบโลหะทองขาว 6k ได้ดำเนินการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบเป็นแท่งดัมเบล สำหรับการวิเคราะห์สมบัติความต้านแรงดึงโดยตัวแบบเทียนของชิ้นทดสอบสำหรับการหล่อขึ้นรูปได้จากการฉีดเทียนเข้าไปในโพรงแบบซิลิโคลน สำหรับในส่วนชิ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง การศึกษาโครงสร้างจุลภาค ชิ้นทดสอบถูกกำหนดให้มีขนาด 20×20×3 mm ซึ่งตัวแบบเทียนทั้งหมดจะถูกนำไปติดเป็นต้นเทียนสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยขบวนการ Investment Casting ด้วยเครื่องหล่อดูดสุญญากาศยี่ห้อ Profitcast รุ่น IC 600

3) การทดสอบความต้านแรงดึงของโลหะทองขาว 6k เพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะทองขาว เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบพลาสติกและโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง โดยทำการทดสอบแรงดึงอัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น และเงื่อนไขการการทดสอบเพิ่มความเค้นไม่เกิน 10 N/mm^2ต่อวินาที ขนาดของชิ้นทดสอบช่วง Gauge length มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 mm ยึดถือตามมาตรฐาน ASTM E 8 M – 99

4) การทดสอบความแข็งของโลหะทองขาว 6k เป็นการตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Hardness Testing Machine ของ Mitutoyo, Japan รุ่น MVK-H11 ที่ได้รับการสอบเทียบความแข็งกับแผ่นทดสอบความแข็งมาตรฐานก่อนการทดสอบชิ้นทดสอบทุกครั้ง

1.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ทำการศึกษาเพื่อสรุปผลที่ได้จากการทดลอง และนำไปทำการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดผลที่มีความแม่นยำสูงในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนการดำเนินโครงการวิจัย (1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560)

กิจกรรม	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	◆	◆										
2. ออกแบบการทดลอง		◆	◆									
3. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์		◆	◆	◆								
4. ดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนด				◆	◆							
5. ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน					◆	◆						
6. วัดผล และตรวจสอบผลการทดลอง							◆	◆				
7. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง									◆	◆		
8. ประเมินผลการทดลอง											◆	◆
9. เผยแพร่งานวิจัย											◆	◆
10. จัดทำรายงานและส่งรายงานฉบับสมบูรณ์											◆	◆

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

กระบวนการผลิตเครื่องประดับประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตหลักๆ คือ การหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและชิ้นส่วน การเชื่อมประสานประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ การฝังอัญมณีบนตัวเรือนเครื่องประดับ และการขัดแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จรูป ซึ่งกระบวนการหล่อเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในขั้นตอนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของธาตุต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของโลหะทองขาว 6k ด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปเพื่อให้ได้คุณสมบัติชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในแต่ละด้านต่อไป

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

การศึกษาวิจัยในโครงการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวและปรับปรุงสมบัติทางกล ความเงา และแก้ปัญหาการเกิดข้อบกร่องต่างๆ ของชิ้นงานเครื่องประดับเงินจากขบวนการหล่อขึ้นรูป โดยเฉพาะที่ปริมาณส่วนผสมของทองแดง (Cu) ที่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การเกิดคุณภาพผิวงานในลักษณะต่างๆ ทั้งภายนอกสภาพหล่อขึ้นรูปและภายในสภาพหลังทำการขัดเงาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับให้มีคุณภาพต่อไป

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

17.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในรูปแบบขององค์ความรู้สำหรับการ เผยแพร่ในวารสารและการนำไปใช้ประโยชน์ ประกอบด้วย

1. ได้ทราบข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือ เงิน ทองแดง สังกะสี และพาเลเดียม ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะทองขาว 6k

2. สามารถผลิตเม็ดโลหะทองขาว 6k

3. ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปสู่การพัฒนาในอุตสาหกรรมและเครื่องประดับ ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ที่รัฐบาลประกาศสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

4. สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัย ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

17.2 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ทั้งภาครัฐ และภาคเอกชน (ในด้านกระบวนการผลิตและเชิงพาณิชย์)

1. กลุ่มผู้ประกอบการภาคการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ชมรมช่างเครื่องประดับไทย สมาคมผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับแห่งประเทศไทย สมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับไทย
2. สถาบันการศึกษาและหน่วยงานของรัฐที่ดำเนินการจัดการเรียนการสอนทางด้านอัญมณีและเครื่องประดับ และส่งเสริมการประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา กาญจนาภิเษกวิทยาลัยช่างทองหลวง สถาบันการศึกษาในสังกัดสำนักงานการอาชีวศึกษา ส่วนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักพัฒนา

อุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ

3. กลุ่มผู้ประกอบการภาคการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับโดยเฉพาะผู้ใช้ประโยชน์ที่ชัดเจนทั้ง 2 บริษัท คือ

➢ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ทองเล้งหงษ์ เป็นผู้จำหน่ายทองรูปพรรณมากว่า 30 ปี และมีความชำนาญในการผลิตขึ้นตัวเรือนเครื่องประดับ และประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ ทองคำ ทุกประเภท ซึ่งผลที่คาดว่าบริษัทจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้คือ

- สามารถเพิ่มขีดความสามารถ ในด้านการผลิตสินค้า ให้หลากหลาย ตามความต้องการของลูกค้า และเพิ่มช่องทางการจำหน่าย สินค้าในปัจจุบัน ในกลุ่มสินค้าที่เป็นแฟชั่นมากขึ้น
- สามารถ เพิ่มมูลค้าของสินค้า ได้มากขึ้น
- สามารถเพิ่มคุณภาพของสินค้าให้ได้คุณภาพตามความต้องการของตลาด
- สามารถแข่งขัน กับคู่แข่ง ทั้งในและต่างประเทศได้
- สามารถลดระยะเวลาและขั้นตอน ในการประกอบชิ้นงานในกระบวนการผลิต ได้
- สามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนได้
- สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนซึ่งมีมูลค่าถูกกว่าโลหะทองคำ และมีคุณภาพสูงกว่าโลหะเงิน
- ได้ผลกำไรมากขึ้น

➢ ห้างหุ้นส่วนจำกัด คลาสซี่ จิวเวลรี่ เป็นบริษัทที่ดำเนินการผลิต สินค้าตาม ใบสั่งซื้อ และผลิตสินค้าตามความต้องการของลูกค้า มีความชำนาญในด้านการผลิตเครื่องประดับทุกประเภท ผลที่บริษัทคาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้คือ

- การผลิตที่ปรับปรุงประสิทธิภาพให้ได้มาตรฐานการส่งออก โดยวัดจากออเดอร์การสั่งซื้อจากลูกค้าต่างประเทศที่เข้ามาอย่างต่อเนื่องและเพิ่มจำนวนลูกค้าใหม่ ในแต่ละ Collection
- สามารถเพื่อขีดความสามารถ ในด้านการผลิต ได้ทุกรูปแบบ ตามคำสั่งซื้อ ของลูกค้า
- ลดความเสียหายในการผลิต ได้มากขึ้น
- ใช้เวลาในการผลิตน้อยลง
- ผลิตได้ปริมาณมากขึ้น
- ใช้เวลาในการประกอบตัวเรือนน้อยลง
- สามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนได้
- สามารถสร้างความมั่นใจให้กับผู้สั่งซื้อ และสั่งผลิตได้
- สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนซึ่งมีมูลค่าถูกกว่าโลหะทองคำ และมีคุณภาพสูงกว่าโลหะเงิน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับประเทศไทยนั้นใช้มาตรฐานความบริสุทธิ์ของทองคำที่ 96.5 เปอร์เซ็นต์ หากจะเทียบเป็นกะรัตแล้ว จะได้ประมาณ 23.16k ซึ่งจะได้สีทองที่เหลืองเข้ม และมีความแข็งของเนื้อทองพอเหมาะสำหรับการนำมาทำเครื่องประดับประเภทที่ไม่ฝังอัญมณีที่มักเรียกว่างานทอง หรือ งานร้านทอง นั่นเอง หรือ ถ้าหากจะฝังบ้าง ก็ฝังเพียงไม่กี่เม็ดและฝังแบบที่ล็อคอัญมณีแน่นหนาเท่านั้น ส่วนเครื่องประดับประเภทงานร้านเพชร หรือ งานจิวเวลลี่ มักนิยมความบริสุทธิ์ของทองคำอยู่ที่ 18k 14k 10k 9k และ 8k เพราะจะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อทองไม่มากนัก จึงทำให้เครื่องประดับมีความแข็งเพียงพอที่จะยึดเกาะอัญมณีเม็ดเล็กๆ ได้นั่นเอง ส่วนการใช้ทอง 24k หรือ ทอง 99.99% ในการทำเครื่องประดับนั้น ไม่นิยมนำมาทำเครื่องประดับมากนัก เนื่องจากทองคำบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ มีความอ่อนตัวมาก จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ จำเป็นต้องผสมโลหะอื่นๆ ลงไปเพื่อปรับสมบัติทางกายภาพของทองคำให้แข็งขึ้น คงทนต่อการสึกหรอ โลหะที่นิยมนำมาผสมกับทองคำได้แก่ เงิน ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งอัตราส่วนจะสัมพันธ์ตามความต้องการของผู้ใช้งาน กล่าวคือ ผู้ผลิตทอง รูปพรรณแต่ละรายจะมีสูตรของตนเอง ในการผสมโลหะอื่นเข้ากับทอง บางรายอาจผสมทองแดงเป็นสัดส่วนที่มากหน่อยเพราะต้องการให้สีของทองออกมามีสี อมแดง หรือบางรายอาจชอบให้ทองของตนสีออกเหลืองขาวก็ผสมเงินในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ซึ่งทั้งหมดนั้นจะได้ความบริสุทธิ์ของทอง 96.5 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน

2.1 ทฤษฎีทองคำ

ทฤษฎีข้อมูลทางวิชาการพื้นฐานเกี่ยวข้องกับทองคำ ที่สำคัญประกอบด้วย ความบริสุทธิ์ของทองคำ หรือทองคำบริสุทธิ์สมบัติของทองคำ มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ทองคำ ชนิดและมาตรฐานทองกะรัต ซึ่งรายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

2.1.1 ทองคำบริสุทธิ์ (Pure Gold)

ทองคำที่เรียกว่า ทองคำบริสุทธิ์จะต้องมีปริมาณทองคำอย่างน้อยตั้งแต่ 99.99% ขึ้นไป แต่ในทางการค้า โลหะที่มีปริมาณทองคำ 99.99% เรียกว่า“ทองคำที่พิสูจน์แล้ว (Pure Gold)” ซึ่งตลาดค้าทองคำในเมืองไทยนิยมเรียกว่าทอง 100% สำหรับในส่วนของทองคำรูปพรรณนั้นเป็นทองคำเจือที่มีความบริสุทธิ์ (Fineness) ของเนื้อทองคำในปริมาณต่างกันตามชนิดที่เป็นที่ต้องการของตลาด เช่น ทองคำรูปพรรณ 96.5% ทองคำกะรัต 18k, 14k, 10k, 9k เป็นต้น

2.1.2 สมบัติของทองคำ

สมบัติของทองคำที่สำคัญประกอบด้วย

1) สมบัติทางกายภาพ ทองคำเป็นโลหะสีเหลืองมันวาว เป็นตัวคำนวนความร้อนและไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับต้น 3 รองจากเงินและทองแดง สามารถสะท้อนรังสีอินฟาเรดได้ถึง 97% จึงมักมีการนำเอาทองคำมาเป็นวัสดุป้องกันรังสี ซึ่งสมบัติทางกายภาพของทองคำบริสุทธิ์ที่สำคัญๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของทองคำ [3]

เลขอะตอม	79
มวลอะตอม	196.9655
โครงสร้างสี	FCC
สี	เหลือง
ความถ่วงจำเพราะ	19320
ความถ่วงจำเพราะ 20°c (kg/m3)	19320
จุดหลอมเหลว (°c)	1064.4
จุดเดือด (°c)	2940
ความร้อนจำเพราะที่ 1 c (j/g c)	0.1323
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (20-100°c)/ °c	14.4x10-6
ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (j/g)	66.2
ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (j/g)	1738
การนำไฟฟ้า	80%IAXS (ทองแดง 100%)
ความต้านทานจำเพราะ (μΩmm)	22
สัมประสิทธิ์การต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (/°c)	0.0034
ค่าศักดิ์ไฟฟ้า (Electrode Potential)(v)	+1.498

หมายเหตุ IACS = Intemation Annealed Copper Standard

2) สมบัติทางกล ทองคำเป็นโลหะที่มีความเหนี่ยวนำสูงสามารถดึงเป็นเส้นหรือตีเป็นแผ่นได้ขนาดบางที่สุดถึง 1/5,000,000 นิ้ว สามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการมีการรับภาระทางกลไม่สูงมากนัก เช่น ใช้ในงานทันตกรรมทำเป็นฟันปลอม หรือใช้ในงานอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับทำเป็น สร้อยแหวน กำไล ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ทองคำบริสุทธิ์นั้น มีความอ่อนสูง เมื่อนำมาทำเป็นรูปพรรณและไม่สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้ จึงส่งผลให้ทองคำเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ให้ดีขึ้นและกลายเป็นทองคำเจือชนิดต่างๆที่สำคัญสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านแรงดึงและความแข็งที่สภาพต่างๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป [1]

Condition	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	%Elongation (in 50 mm.)	Hardess (HB)	Modulus of Elasticity (GPa)
As Cast	125	-	30	33	74.5
Wrought,annealed	130	-	45	25	79.9

60% Reduction	220	205	4	58	79.3

3) สมบัติด้านการผลิต สมบัติด้านการผลิตที่สำคัญของทองประกอบด้วย

ก. ความสามารถในการขึ้นรูป (Forbility) ทองคำเหมาะสำหรับการขึ้นรูปทางกลทุกรูปแบบ เช่น การตีขึ้นรูป การรีดเป็นแผ่นและการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ข. ความสามารถทางด้านการเชื่อมประสาน (Weld Ability) การบัดกรีด้วยหัวทอร์ชใช้กับโลหะประสานที่มีธาตุเงินผสมไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้ได้กับเปลวไฟทุกชนิด กรณีการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะซีทิลีน (Oxy-Acetylene) ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้กับเปลวไฟทุกชนิดนอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistamce Welding) ได้

ค. อุณหภูมิการอบอ่อนที่ 300℃

ง. อุณหภูมิการขึ้นรูปร้อนต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

จ. อุณหภูมิเทหล่อที่ 1100 ถึง 1300℃

2.1.3 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ

1) ค่าความบริสุทธิ์ (Fineness) หมายถึง ปริมาณของเนื้อทองคำที่มีอยู่ในทองรูปพรรณหรือทองคำเจือ จะเทียบต่อ 1000 ส่วน หรืออาจใช้หน่อยวัดความบริสุทธิ์ที่เป็นระบบที่ใช้บอกปริมาณตามมาตรฐานที่เรียกว่า“กะรัต (Karit,K)” ซึ่งการวัดความบริสุทธิ์ทั้งสองแบบเป็นการเปรียบเทียบปริมาณทองคำที่มีในทองคำเจือหรือทองคำรูปพรรณ โดยการวัดความบริสุทธิ์มีสูตรสำหรับการหาค่าความบริสุทธิ์ คือ

Fineness xxx=xxx Fine=xxx% Au by Weight $= \frac{\mathbf{xxx}}{\mathbf{1000}}$x100%

โดยที่ค่า xxx คือ ปริมาณร้อยละของทองเปรียบเทียบกับ 1000 ส่วน

2) กะรัต หมายถึง หน่วยการวัดค่าความบริสุทธิ์ของทองคำเจือ โดยการเปรียบเทียบให้ทองคำบริสุทธิ์ (99.996% ขึ้นไป) มีค่าเท่ากับ 24 กะรัต ปริมาณทองคำที่ลดต่ำลงมาก็จะมีการคำนวณกะรัตให้ลดลงมา ตัวอย่างทองคำกะรัต เช่นทองคำ 18 กะรัต หรือทองคำ 18k คือทองคำเจือที่มีปริมาณทองคำเจือที่ปริมาณทองคำบริสุทธิ์ 75% และมีโลหะอื่นๆ ผสม 25% สำหรับในกรณี ทองคำ 14 กะรัต หรือทองคำ 14k คือทองคำเจือที่มีปริมาณทองคำบริสุทธิ์ 58.33% และมีโลหะอื่นๆ ผสม 41.67% เป็นต้น

3) Hall-Markink หมายถึง หน่วยวัดที่ใช้แสดงปริมาณทองคำแสดงเป็นตัวเลขทศนิยม โดยกำหนดให้ทองคำบริสุทธิ์ 100% มีค่าเท่ากับ 1.000 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Fineness 1000

4) บาท หมายถึง หน่วยวัดตวงน้ำหนักทองคำในประเทศไทย โดยทองคำหนัก 1 บาท มีค่าเท่ากับ 15.244 กรัม

2.1.4 มาตรฐานและชนิดของทองคำกะรัต

ทองคำกะรัตเป็นทองคำที่ได้รับความนิยมสูงกว่าทองคำบริสุทธิ์เนื่องจากความแข็งแรงทนทานสูงกว่า นอกจากนี้ยังสามารถเลียนแบบของทองคำบริสุทธิ์ได้ด้วยการแปรเปลี่ยนปริมาณส่วนผสมต่าง จึงทำให้ทองคำกะรัตเข้ามามีบทบาทแทนที่ทองคำบริสุทธิ์ในเครื่องประดับ และกำหนดปริมาณส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในทองคำกะรัตยังไม่มีมาตฐานกำหนดที่แน่นอนตายตัว แต่จะกำหนดที่ปริมาณทองคำบริสุทธิ์เป็นหลัก ซึ่งค่าความบริสุทธิ์ของทองคำกะรัตสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิดหลักๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในทองคำกะรัตต่างๆ [3]

ปริมาณทองคำในเนื้อโลหะ	ปริมาณเนื้อทองคำ (% โดยน้ำหนัก)	ความบริสุทธิ์ Fineness	หน่วยวัดกะรัต (k)
990/1000	99.0%	990	24
954/1000	95.4%	954	23
916/1000	91.6%	916	22
750/1000	75.0%	750	18
858/1000	58.3%	858	14
357/1000	35.7%	357	9
333/1000	33.3%	333	8

2.2 โลหะวิทยาของทองคำเจือหรือทองคำกะรัต

การศึกษาทางด้านโลหะวิทยาของทองคำเจือ หรือทองคำกะรัต ศึกษาวิเคราะห์จากพื้นฐานแผนภาพสมดุลเฟสของโลหะผสมระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง และโลหะผสมระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของธาตุเจือหลัก (Major Alloying Element) ซึ่งประกอบด้วย เงิน ทองแดงและ สังกะสี ทางด้านโลหะวิทยาที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับของทองคำเจือ ซึ่งการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือรอง (Major Alloying Element) ต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหะวิทยาและผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับสีของทองคำที่ผสมธาตุเจือหลัก ดังนั้นในการศึกษาพื้นทางด้านโลหะวิทยาจึงมีการกล่าวอ้างถึงเฉพาะอิทธิพลของธาตุเจือหลัก เงิน ทองแดง และสังกะสี เท่านั้น ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อย่อยต่อไป

2.2.1 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง

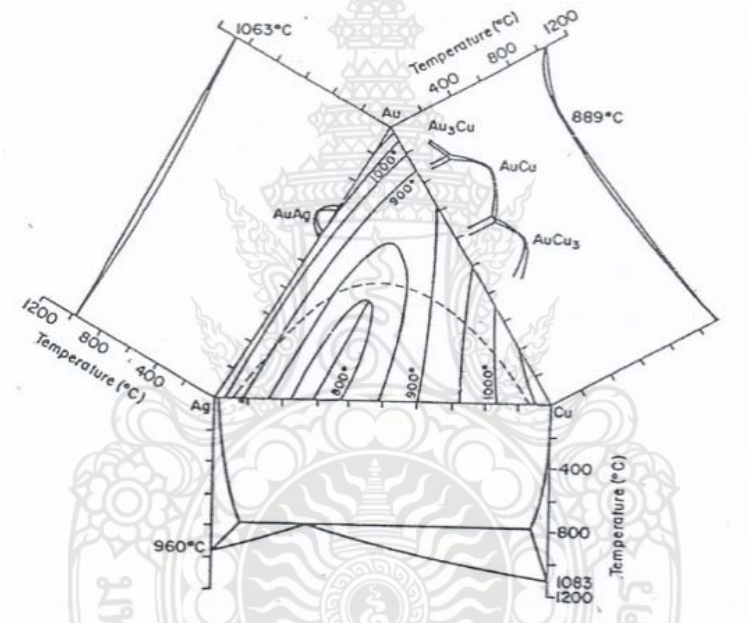
จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติของโลหะผสมระบบ ทอง-เงิน-ทองแดง ทางด้านโลหะวิทยาโดย PearsonW.S. ทำให้ทราบถึงขอบเขตการละลายของแต่ละธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพสมดุลเฟสในระบบ 3 ธาตุได้ดังรูปที่ 2.1 รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะทองคำเจือในระบบ 2 ธาตุระหว่างทองคำ-เงิน บริเวณที่เป็นเฟสของแข็งเฟสเดียวเกิดขึ้นใต้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงถึงอุณหภูมิประมาณ

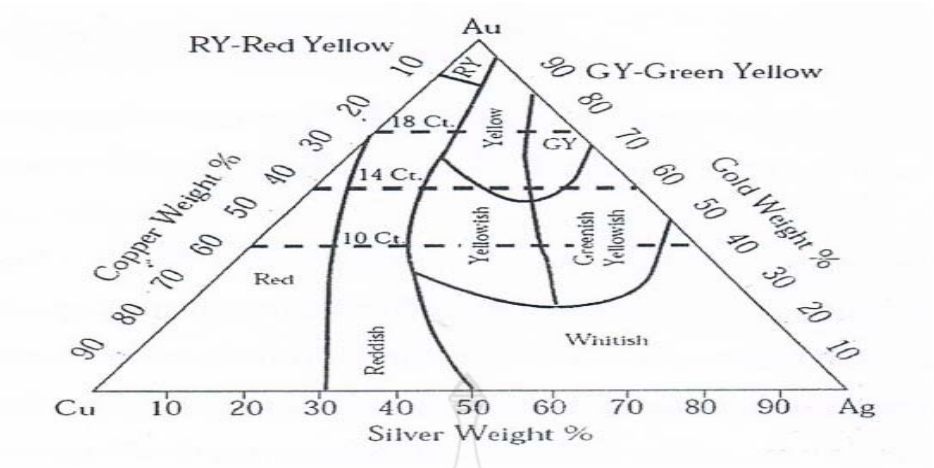
200˚C ในช่วงส่วนส่วนผสมที่มีธาตุเงินระหว่าง 30 ถึง 40 wt% หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ 200˚C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่สอง คือ AuAg เนื่องจากขอบเขตการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

ในระบบของทองคำ-ทองแดง แสดงบริเวณของเฟสเดียวที่เกิดขึ้นใต้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400˚C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงกว่า 200˚C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่ 2 ในช่วงผสมที่แตกต่างกัน เป็น AuCu 3 , AuCu และ Au 3Cu ซึ่งมีส่วนที่สำคัญที่ทำให้ทองคำเจือมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น

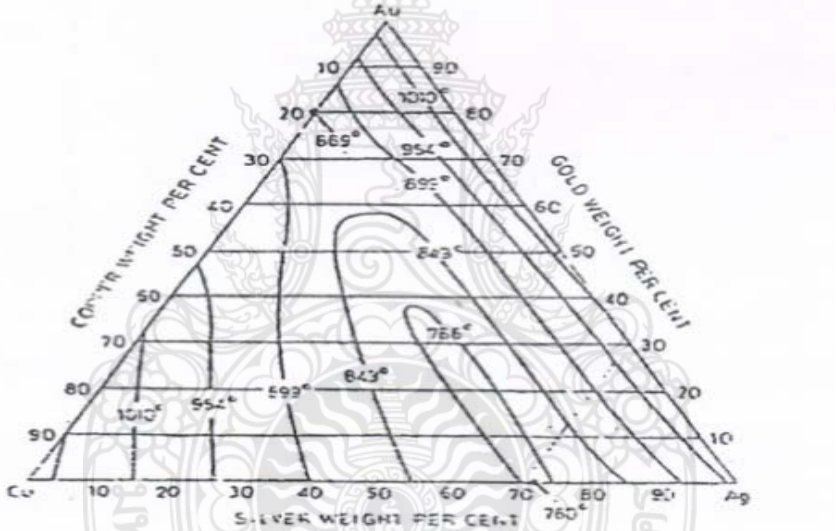
ในระบบของเงิน-ทองแดง แสดงปฏิกิริยายูเทคติคที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงโดยมีอุณหภูมิยูเคติด ที่ 799˚C ในช่วงที่มีทองแดงผสมอยู่ 8.8



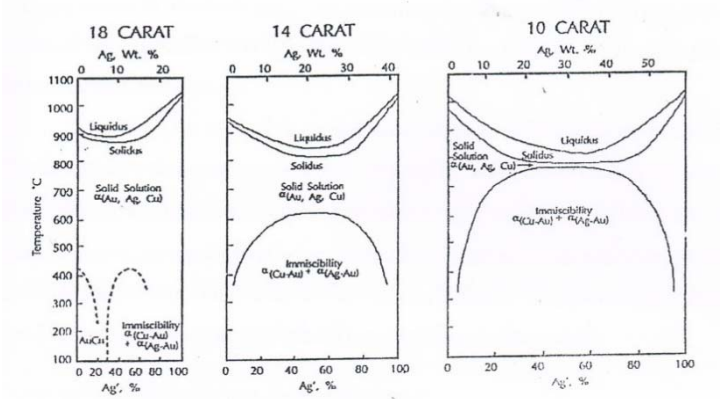
รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน–ทองแดง [1]



รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนภาพสมดุลเฟสทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ–เงิน-ทองแดง [1]



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเจือ [4]



รูปที่ 2.4 ภาคตัดในแนวดิ่งที่ 18 14 และ 10 กะรัต บนแผนภาพสมดุล ทองคำ-เงิน-ทองแดง [3]

จากรูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนผสมทางเคมีของทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ (Ternary Phase Diagran) ทองคำ-เงิน- ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเจือ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆกันในตำแหน่ง 18 14 และ 10 กะรัตตามลำดับ

จากภาคตัดดังกล่าวทำให้ได้ภาพตัดแนวดิ่งเสมือน 2 ธาตุ (Quasi-Binary Vertical Section) ขึ้นมา รูปที่ 2.4 แต่อย่างไรก็ตาม แทนที่จะเขียนแผนภาพจากค่าประมาณเงินหรือทองแดง เพื่อบอกปริมาณส่วนผสมทางเคมีในภาคตัดดังกล่าวแต่เพียงอย่างเดียวอาจจะไม่สะดวกเท่าไดนัก ในการเปรียบเทียบทองคำเจือที่กะรัตไม่เท่ากัน ดังนั้น Pearson W.S. จึงได้คิดค่าความเข้มข้นของธาตุเจือเงิน-ทองแดงในรูปของการแปรผันตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนค่าความเข้มข้นของธาตุเงินในรูปแบบแผนตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนที่ค่าความเข้มข้นของธาตุด้วยสัญลักษณ์ Ag’ ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$Ag' = \frac{Ag(wt\%)}{\mathbf{Ag(wt\%)+Cu(wt\%)}} \times 100\%$$

จากสูตรแสดงว่าระบบทองคำเจือ ทองคำ-เงิน-ทองแดง และทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี สามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ ด้วยตัวแปลเพียง 2 ตัว จำนวนกะรัต (%Au) และค่า Ag ของทองคำเจือสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

ก. ชนิดที่ 1 ค่า Ag ในช่วง 0-10% และจากช่วง 90-100% ดังแสดงในภาพที่ 4 ส่วนผสมช่วงนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวจะเกิดเป็นเฟสในรูปแบบสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Homogenous Solid Solution) ซึ่งมีสมบัติทางกลอ่อน เมื่อผ่านการอบอ่อนไม่สามารถทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้

ข. ชนิดที่ 2 ค่า Ag ในช่วง 10-25% หรือช่วง 75-90% ทองคำเจือกลุ่มนี้ จะเป็นสารละลายของเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวมาจนถึงช่วงที่เรียกว่า ช่วงการเกิดความไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ (Immiscibility Gap) แต่ถ้าปล่อยให้ทองคำเจือเย็นตังลงมาอย่างช้า จนกระทั้งถึงอุณหภูมิห้อง เฟสที่ได้ คือ เฟสอัลฟา (α= Cu-Au) ตกตะกอนในทองคำเจือที่มีทองแดงสูง (Capper Rich Alloys) และจะได้ เฟสอัลฟ้า 2$(a2: Ag - Au)^n$ ตกตะกอนอยู่ในทองคำเจือเงินสูง (Silver-Rich Alloy) ทองคำเจือชนิดนี้จะมีความอ่อนปานกลางในสภาพที่ผ่านการอบอ่อน แต่สามารถปรับเพิ่มความแข็งได้โดยวิธีการบ่มเพิ่มความแข็ง

ค. ชนิดที่ 3 ค่า Ag’ ในช่วงที่ 25-75% ทองคำเจือชนิดนี้จะมีช่วงที่เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าตัวจุดหลอมเหลวและสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดช่วงไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้แต่ถ้าให้เย็นตัวแบบสมดุลลงมาถึงอุณหภูมิห้อง เฟสของแข็งเนื้อเดียวนี้สารละลายตัวไปเป็นเฟส α Cu-Au

)และเฟส $(a2: Ag - Au)^n$ ทองคำเจือชนิดนี้จะเพิ่มความแข็งสูงในสภาพอบอ่อน ดังนั้นการอบอ่อนจึงลดความแข็งจากนี้ยังสามารถทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้โดยกรรมวิธีการบ่มเพิ่มความแข็ง

2.2.2 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง-สังกะสี

ความสัมพันธ์ระหว่างสีและส่วนของทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ช่วงที่เป็นสีเหลืองจะเกิดใกล้มุมของทองคำ สีขาวเงินจะเกิดขึ้นมุมของเงินและสีแดงจะเกิดที่มุมของทองแดง สีแดงเป็นสีที่เด่นกว่าสีอื่น เพราะจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของคำเจือ ดังจะเห็นได้ว่าทองคำเจือไม่มีสีแดงเฉพาะตรงมุมของทองแดงเท่านั้น แต่ยังแผ่ไปถึงบริเวณมุมของทองคำด้วยการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงบริเวณที่มีสีแดงหรือสีอมแดงให้กลายเป็นสีอมเหลืองสามารถทำได้โดยการเติมสังกะสีลงไป โดยทั่วไปในการทางปฏิบัติ การเติมสังกะสีเข้าไปอาจเติมไปได้จนถึง 15 wt% ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดปริมาณของช่วงการเกิดความไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้มนแผนภาพสมดุลเฟส 3 ธาตุ โดยการลดความกว้างของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดช่วงดังกล่าวและลดความสูงของช่วงการเกิดไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ให้เคลื่อนลงมาเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงในทองคำเจอกะรัตต่างๆ ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้น การเติมสังกะสีจะสงผลทำให้แนวโน้มของทำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี มีความแข็งน้อยกว่าทองคำเจือระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง ทั้งในสภาวะที่ผ่านการอบอ่อนและในสภาวะอบเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitate Hardening)

2.3 อิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของทองคำ

ธาตุเจือที่นำมาผสมเข้าไปในโลหะทองคำเจือ และมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของทองคำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม หลักๆ คือ กลุ่มธาตุเจือหลัก (Major Alloying Element) และธาตุเจือรอง (Minor Alloying Element) ซึ่งธาตุเจือในกลุ่มต่างๆ มีผลต่อสมบัติของทองคำต่างกัน ดังจะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

2.3.1 ธาตุเจือหลัก (Major Alloying Element)

ธาตุเจือหลักที่นิยมนำมาใช้ผสมกับทองคำเจือมี 2 ธาตุ คือ เงิน และทองแดง โดยพื้นฐานของธาตุทั้งสองมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติพื้นฐานของเงินและทองแดง [1]

สมบัติ	เงิน	ทองแดง
เลขอะตอม	47	29
มวลอะตอม	107.8652	63.546
โครงสร้างผลึก ที่ 20 °C	FCC	FCC
สี	ขาว	แดง
จุดหลอมเหลว (°C)	960	1083
จุดเดือด (°C)	2195	2600
ความถ่วงจำเพาะ(kg/m^3)	10500	8960
รัศมีอะตอม	0.144	0.128
ความจุความร้อนจำเพาะ ที่ 0°C (cal/g°C)	0.0599	0.092
ความร้อนในการหลอมละลาย ที่ 200°C (cal/g°C)	25	50.6
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (μ in)/in °C	19.68 (0-100°C)	16.5
ความต้านทานไฟฟ้า(μΩcm) ที่ 20 °C	1.59	1.673
ความแข็ง (HB)	30	37
ความต้านแรงดึง (10^6 psi)	11	16
โมดูลัสของยัง (E : GPa)	82.7	129.8
บัลค์โมดูลัส (K : GPa)	103.6	137.8
โมดูลัสเฉือน (G : GPa)	30.3	48.3
อัตราส่วนของพัวซองส์ (γ)	0.367	0.434
ความหนืด (γ .cp)	3.9	3.36

การผสมธาตุเจือหลักเข้าไปในทองคำเจือจะผสมลงไปในปริมาณมาก ส่งผลให้สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคของทองคำเจือเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการผสมและนอกจากนี้ยังทำให้สีของทองคำเจือเปลี่ยนเป็นสีต่างๆ ได้หลายสี มีตั้งแต่สีขาว สีเหลือง สีชมพูและสีแดง ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ โดยปกติโลหะทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง สีของโลหะผสมระบบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของเงิน และทองแดง ดังในรูปที่ 4 ดังที่กล่าวไว้มาแล้ว นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับสี และสมบัติของทองคำเจือดังแสดงในตารางที่ 2.5

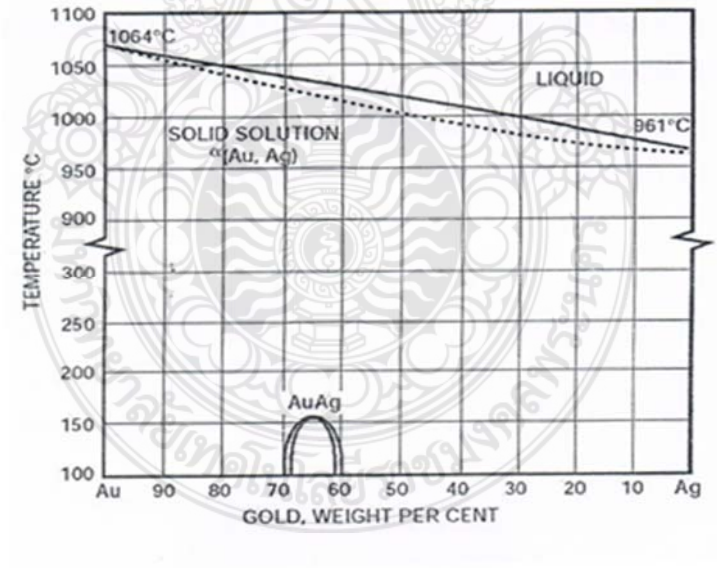
ตารางที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุเจือ สีและสมบัติที่เกิดขึ้นของทองคำ

ชนิดของธาตุ	สีที่เปลี่ยนแปลงไป (ในกรณีมีธาตุเจือสูง)	บทบาทต่อสมบัติของทองคำเจือต่ำ
ทองแดง	สีแดงหรือสีชมพู	ตัวเพิ่มความแข็ง
เงิน	ขาว	ตัวเพิ่มความแข็ง(ทองแดง) และเพิ่มความต้านการกัดกร่อน
สังกะสี	ขาว	ลดการเกิดออกซิเดชั่น
นิเกิล	ขาว	เพิ่มความแข็งอย่างมาก แต่ทำให้สีของทองคำเป็นสีขาวเร็ว

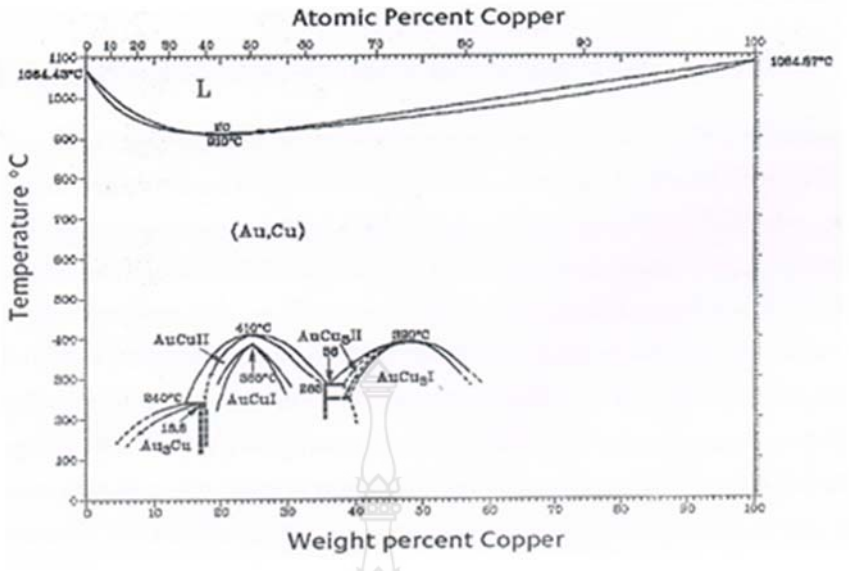
แพลลาเดียม	ขาว	เพิ่มความแข็งไม่มากเมื่อเทียบกับนิกเกิลแต่ทำให้สีเป็นสีทองคำเป็นสีขาวเร็ว

ก. อิทธิพลของเงินต่อทองคำเจือ เงินเป็นโลหะที่ช่วยเพิ่มความแข็งเมื่อผสมลงไปในทองคำเจือแต่มีผลน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทองแดง ลักษณะการละลายระหว่างทองคำกับเงิน เป็นดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นแผนภาพสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน ภายใต้เส้นแข็งตัวสมบูรณ์ (Solidus Line) ทองคำและเงินสามารถละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ในลักษณะสารละลายของแข็งแบบแทนที่อัลฟ่า หรือเรียกว่า “สารละลายของแข็งแบบสมบูรณ์ (Complete Series of Solid Solution)” ทองคำเจือเงินที่มีปริมาณทองคำ 60-70% เย็นตัวลงต่ำกว่า 160°C จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ขึ้นมา คือ AuAg ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และนอกจากนี้เงินยังมีผลทำให้สีของทองคำอ่อนลงเมื่อปริมาณของเงินเพิ่มมากขึ้น

ข. อิทธิพลของทองแดงต่อทองเจือ ทองแดงเจือสามารถเพิ่มความแข็งให้กับทองคำเจือโดยวิธี Oeder Hardening หรือ Precipitate Hardening จากแผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-ทองแดงดังภาพ-ทองแดงดังภาพที่ 2.6 สารละลายของแข็งที่สมบูรณ์ สามารถพบดั่งอุณหภูมิสูงกว่า 410°C ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่า กว่า 410°C จะเกิดเฟส AuCuII ขึ้น ซึ่งเป็นเฟสที่มีปริมาณทองแดง 50 at% เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 385°C เฟส AuCuII ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนเป็นเฟส AuCuII นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 390°C จะเกิดเฟส AuCuII ที่มีปริมาณทองแดง 75 at% ดังแสดงในรูปที่ 2.5

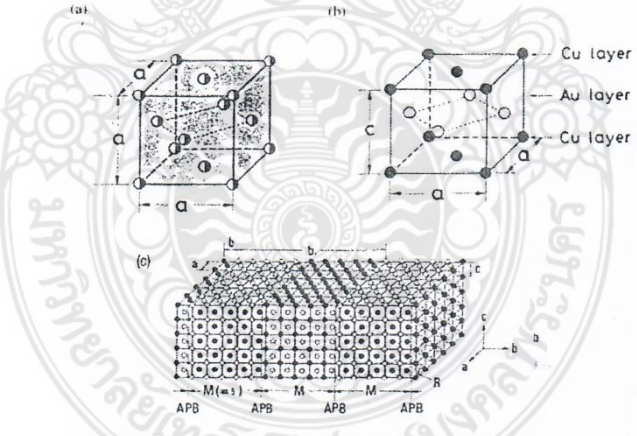


รูปที่ 2.5 แผนแสดงสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน [5]



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-ทองแดง [5]

เมื่อพิจารณาทองคำเจือ 18 กะรัต ซึ่งมีทองคำ 75% หรือ 50at% และทองแดง 25 wt% หรือ 50 at% หมายความว่ามีการจับคู่กันระหว่างทองคำกับทองแดงที่อุณหภูมิสูงกว่า 410°C อะตอมของทองคำและทองแดงในหน่วยเซลจะมีการเรียงตัวที่ไร้ระเบียบในโครงสร้างผลึกแบบ Face-Cubic (FCC) ซึ่งเรียกว่า สารละลายของแข็งที่เรียงตัวไร้ระเลียบ (Disordered Solid Solution) และเมื่อ



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างระเบียบโครงสร้างมีระเบียบ [5]

เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิ 410°C อะตอมในสารละลายของแข็งเกิดการเรียงตัวใหม่ใส่โครงสร้างผลึก Face Center Cubic กระบวนการแผร่ทำให้เกิดการจัดเรียงตำแหน่งอะตอมใหม่ดังรูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงจากแบบไร้สาร Disordered เป็นแบบที่มีระเบียบ โครงสร้างใหม่นี้เรียกว่า สารละลายของแข็งที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Disordered Solid Solution) หรือ ซูเปอร์แลททิซ (Super Lattice)

เนื่องจากความแตกต่างของขนาดอะตอมทองคำและทองแดงทำให้โครงสร้าง Face-Center Cubic ของสารละลายของแข็งที่ไร้ระเบียบเกิดการบิดตัว (Distorted) ในทิศทางที่ทำให้เกิดโครงสร้าง

ผลึกแบบFace-CenterCubic Face-CenterCubic การบิดตัวขอลแลททิซทำให้ดิสโลเคชั่นเคลื่อนที่ที่ลำบาก ส่งผลให้ทองคำเจือเกิดการเปลี่ยนรูปได้ลำบากเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้สารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจึงมีความแข็งกว่า แข็งแรงกว่า และมีความเหนี่ยวน้อยกว่าสารละลายของแข็งแบบไร้ระเบียบ การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจะเกิดที่การเย็นตัวอย่างช้า จากอุณหภูมิอบอ่อน สามารถทำการอบชุบที่ 410°C แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 150-300°C ทำให้เกิดปฏิริยาการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Oedered Reaction การจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบมีอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมทองคำ : ทองแดงอย่างง่ายๆ คือ 1:1 1:3 และ 3:1 โดยเรียกชื่อเฟสเป็นปริมาณทองคำ 50.8 wt% เป็นทองคำที่อยู่ในช่วง 9 และ 14 กะรัต ส่วนทองคำเฟสเป็นทองคำเจือที่มีส่วนผสมทองคำ 83 wt% อย่างไรก็ตามเฟสทั้งสองนี้ไม่ได้เพิ่มความแข็งเนื่องจากการเป็นสารละลายของแข็งที่เป็นระเบียบมากหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ AuCu เนื่องจากเฟส AuCu เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยมีความแตกต่างของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ AuCul ที่มีโครงสร้างเป็น Face-Center Tetrafonal ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 385°C และ AuCul เป็นโครงสร้างออร์โทรอมบิค Orthorhombic ที่อุณหภูมิ 385°C - 410°C

ในกรณีของทองคำเจือ 18 กะรัตที่พิจารณาของทองแดงที่แตกต่างกันยังมีผลให้สมบัติทองกลและสีของเนื้อโลหะมีความต่างกัน โดยที่ความแข็งทองคำเจือจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ ผลของการลดก็มีส่วนเพิ่มความแข็งโดยกลไกของ Work Herdening ดังในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงตารางถึงผลของธาตุทองแดงในปริมาณต่างๆ ในโลหะทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง หลังจากผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด 15% 30% และ 60% [1]

สีของทองคำเจือ	ปริมาณทองแดง%	ความแข็งแบบบริเนลหลังจากผ่านการลดขนาดต่างกัน 15%	ความแข็งแบบบริเนลหลังจากผ่านการลดขนาดต่างกัน 30%	ความแข็งแบบบริเนลหลังจากผ่านการลดขนาดต่างกัน 60%
แดงเข้ม	2.50	143	178	202
แดงส้ม	21.40	156	177	205
เหลืองอมแดง	16.7	166	176	197
เหลือง	12.50	148	160	182
เหลืองอมเขียว	8.3	141	149	176
เขียวอมเหลือง	3.6	114	127	138
เขียวอมเหลืองจาง	0.0	69	78	93

ค. อิทธิพลของเงินและทองแดงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสและสมบัติทองกลทองคำเจือ ในระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมและปรากการณ์ที่เกิดขึ้นกับทองคำเจือระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษากับพฤติกรรมการอบเพิ่มความแข็งเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น AuCul และ AuCuLL ซึ่งเป็นเฟสที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Oedered Phase) โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical Microscope กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องผ่าน tem กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ยังมีการศึกษากันไม่มากนัก สำหรับในกรณีของการศึกษาอิทธิพลของเฟสที่เกิดขึ้นต่อสมบัติทางกลของทองคำเจือในระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง จากการศึกษาของ B.D.Razuvayeva และคณะ ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ (Atomic Oedering) และการลดลงของส่วนผสม (Decomposition) ในสารละลายของแข็ง (Silid Solution) เนื่องจากขอบเขตการละลายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ต่อสมบัติทางกลของทองคำเจือ 18 กะรัต ที่มีส่วนผสมของเงินและทองแดงต่างกันระหว่าง 5 : 21.3% และ 20 : 3.7% โดยน้ำหนักตามลำดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- โลหะผสมทองคำ-เงิน-ทองแดง 18 กะรัต มาสามารถเพิ่มความแข็งได้จากการปรับส่วนผสมเมื่อโลหะผสมอยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid Solution)

- สมบัติทางกล เช่น ค่าความแข็ง จะเปลี่ยนอะตอมในเนื้อโลหะผสมเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

- ช่วงเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นเบียบ Oedered จะลดลงเมื่อผสมเงินเพิ่มลงไป และใช้เวลาน้อยลงในการเกิด

- การเพิ่มเงินลงไปในส่วนผสมของโลหะผสมทองคำ-เงิน-ทองแดง จะช่วยขจัดการเกิดการแตกร้าวตามขอบเกรน เมื่อเกิดการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ

- ปรากกฎแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรน (Embitterment) สามารถลดลงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยทำให้เกิดการเรียงตัวอย่างไร้ระเบียบ (Disorderinf)

- ปรากฏการแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรนที่มีสาเหตุจากสารมลทิน เช่น ซิลิกอน และตะกั่ว ไม่สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน

2.3.2 ธาตุเจือรอง (Minor Alloying Element)

ธาตุเจือรองเป็นธาตุที่ผสมลงไปในทองคำเจือในปริมาณน้อย การผสมธาตุเจือรองสามารถผสมธาตุ ลงไปได้หลายชนิด แต่ปริมาณในการใช้ไม่ควรเกินกว่า 1wt% วัตถุประสงค์ของการเติมธาตุเจือรอง เพื่อต้องการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของทองเจือ โดยมีข้อที่ควรพิจารณาก่อนการเติมธาตุเจือรอง คือ ธาตุเจือรองแต่ละชนิดที่ผสมไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของทองคำเจือมากกว่า 1 อย่างและธาตุเจือผสมลงไปจะให้ผลดีและผลเสียในเวลาเดียวกัน ดังตัวอย่างของธาตุต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.7 และตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 หน้าที่ของธาตุเจือในลักษณะธาตุเจือรองที่เป็นตัวเติม และสารมลทินที่เติมลงในทองคำเจือ [1]

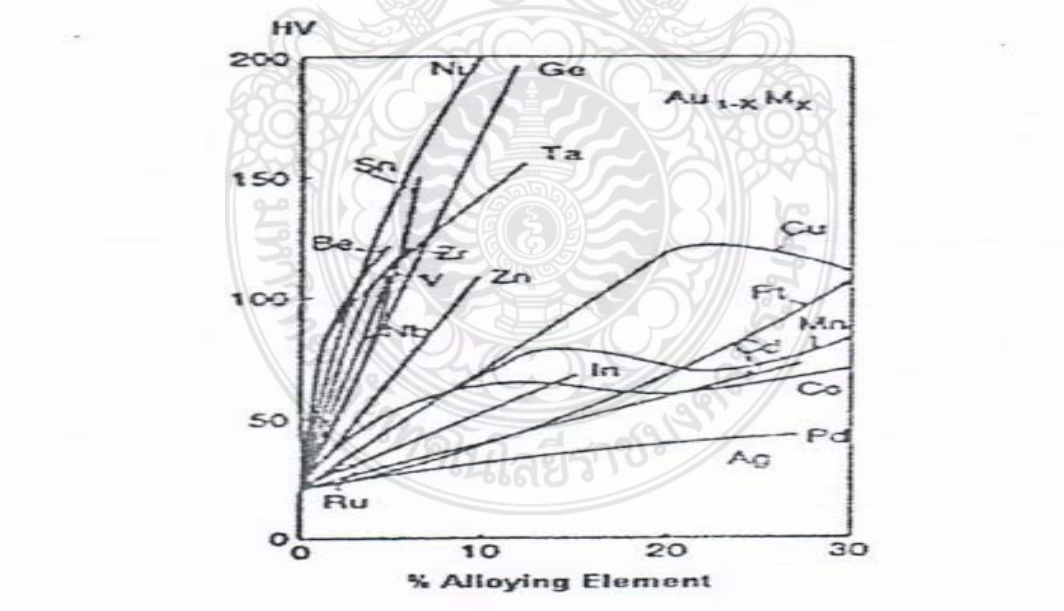
ธาตุ	ทำให้เกรนละเอียด	ทำให้เกรนหยาบ	ปรับปรุงสมบัติการหล่อ	ทำให้เปราะ	เพิ่มความแข็ง	ลดออกซิเจน
อิริเดียม	A	-	-	I	-	-
รูธิเนียม	A	-	-	-	-	-
ซิลิกอน	-	I	A	I	-	A
โคบอลต์	A	-	-	-	A	-
สังกะสี	-	-	A	-	-	A
ตะกั่ว	A-	-	-	I	-	-
แบเรียม	-	-	-	-	-	-
ไททาเนียม	A	-	-	-	A	-
แคลเซียม	-	-	-	-	A	-
แกลเลียม	A	-	-	I	A	-
บิสมัท	-	-	-	-	-	-
ไบรอน	A	I	-	-	-	A
ฟอสฟอรัส	-	-	A	-	-	-
ฟอสฟอรัส	-	-	-	I	-	A

หมายเหตุ A = ธาตุเจือรองที่ใช้ผสมลงในเนื้อทองคำ I = ธาตุรองในลักษณะที่เป็นสารมลทินในเนื้อทองคำ

ตางรางที่ 2.8 แสดงผลดีและผลเสียของธาตุเจือรองที่ผสมทองไปในทองคำเจือ [1]

ธาตุ	ผลดี	ผลเสีย
ซิลิกอน	ปรับปรุงการไหลโลหะหลอมเหลวลดการเกิดทองแดงออกไซด์ที่ผิวงาน	เกิดความเปราะเมื่อเติมมากเกินไป
เหล็ก	ใช้รวมกับธาตุแมงกานิส ทำให้ได้ทองสีทองใกล้กับการให้ธาตุนิกเกิล	0.3-0.5 wt% ทำให้เกรนโตและหยาบ 25.0% ทำให้ทองคำมีสีเทาดำ
โครเมียม	-	0.36-0.5% ทำให้เกรนโตและหยาบ
สังกะสี	>0.2wt% ลดการเกิดออกซิเดชั่นของทองแดง 1-2wt% ปรับปรุงผิวให้เงางาม เติมปริมาณเท่ากับเงินและทองแดงช่วยการแตกขณะที่ทำการรีด	-

ตะกั่ว	เพิ่มความแข็ง	เกินกว่า 0.01 wt% เกิดการแตกหั แบบเปราะ
โบรอน	ให้ผลเหมือนซิลิกอน ที่ปริมาณที่ใช้เท่ากัน	-
นิกเกิล	เพิ่มความแข็ง และสีของทองคำจะอ่อนลง ใช้ผสมทำทองคำขาว	สีจะอ่อนลงอย่างรวดเร็ว มีผลต่อผิวหนังทำให้เกิดอาการแพ้
ฟอสฟอรัส	ลดการเกิดออกซิเดชั่นดีที่สุด	ถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกร้านเมื่อได้รับความร้อน
โคบอลต์	>8.4 wt% ปรับขนาดเกรนเล็กลง	-
รูธิเนียม	0.001-0.1 wt% ปรับปรุงขนาดเกรนเล็กลง	-
แพลทินัม	เพิ่มความแข็งเมื่อทำการบ่มแข็ง และทำให้สีทองของทองคำลดลง	-
อิริเดียม	0.01-0.1 wt% ปรับขนาดเกรนเล็กลงในการ 0.01-0.2 หล่อหลอมและการอบอ่อน	-
ไททาเนียม	< 1 wt% เพิ่มความแข็งเมื่อทำการบ่มแข็ง ในทองคำบริสุทธิ์ 990	-
แคลเซียม	< wt% เพื่อความแข็งในทองคำ 99.9%	-



รูปที่ 2.8 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของทองคำ [6]

นอกจากธาตุเจือหลักและธาตุเจือรอง ดังที่ได้กล่าวข้างต้นและยังมีธาตุอื่นๆ ที่มีต่อสมบัติทางกลของทองคำอีกหลายชนิด ซึ่งมีผลทำให้ทองคำมีความแข็งแรงแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหารผสมดัง

กราฟที่แสดงในรูปที่ 2.8 และแสดงอิธิพลของธาตุเจือต่างชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันที่มีผลต่อค่าแข็งของทองคำเจือธาตุชนิดต่างๆ เมื่ออัตราการขึ้นรูปเปลี่ยงแปลง สำหรับในส่วนของอิทธิพลของธาตุเจือธาตุชนิดต่างๆ เมื่ออัตราการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลง สำหรับในส่วนของอิทธิพลของธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านแรงดึง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าความแข็ง HV 10 ของทองคำเจือธาตุเจือชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันและอัตรา การขึ้นรูปต่าง ๆ [7]

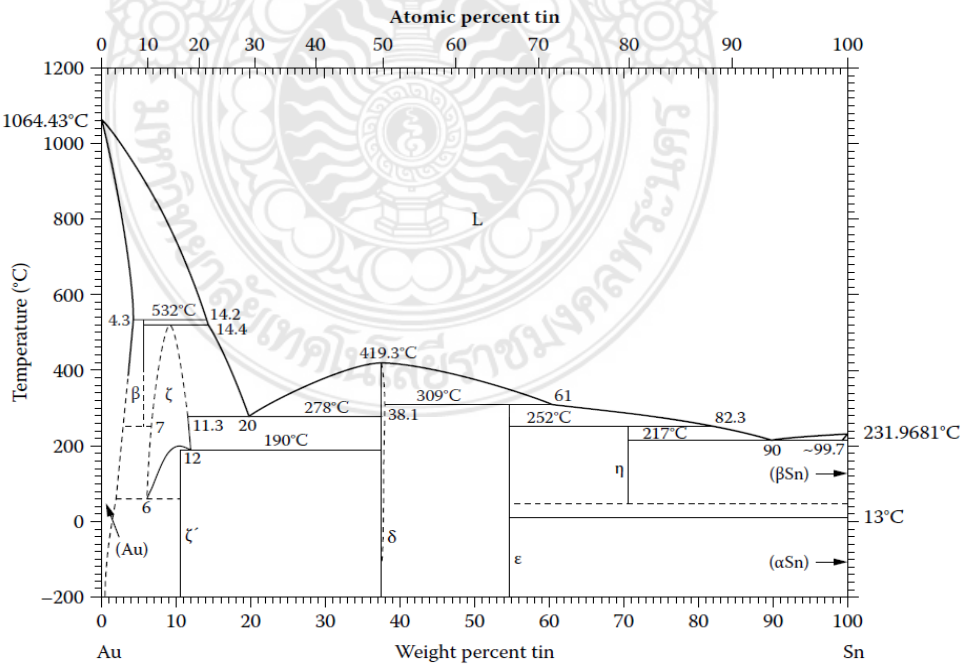
ชนิดธาตุเจือและปริมาณของการเจือ	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 0	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 40	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 80
Ag20	40	95	114
Ag30	42	93	115
Ag25Cu5	92	160	188
Ag20Cu10	120	190	240
Ag26Ni3	83	134	166
Ag25Pt5	58	106	130
Co5	92	126	154
Ni5	120	162	188
Pt10	78	102	118

ตารางที่ 2.10 ค่าความแข็งของทองคำเจือที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของธาตุเจือต่างๆ [7]

ธาตุเจือ	ค่าคว่ามต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุเจือ (%) 2	ค่าคว่ามต้านแรงดึง MPaปริมาณธาตุเจือ (%) 5	ค่าคว่ามต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุเจือ (%) 10	ค่าคว่ามต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุเจือ (%) 20
Ag	140	150	170	20
Co	240	-	-	190
Cr	200	-	-	-
Cu	190	290	400	500
Fe	190	-	-	-
Ni	220	350	470	680
Pd	150	170	220	290
Pt	150	180	240	370

2.3.3 ทองคำ-ดีบุก (Gold-Tin)

โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนยูเทคติก Au-20Sn มีจุดหลอมละลายที่ 280°C เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งและมีความเปราะพอสมควร โดยสมบัติทางกลที่ได้นี้ได้มาจากเฟสที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะของทองคำและดีบุกที่มีชื่อเรียกว่า AuSn (δ) และ AU_5Sn (ζ) ซึ่งเฟส ζ เป็นเฟสที่มีความแข็งสูง แต่โดยธรรมชาติของเฟส ζ จะมีความเสถียรตลอดช่วงกว้างของส่วนผสมทางเคมี ดังแผนภาพสมดุลที่แสดงในรูปที่ 1 ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความเหนียว (ประมาณ 2wt% ที่อุณหภูมิห้อง) แต่ก็ยังสามารถทำการรีดร้อนเป็นแผ่นฟอยล์ (Foil) และขึ้นรูปเบื้องต้น (Preforms)ได้โดยการใช้เทคโนโลยีการหล่อที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่สามารถผลิตแผ่นฟอยล์ที่เหนียวและบางได้ความหนาประมาณ 75 μm และได้โครงสร้างจุลภาคที่ไม่เป็นระเบียบ แต่อย่างไรก็ตามสภาวะนี้ค่อนข้างจะไม่เสถียรและจะต้องทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหลังจากการขึ้นรูปแผนฟอยล์ภายในช่วงเวลา 30 นาที แผ่นฟอยล์ที่ได้นี้จะมีสมบัติทางกลที่ไม่แตกต่างจากแผ่นฟอยล์ที่ผลิตจากวิธีการธรรมดาทั่วๆ ไป แต่โครงผลึกที่ได้นี้สามารถคงสภาพเติมได้ประมาณ 1 ปี ถ้าทำการจุ่มชุบและเก็บรักษาภายใต้ไนโตรเจนเหลว (-196°C) สำหรับในกรณีของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 1 เดือน โลหะผสมชนิดนี้สามารถที่จะนำมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น Strip ที่ยังคงมีความเหนียว แต่หลังจากขึ้นรูปเป็นแผ่น Strip แล้วจะต้องรีบนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C ทันที เพื่อให้คงสภาพความเหนียว และนอกจากนี้โลหะผสมชนิดนี้ยังสามารถที่จะนำไปผลิตเป็นโลหะผงได้ด้วยขบวนการ Gas Atomization ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย และสามารถคงสภาพเป็นผงได้นานในสารอินทรีย์ปานกลาง (สารอินทรีย์ที่มีส่วนผสมของฟลักซ์) โดยไม่มีการเสื่อมสภาพ ด้วยเหตุนี้โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนชนิดนี้จึงมักถูกนำไปใช้ในรูปของครีมหรือแป้งเปียกสำหรับการต่อประสานชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับเคมีเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพสมดุลทองคำ-ดีบุก (ที่มา : ASM International Handbooks) [8]

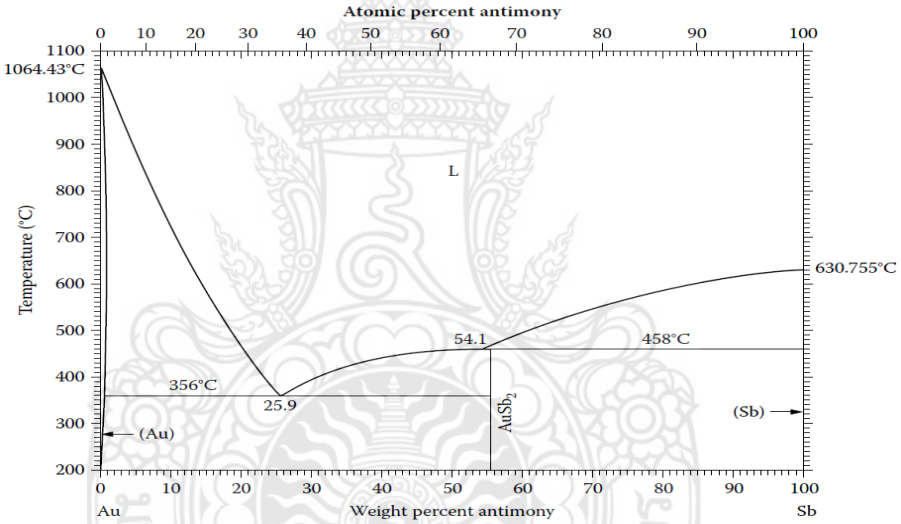
ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ไปใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานนั้น จะใช้วิธีการปกคลุมพื้นผิวรอยต่อด้วยชั้นผิวเคลือบของทองคำที่มีความหนาที่พอเหมาะ โดยการเคลือบทองคำทับบนชั้นพื้นผิวดีบุกที่บางกว่า โดยมีอัตราส่วนความหนาของทองคำต่อดีบุกเท่ากับ 2:1 แต่ถ้าเป็นการเคลือบผิวด้วยวิธี Electroplating ชั้นผิวเคลือบของทองคำจะถูกทับถมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของธาตุแต่ละตัวที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งโดยปกติแล้วดีบุกจะถูกกัดด้วยกรดเจือจาง หลังจากนั้นอะตอมของดีบุกเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอบๆ ชั้นผิวเคลือบของทองคำ การทับถมของโลหะตัวประสานที่เกิดขึ้นนี้เป็นขบวนการที่ปราศจากการใช้ฟลักซ์ และมีความคงทนนานหลายเดือน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เกิดขึ้นได้ยากสำหรับการบัดกรีที่ต้องการให้เกิดการทับถมที่มีความหนามากๆ และจำเป็นต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 420°C เพื่อทำให้เกิดการลดความเสถียรของสารประกอบเชิงโลหะ AuSn มิเช่นนั้นแล้วจะเกิดการก่อตัวของเฟสที่เป็นอุปสรรคต่อเฟสที่เป็นบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของโลหะทั้งสอง และนอกจากนี้ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้การกระตุ้นให้เกิดการเคลือบผิวโดยการทำ Co-Electroplating สำหรับการเคลือบโลหะตัวประสานทองคำ-ดีบุกโดยตรงบนพื้นผิวของชิ้นงานโลหะ การเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระตุ้นนี้เป็นควบคุมอัตราส่วนของอะตอมทองคำต่อดีบุกโดยปราศจากไซยาไนด์ ซึ่งมีการนำกรดเจือจางอ่อนๆ มาใช้เพื่อให้เกิดการทับถมเหนือบริเวณพื้นที่ที่ต้องการให้มีความหนามากๆ

โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนที่มีส่วนผสม Au-20Sn มีนัยสำคัญต่อระดับการไหลตัวเพื่อให้เกิดการเปียกเมื่อโลหะหลอมละลาย ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับงานอิเลคทรอนิกส์ เช่น การยึดติดชิ้นส่วนโลหะทองคำและการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์อิเลคทรอนิกส์เพื่อให้เกิดสุญญากาศสำหรับบรรจุภัณฑ์สารกึ่งตัวนำเซรามิก แต่ในบางครั้งก็มีการใช้ฟลักซ์เพื่อช่วยให้เกิดการไหลกระจายตัว ซึ่งการใช้ฟลักซ์นี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ดังนั้นการต่อชิ้นส่วนต่างๆ ในงานอิเลคทรอนิกส์จึงดำเนินการภายใต้บรรยากาศปกคลุม

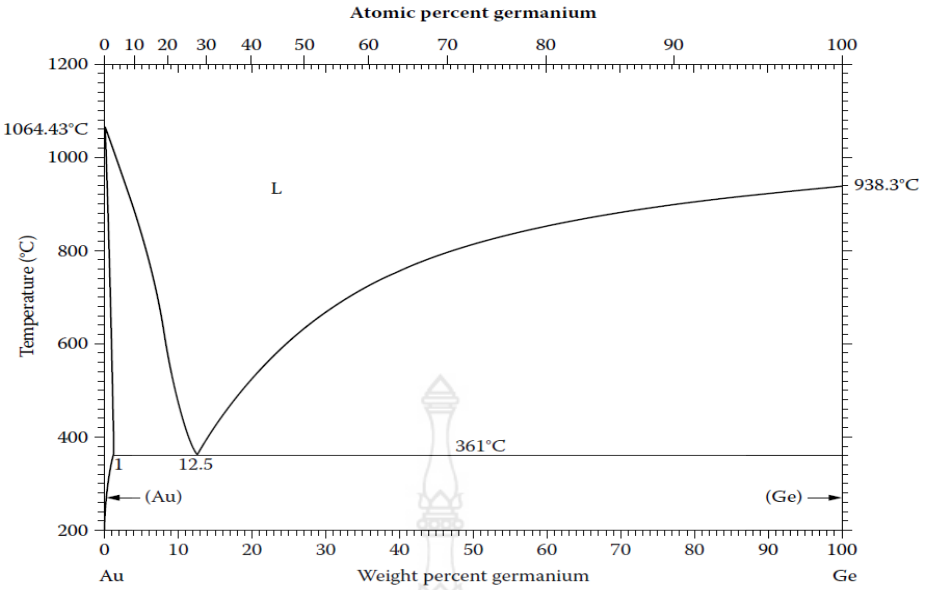
โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานชิ้นส่วนทองคำที่มีความหนามากๆ แต่ก็มีสิ่งที่ทำให้ให้เป็นอุปสรรคสำหรับการดำเนินการจากสมบัติของการสลายตัวของทองคำที่มีจุดหลอมละลายสูงขึ้นและไหลตัวได้ค่อนข้างยากส่งผลให้การเปียกเกิดขึ้นได้ยาก โลหะผสมที่เป็นส่วนผสมที่ก่อให้เกิดอุปสรรคสำหรับการไหลตัวประกอบด้วย ทองแดง นิกเกิล โครเมียมและไนโครม (Nichrome) ตัวอย่างของโลหะที่ช่วยให้เกิดการไหลตัวได้ดีสำหรับโลหะผสม Au-20Sn คือ พัลลาเดียมซึ่งพัลลาเดียมช่วยให้โลหะผสม Au-20Sn ไหลตัวได้ดีโดยการละลายผสมในโลหะตัวประสานทองคำ-ดีบุก ในช่วงขอบเขตการละลายที่ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าบริเวณรอยบัดกรีต่อประสานนี้ถูกนำไปบ่มในสภาวะของแข็ง จะเกิดการก่อตัวของช่องว่าง Kirkendall ที่บริเวณเฟสที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสระหว่างพัลลาเดียมที่ไม่ละลาย (ตกค้าง) กับสารประกอบเชิงโลหะ Pd_3Sn_2 ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และส่งผลให้รอยต่อประสานอ่อนแอ ความสามารถในการละลายของพัลลาเดียมในโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิสำหรับการ

บัดกรีโดยทั่วไปจะมีวัฏจักรของขบวนการที่สั้นและช่วยให้ชั้นบางๆ ของแพลทินัม (200nm) เกิดการเปียกอย่างรวดเร็วและเป็นชั้นอุปสรรคสำหรับการต่อประสานที่เสถียร

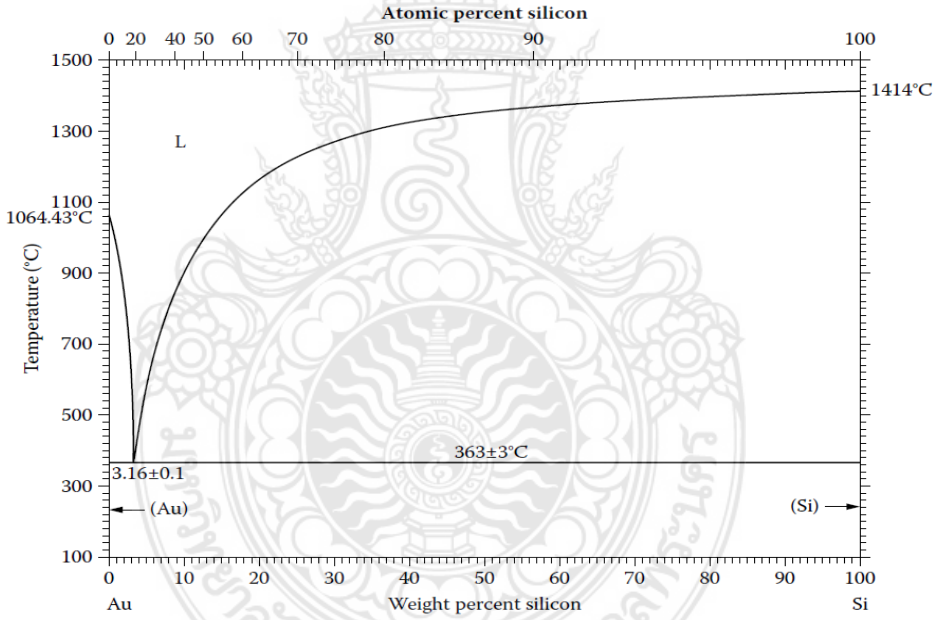
การผสมหรือเติมโลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าโลหะผสมที่เป็นตัวประสานยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการต่อประสานฟิล์มโลหะที่หนา ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการเติมเงินและทองแดงในโลหะผสมทองคำ-ดีบุกเพื่อแทนที่ทองคำ ซึ่งอัตราการผสมที่เหมาะสมและช่วงอุณหภูมิหลอมละลายไม่มีการเปิดเผย แต่มีข้อแนะนำสำหรับการดำเนินการบัดกรีต่อประสานที่อุณหภูมิ 400°C เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมระบบสองธาตุ Au-20Sn ที่มีอุณหภูมิสำหรับการดำเนินบัดกรีต่อประสานที่ 350°C การเติมธาตุเงินและทองแดงมีนัยที่บอกช่วงอุณหภูมิที่เป็นไปได้สำหรับการหลอมโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนที่สามารถทำได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-350°C และนอกจากนี้ การเติมโลหะผสมต่างๆ เข้าไปในโลหะตัวประสานเพื่อต้องปรับปรุงเพิ่มค่าความเหนียวและความสามารถในการเปียกของโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน ดังรูปที่ 2.10 ถึงรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แผนภาพสมดุลทองคำ-พลวง (ที่มา : ASM International Handbooks) [8]



รูปที่ 2.11 แผนภาพสมดุลทองคำ-เจอมาเนียม (ที่มา : ASM International Handbooks) [8]



รูปที่ 2.12 แผนภาพสมดุลทองคำ-ซิลิกอน (ที่มา : ASM International Handbooks)

2.4 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง [1]

โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 หรือเงินสเตอร์ลิง 925 หมายถึง โลหะเงินเจือที่มีปริมาณเนื้อเงินบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 925 ใน 1000 ส่วนเจือรวมกับธาตุอื่นๆปริมาณไม่เกินกว่า 75 ส่วนโดยน้ำหนัก จากมาตรฐาน ISO 9202:1991(E) ได้กำหนดปริมาณธาตุโลหะมีค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับการทำเครื่องประดับไว้หลายระดับในปริมาณธาตุเป็นส่วนใน 1000 ส่วน (Values in Parts per Thousand) ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.11 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่างๆ [9]

โลหะมีค่าเจือ	ปริมาณธาตุใน 1000 ส่วนอย่างต่ำ
Gold Alloy	375 (ทองคำกะรัต 9k)
	585 (ทองคำกะรัต 14k)
	750 (ทองคำกะรัต 18k)
	916 (ทองคำกะรัต 22k)
Platinum Alloy	850
	900
	950
Palladium Alloy	500
	950
Silver Alloy	800
	835
	925

2.4.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

โลหะเงินเป็นธาตุโลหะที่หายากและมีราคาแพง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่าเช่นเดียวกับทองคำ ธาตุโลหะเงินมีสัญลักษณ์ทางเคมี Ag และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic) คุณสมบัติหลักๆ ของธาตุโลหะเงินสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

ก. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะเงิน เป็นโลหะสีขาวมันวาว อ่อนนิ่ม ก้อนโลหะเงินสามารถตีแผ่หรือรีดเป็นแผ่นบางๆ ได้บางถึง 0.00025 มิลลิเมตร โดยทั่วไปโลหะเงินไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 190°C ผิวของโลหะเงินถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานๆ จะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากมีซัลเฟอร์ (Sulfur) อยู่ในอากาศมาก โลหะเงินบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ 960.8°C จุดเดือดที่อุณหภูมิ 2210°C ซึ่งจะทำให้กลายเป็นไอสีขาวเงิน ในขณะที่โลหะเงินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโลหะเงินสามารถดูดกลืน (Absorb) ออกซิเจนได้ประมาณ 20 เท่า คุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพของโลหะเงินสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส [10]

คุณสมบัติต่างๆ	เงิน(Ag)	ทองแดง(Cu)	อินเดียม(In)	ฟอสฟอรัส(P)
เลขอะตอม	47	29	49	15
การจัดเรียง อิเล็กตรอน	2,8,18,18,1	2,8,18,1	2,8,18,18,3	2,8,5
น้ำหนักอะตอม	107.868	63.54	114.82	30.974
จุดหลอมเหลว (°C)	960.8	1083	156.81	44.3
จุดเดือด (°C)	2210	2593	2080	280.7
ความหนาแน่น (g/cm^3)	10.5	8.92	7.31	1.82
รัศมีอะตอม (nm)	0.144	0.128	0.167	0.110
โครงสร้างผลึก	fcc	fcc	tetragonal	triclinic
ความจุความร้อนจำเพาะ (cal/g. °C)	0.0559	0.092	0.0548	0.1833
ความร้อนในการหลอมละลาย (cal/g)	25	50.6	-	-
การนำความร้อน ($cal/cm^2/cm/s/°C$)	1	0.941	-	-
ความแข็ง (HB)	30	37	-	-

ความหนาแน่น (Density) โลหะเงินบริสุทธิ์มีความหนาแน่นเท่ากับ 10.49g/cc ที่อุณหภูมิ 20°C ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต การขึ้นรูปและการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ อาทิเช่น การหล่อขึ้นรูป การรีด การดัดและการกดลากขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังขึ้นอยู่กับ

กรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การอบเป็นเนื้อเดียว การอบอ่อน และการอบเพิ่มความแข็ง ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.13 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ [11]

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
960	9.30
976	9.285
1,000	9.259
1,043	9.210
1,070	9.188
1,092	9.200
1,094	9.170
1,145	9.150
1,195	9.100
1,250	9.050
1,302	9.000

ข. คุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ในการศึกษาคุณสมบัติทางกลโลหะเงินนั้นจะต้องคำนึงถึงระดับความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน โดยกำหนดให้โลหะเงินบริสุทธิ์จะต้องมีเนื้อเงินอย่างน้อย 99.95% โดยปกติปริมาณของสารเจือปน (Impurities) แต่ละชนิดที่ผสมในเนื้อโลหะเงินจะต้องมีปริมาณไม่เกินกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.14 ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM [11]

สารเจือปน	ปริมาณสารเจือปน (%)	ปริมาณสูงสุด ASTM (%)
Silver	-	99.95 (min)
Copper	0.05	0.08
Lead	0.004	0.025
Iron	0.003	0.002
Nickel	$<$ 0.001	-
Indium	$<$ 0.001	-
Magnesium	$<$ 0.001	-
Silicon	$<$ 0.001	-

Bismuth	< 0.001	0.001

จากการทดลองนำโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% มาทำการขึ้นรูปเย็นที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน พบว่าความต้านทานแรงดึง อัตราการยืดตัวและความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน [12]

อัตราการขึ้นรูป (%)	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ความแข็ง (HV)
0	150	50	26
10	180	30	54
20	230	10	65
30	260	5	70
50	290	3	80
80	360	2	90

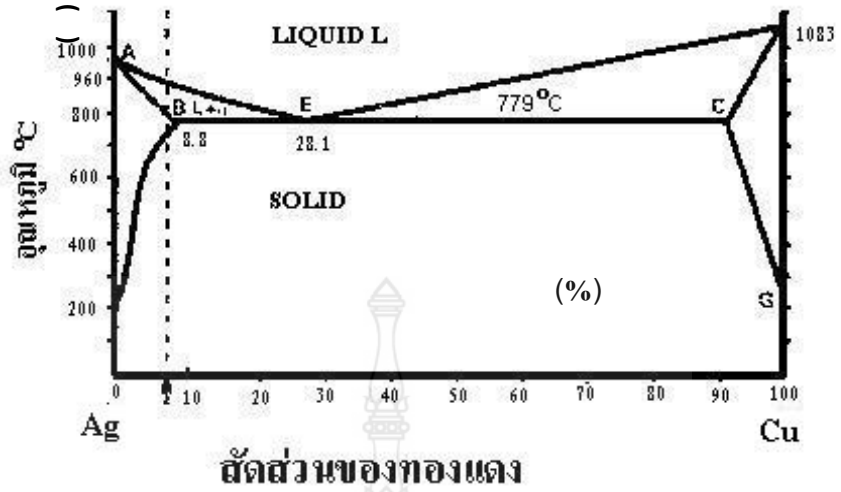
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนติคไนเตรท (Argentic Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูนาร์คอสติค (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริค (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนติคซัลเฟต (Argentic Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide) กรดซัลฟูริคเจือจางไม่สามารถทำปฏิกริยากับเงินได้ในลักษณะของซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulphate)

กรดไฮโดรคลอริค (Hydrochloric Acid) ทำปฏิกริยากับเงินช้ามากและเกิดเพียงเฉพาะที่ผิวเท่านั้น โดยจะเกิดคลอไรด์เคลือบโลหะไว้ โปตัสเซี่ยมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide) สามารถละลายเงินได้ อัลคาลิสไม่ทำปฏิกริยากับเงินด้วยเหตุนี้ เบ้าหลอมเงินจึงเป็นพวกอัลคาไลน์

การตกตะกอนของเงิน กรดไฮโดรคลอริคและคลอไรด์ทำให้เงินคลอไรด์ตกตะกอนเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งถ้าให้ความร้อนและคนให้ทั่ว สารละลายจะมีลักษณะเป็นขุยและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกับแสงตะกอนจะมีสีเทาอมน้ำเงินและค่อยๆเป็นสีม่วง จนในที่สุดจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ

2.5.2 โลหะวิทยาโลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ใช้สำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน มีคุณสมบัติทางกลอ่อนนิ่ม ความสามารถในการคงรูปต่ำไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งาน จึงต้องมีการเจือธาตุเจือลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติด้านการหล่อขึ้นรูปและเพิ่มความต้านทานการหมอง ซึ่งธาตุเจือที่เจือเข้าไปจะต้องไม่ทำให้คุณค่าและความสวยงามของโลหะเงินลดลง ธาตุเจือหลักที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ทองแดง เพราะทองแดง มีคุณสมบัติที่สามารถละลายรวมกับเงินได้ในลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ดังรูปที่ 2.13 และนอกจากนี้ ทองแดงยังมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงิน จากการตกตะกอน (Precipitate) ของทองแดงด้วยกระบวนการ Precipitation Strengthening



รูปที่ 2.13 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง [13]

จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการละลายของโลหะเงินเจือกับทองแดงในสภาวะสารละลายของแข็งของโลหะเงินเจือทองแดง (Solid Solution of Copper in Silver Alloy) และโลหะทองแดงเจือเงิน (Silver in Copper Alloy) ซึ่งมีจุดยูเทคติกส์ที่ 28.1 เปอร์เซ็นต์ทองแดง ความสามารถของการละลายทองแดงในเงินสูงสุดที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ทองแดง โดยความสามารถของการละลายทองแดงในเงินจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ สำหรับในกรณีของโลหะเงินเจือทองแดงที่มีปริมาณของทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกันที่สภาวะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution (α), Secondary Copper-Rich Solid Solution (β) ที่เกิดจากทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วยที่อุณหภูมิสูงประมาณ 745°C ขึ้นไปโครงสร้างจะเป็น Primary Silver-Rich Solid Solution (α) เพียงเฟสเดียว แต่ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 745°C ความสามารถของการละลายทองแดงในโลหะเงินสิ้นสุดลงทำให้เกิดโครงสร้าง Silver-Copper Eutectic และทองแดงแยกผลึกเป็นโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ซึ่งเม็ดเกรนของโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ที่ได้จะมีขนาดใหญ่ และมีผลทำให้โลหะเงินเจือทองแดงมีความแข็งแรงต่ำ โครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปเย็นและกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

2.5.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน

สินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็นผลผลิตที่เกิดจากงานช่างฝีมือทางด้านศิลปหัตถกรรมที่แสดงถึงวัฒนธรรมของชนชาติไทยโดยเฉพาะ จึงเป็นสินค้าที่รู้จักกันแพร่หลาย และเป็นที่นิยมของชาวต่างประเทศทั่วโลก นับได้ว่าเป็นการเผยแพร่งาน

ศิลปหัตถกรรม วิจิตรกรรมและวัฒนธรรมไทยให้ชาวโลกได้รู้จักประเทศไทย เพื่อเป็นการรักษาชื่อเสียงของประเทศ ในการส่งออกสินค้าเครื่องเงินที่ผลิตจากโลหะเงินสเตอร์ลิงให้มีคุณภาพดีมีมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน มอก.21-2515 ซึ่งได้มีการนำมาใช้รับรองคุณภาพสินค้าเครื่องเงินจนถึงปัจจุบัน และถือเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงินที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก [1]

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ว่าด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับชนิดและคุณลักษณะที่ต้องการของเครื่องเงินรวมทั้งวิธีทดสอบเครื่องเงินและยาถมเพื่อหาปริมาณโลหะเงินบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [3]

ก. เครื่องเงิน หมายถึงวัสดุที่ทำด้วยโลหะเงินหรือประกอบขึ้นจากโลหะเงินเป็นส่วนสำคัญ

ข. โลหะเงินมาตรฐาน หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะชนิดอื่นปนไม่เกินร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก

ค. โลหะเงินบริสุทธิ์ หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะอื่นปนไม่เกินร้อยละ 0.01 ของน้ำหนัก

ง. ยาถม หมายถึงสารเคมีที่มีโลหะเงินบริสุทธิ์เป็นส่วนผสมไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 ของน้ำหนัก สำหรับใช้ในการลงยาถม

จ. ยาสี หมายถึงสารเคมีสีสำหรับใช้ในการลงยาสี

2.4.4 ลักษณะทั่วไปของเงินเจือประเภทต่างๆ [14]

Ag950 มีลักษณะเช่นเดียวกับเงินบริสุทธิ์ และต้านการเกิดออกซิเดชั่น หลังการอบเหนียวจะเกิดออกไซด์ ที่ผิวนอกเกือบจะถึงผิวใน และจะไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับชั้นของออกไซด์ จุดหลอมเหลวที่สูงจะเหมาะกับการชุบผิว อย่างไรก็ตาม โลหะจะมีความแข็งเท่ากับเงินบริสุทธิ์และสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ และขึ้นรูปได้ดี และยังสามารถทำให้บางได้ถึง 75% ในระหว่างการอบเหนียวและต่อเนื่องกัน เพราะฉะนั้นวัสดุนี้เหมาะกับการขึ้นรูป (Ag950) และสามารถดัดเป็นลวดได้ดี ส่วนความแข็งจะเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 600°C และจำเป็นต้องเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการ หลอมเหลวและอบเหนียว ดังนั้นความสามารถในการทนการยืดและหดจะลดลง ลักษณะด้อยของ Ag950 คือการเสียรูปร่างง่าย [9]

เมื่อเพิ่มความแข็งจาก 50HB จนเกินกว่า 100 HB ด้วยการชุบแข็ง เป็นไปได้ว่าเกือบจะไม่มีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมากนัก

Ag925 โดยทั่วไปจะเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากถึงคุณภาพเหมือนกับ Ag950 มีลักษณะเหมือนกับเงินบริสุทธิ์นิยมจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชั่นสูง โลหะผสมชนิดนี้ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวได้ดีเท่ากับ Ag950 อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันจะให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการ

1. การอบเหนียวที่ 650°C เย็นตัวเร็วจะเกิดการแตกหักด้วยอัตราการยืดตัว 42%

2. การอบเหนียวที่ 650°C เย็นตัวช้า (ในเตาครึ่งชั่วโมงที่ 350°C) จะเกิดการแตกหัก ด้วยอัตราการยืดตัวที่ 25%

Ag835 ปกติจะใช้ในการทำเครื่องประดับ แต่ลักษณะสีของ Ag835 จะไม่ขาวสะอาดเหมือนกับเงินบริสุทธิ์มากนัก การใช้งานสามารถรู้สึกถึงความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น

Ag800 โลหะผสมชนิดนี้เหมาะกับการนำไปเป็นอุปกรณ์บนโต๊ะอาหาร เช่น ช้อน มีด ฯลฯ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี และมีความแข็งสูง และมีราคาค่อนข้างไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของเงินที่น้อยกว่า แต่โลหะชนิดนี้จะมีลักษณะออกเป็นสีเหลืองอ่อนๆ เนื่องจากเกิดออกไซด์ อย่างไรก็ตามจะนำมาทำการชุบผิวด้วยเงิน คือโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์ของเงินสูงกว่า และจำเป็นต้องทำการอบเหนียวอีกครั้งพร้อมกับการขัดให้เงามันในทางกลับกัน เมื่อเปอร์เซ็นต์ทองแดงสูงมากขึ้น จะทำให้เกิดเป็นพิษ เมื่อสัมผัสกับกรดอาหาร ตัวอย่างเช่น สนิมเขียวที่ทองแดง Copper Acetate ในน้ำส้มเป็นต้น ถ้าโลหะผสมมีการดัดมากๆ หรือมีการขึ้นรูปจำเป็นต้องมีการอบเหนียว อย่างไรก็ตาม Ag800 สามารถที่จะหลอมและหล่อได้ง่ายกว่าโลหะผสมที่มีเปอร์เซ็นต์เงินในปริมาณที่มากกว่าจุดหลอมเหลวจะอยู่ที่ 800°C ซึ่งโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 900°C ในการหลอมละลายโลหะผสมนี้สามารถเพิ่มความแข็งได้จาก 40–100 HB โดยการชุบแข็งที่ 725°C ปล่อยทิ้งไว้ 17 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 280°C

ตารางที่ 2.16 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ [4]

โลหะเงินเจือ	จุดหลอม (°C)	ความแข็ง (HB)	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
Ag 1000	960	35	180	49	10.39
Ag 925	910 / 779	68	300	29	10.29
Ag 835	840 / 779	76	300	33	10.16
Ag 800	820 / 779	79	310	30	10.13
Ag 720	779	90	330	27	10

2.4.5 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ธาตุมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังตัวอย่างที่จะกล่าวไปนี้

นิกเกิล (Ni) สามารถจะผสมลงไปในอัลลอยเงิน-ทองแดง ได้ถึง 1% นิกเกิลสามารถป้องกันการเกิดลักษณะเกรนโตและเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่ถ้ามีนิกเกิลมากกว่า 2.5% จะทำให้คุณสมบัติดังกล่าวน้อยลง ดังนั้นจึงได้มีการนำนิกเกิลไปใช้น้อยลง เนื่องจากเมื่อมีเปอร์เซ็นต์นิกเกิลสูงมากจะทำให้นิกเกิลไม่สามารถละลายในน้ำโลหะเหลวได้ และทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

ตะกั่ว (Pb) เมื่อผสมในอัลลอย จะทำให้เปราะเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ตะกั่วสามารถที่จะแยกจากเงินได้ ที่จุดหลอมเหลว Eutectic ที่อุณหภูมิ 304°C บางครั้งจะต้องผสมตะกั่วเพื่อให้ง่ายต่อการตัดเฉือน (Machined) แต่จะไม่สามารถทำการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

ดีบุก (Sn) ปริมาณดีบุกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง เงินบริสุทธิ์ สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19% อัลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชั่นน้อยกว่า อัลลอยเงิน–ทองแดง แต่จะทำให้

เนื้ออัลลอยนิ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 9% จะทำให้เกิด Cu_4Sn ซึ่งจะทำให้เปราะ และในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น SnO_2

อลูมิเนียม (Al) 4–5% จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ และการใช้งานของอัลลอย แต่ถ้ามีอลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็น Ag_3Al และจะทำให้อัลลอยเปราะในระหว่างการหลอมเหลวหรือการอบเหนียวจะเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเกิดตะกอนบนขอบเกรน ซึ่งเป็นสาเหตุให้วัตถุเปราะในระหว่างการใช้งาน

สังกะสี (Zn) ประมาณ 20% สามารถจะละลายได้ในสถานะของแข็ง แต่ในทางปฏิบัติสามารถผสมได้ประมาณ 14% อัลลอยที่ได้สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชั่น และมีคุณสมบัติเป็นมันเงาจึงสามารถขัดเป็นเงาได้ง่าย และช่วยลดการรวมตัวของเงินกับออกซิเจนและทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดีและมีอัตราการยืดตัวสูงขึ้น

ซิลิกอน (Si) เกือบจะไม่ละลายในเงิน ซิลิกอนจะทำให้อัลลอยแข็งและเปราะ ซึ่งจะมีตะกอนบนขอบเกรน และเกือบที่จะทำให้อัลลอยใช้งานไม่ได้ แต่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้ โดยการใส่หินเขี้ยวหนุมาน (Quarts) ลงในเบ้าหลอม

ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ AgP_2 หรือ Cu_3P ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชั่นเกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับทองแดง–ฟอสฟอรัส ถ้าการดูดเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์

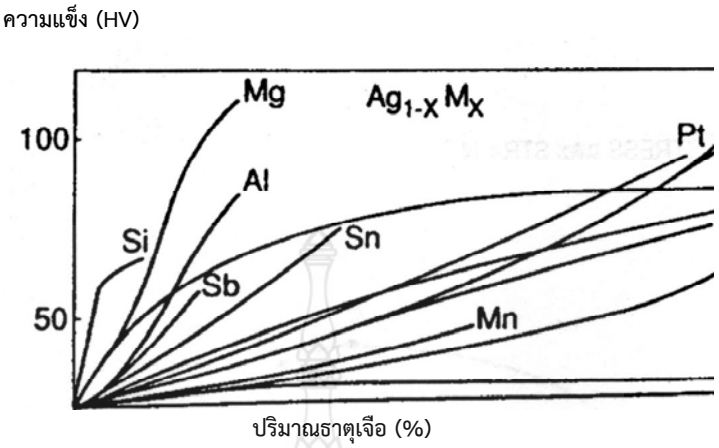
2.4.6 อิทธิพลของธาตุเจือต่อคุณสมบัติของโลหะเงินเจือ

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ทั้งในด้านความแข็งและความแข็งแรง ซึ่งมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณของธาตุซิลิกอนจำนวนที่ไม่มากนักมีผลทำให้โลหะเงินมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นและยังมีทองแดง ซึ่งเป็นธาตุที่น่าสนใจและส่วนใหญ่นิยมนำมาเป็นธาตุเจือหลักในโลหะเงินอยู่แล้วเพราะง่ายในการหล่อหลอมและสามารถละลายเข้ากับเงินได้ดี ในด้านความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ผสมธาตุเจือชนิดต่างๆ ในอัตราผสมของธาตุเจือ 2%, 5%, 10%, 20% แสดงในตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.17 ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ [12]

ธาตุเจือ	ค่าความต้านแรงดึง (MPa) ปริมาณธาตุเจือ (%)			
	2	5	10	20
Au	160	170	180	200
Cd	160	170	180	210
Cu	190	240	280	310
Pd	160	180	210	270
Sb	190	240	300	-

Sn	190	240	300	-
Zn	180	190	200	-



รูปที่ 2.14 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน [12]

ตารางที่ 2.18 ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง [12]

ธาตุเจือ	ความแข็ง (HV10) อัตราการขึ้นรูป (%)		
	0	40	80
ทองแดง 5%	58	108	134
ทองแดง 10%	76	126	158
ทองแดง 15%	98	136	177

สำหรับความแข็งของโลหะเงินเจือที่มีการเจือทองแดงในสัดส่วนต่างๆ และที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.8 นอกจากคุณสมบัติทางกลแล้ว จุดประสงค์ของการผสมธาตุเจือต่างๆ เข้าไปในเงินเพื่อหวังผลทางด้านอื่นๆ อีกเช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การเกิดผิวไหม้ (Fire Staining) และความต้านทานการหมอง (Tarnishing Behavior)

ในด้านการหล่อขึ้นรูปสำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิง ผู้ผลิตและผู้ประกอบการต้องการชิ้นงาน ที่มีคุณภาพดี มีการสูญเสียน้อยที่สุด และนอกจากนี้โลหะเงินไม่สามารถขึ้นรูปได้ดีด้วยวิธีการตีขึ้นรูปร้อน (Forging) เพราะได้ผิวงานที่ไม่ดีเนื่องจากเกิดผิวไหม้ (Fire Staining) ได้ง่ายมาก สำหรับการหล่อขึ้นรูปโดยทั่วไปนิยมใช้ทองแดงและสังกะสีปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผลทางด้านการไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี และช่วยลดก๊าซออกซิเจน (Deoxidized) ในโลหะเงินหลอมละลาย

2.5 คุณสมบัติของพาลาเดียม

พาลาเดียมคือโลหะชนิดหนึ่งที่เป็นโลหะที่มีสีขาวมีความวาวแบบโลหะสีผงละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพพาลาเดียมมีสูตรทางเคมี Pd เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 46 น้ำหนักอะตอม 106.42 มีจุดหลอมเหลว เท่ากับ 1552.0 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือด 2927.0 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่พบตามธรรมชาติเกิดผสมกับธาตุเงินหรือธาตุ อื่นๆ เช่น ทองแดง นิเกิลปรอท และแพลทินัม รูปผลึกจัดอยู่ในรูปแบบลูกเต๋า (Cubic) และมีความแข็งตามมาตรฐานตามอนุกรมของโมห์ 2.5 – 3 ค่าความถ่วงจำเพาะของทองบริสุทธิ์มีค่า 12.02 นิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ และอุปกรณ์การแพทย์

2.6 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

2.6.1 การทดสอบแบบ Vickers

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุซึ่งในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอยกด (Indentation) แบบกระดอน (Rebound) แบบขีดข่วน (Scratch) แบบสึกหรอ (Wear) และในแบบของความสามารถในการกลึงใส (Machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อน หัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็งแบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกสุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีด ข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้ เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และสุดท้ายความสามารถในการกลึงใสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการ เกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่ เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้า แข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอนการทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore Scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell Superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มี ความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนั้นในการทดสอบความแข็งบางครั้งต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่ พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชร

รูปปิรามิด ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136 องศา ดังรูปที่ 2.18 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด และจากรูปที่ 2.15 สามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ พื้นที่รอยกด = ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ = ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

จากความแข็ง Vickers = จะได้ DPH = เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm2) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาว

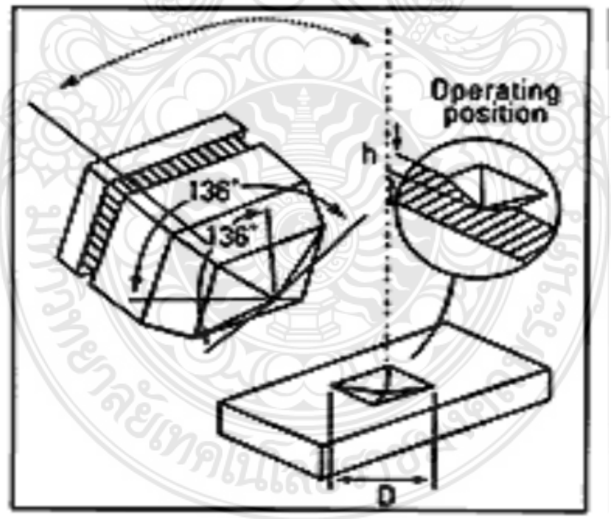
พื้นที่รอยกด = $\frac{d^2}{2\sin(136o/2)}$ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ = $\frac{d^2}{1.8544}$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

จากความแข็ง Vickers =แรงกด/พื้นที่รอยกด

จะได้ DPH = $\frac{1.8544\,f}{d^2}$

เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm^2) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือ ความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)



รูปที่ 2.15 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [2]

ในการทดสอบนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวกด จากนั้นให้ปลดล็อกระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำน้ำหนักกดออก ลดระดับแท่นวางลง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรูปรอยกดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏ การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขั้นต้นจะใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการ

ทดสอบนี้ คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ยอมรับมากกว่า ข้อเสียคือเป็นการทดสอบแบบทำลาย ขั้นตอนการทดสอบใช้เวลามากกว่าการทดสอบแบบ Brinell และ Rockwell ชิ้นทดสอบต้องทำการขัดเงาซึ่งใช้เวลามาก นอกจากนั้น เครื่องทดสอบมีราคาแพง ตัวอย่าง 7.3 หาค่าความแข็ง Vicker ของชิ้นทดสอบที่มีเส้นทแยงมุมของรอยกดเฉลี่ย 0.75 mm จากน้ำหนักกด 100 kg DPH = = 330 kg/mm^2

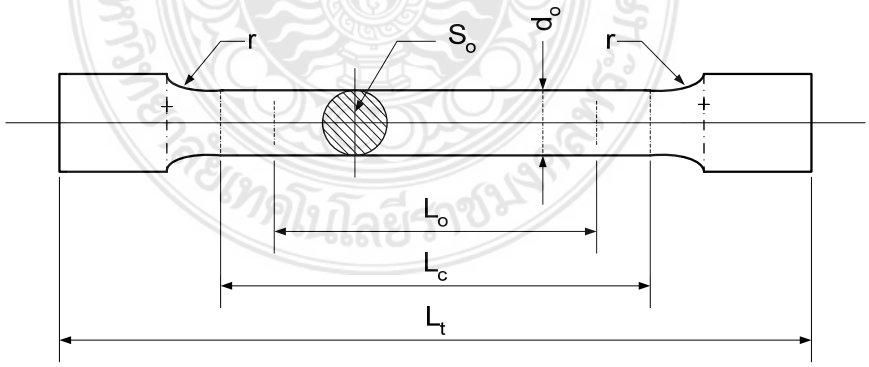
2.7 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

การทดสอบความแข็งแรงดึงเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถให้ผลเกี่ยวกับความต้นทานแรงดึง ความเค้นคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ วิธีการทดสอบชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน แรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึก

2.7.1 ชิ้นทดสอบ (Specimens)

ชิ้นทดสอบดึงจะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบอาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือในกรณีพิเศษอาจเป็นรูปอื่นก็ได้ สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะส่วนมากจะเตรียมโดยการกลึงให้มีพื้นที่ภาคตัดขวางกลมหรืออาจจะเตรียมให้มีพื้นที่ภาคตัดตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉากก็ได้ แสดงดังภาพที่ 2.16

ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.19



รูปที่ 2.16 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม (สมนึก วัฒนศรียกุล, 2549: 13) [2]

ตารางที่ 2.19 ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาการรับแรงดึง (DIN 50125) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (สมนึก วัฒนศรียกุล, 2549: 17) [2]

เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบ D_0	เส้นผ่านศูนย์กลางปลายจับ D_1	ระยะปลายจับ h	ความยาวพิกัด L_0	ความยาวช่วงขนาน L_c	ความยาวรวม L_t
6	8	25	30	36	95
8	10	30	40	48	115
10	12	35	50	60	140
12	15	40	60	72	160
14	17	45	70	84	180
16	20	50	80	96	205
18	22	55	90	108	230
20	24	60	100	120	250
25	30	70	125	150	300

2.7.2 ความยาวพิกัด (Gauge Length) [2]

คือความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้นในส่วนที่ขนานกันของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้หาความยืดระหว่างการทดสอบ

ความยาวพิกัด (L_0) หมายถึง ความยาวพิกัดก่อนการทดสอบ

ความยาวพิกัด (L_c) หมายถึง ความยาวพิกัดก่อนชิ้นทดสอบถูกดึงให้ขาดแล้วนำส่วนที่ขาดมาวางต่อเข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรงเดียวกัน[9]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมนึก วัฒนศรียกุล และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล, กรรมวิธีทางความร้อน, ความต้านทานการหมองและการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการหล่อโลหะเงิน+ทองแดง+ สังกะสี+ซิลิกอน ด้วยเทคนิคการหล่อในเตาหล่อเหวี่ยงแบบสุญญากาศ โดยกำหนดส่วนผสมของโลหะเงินเจือดังนี้ คือ 93.5%Ag+4.5%Cu+1.6%Zn+0.1%Si ซึ่งมีการแปรผัน มุมทางเดินน้ำโลหะ ,ความเร่ง (ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยง) และอุณหภูมิเทหล่อ พบว่า ค่าที่มีแนวโน้มให้สิ่งบกพร่องภายในชิ้นงานน้อยที่สุด คือ มุมรูเท 65° ความเร่ง 10G และอุณหภูมิเทหล่อ 1050°C จากผลการวิจัยที่

ผ่านมา คณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าในโครงการดังกล่าวไม่สามารถทำการศึกษาปริมาณของธาตุเจือรอง (Zn,Si) ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งตรงกับข้อสงสัยของผู้ประกอบการ SMEs ที่ทำการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา ที่ต้องมีการเติมสังกะสี หรือทองเหลืองเข้าไปในโลหะเงินเพื่อทำหน้าที่เป็นธาตุ Deoxidized หรือไล่แก๊สในน้ำโลหะ

สุรัตน์ วรรณศรี (2548) ได้ทำการศึกษาลักษณะข้อบกพร่องของโลหะเงินเจือทองแดง จากกรรมวิธีหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา พบว่าลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อสามารถสรุปลักษณะข้อบกพร่องและสาเหตุของการเกิดออกเป็น 3 ประเภทดังนี้คือ 1) ข้อบกพร่องที่ผิวที่เกิดจากส่วนผสมของโลหะความสกปรกของโลหะและปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะกับปูนแบบหล่อหรือบรรยากาศในการหล่อหลอมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามดผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริติกรอยแตกร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือและการหดตัวของโลหะ 2) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมแบบหล่ออัตราการผสมของน้ำกับปูนที่ใช้ทำแบบหล่อไม่เหมาะสมระยะเวลาในการผสมปูนไม่เหมาะสมทำให้ปูนมีการเซ็ตตัวก่อนที่จะเทลงกระบอกปูนเพื่อทำแบบหล่อการสั่นสะเทือนของแบบหล่อขณะที่ปูนกำลังเซ็ตตัวตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นผิวชิ้นงานหยาบมีคราบน้ำที่ผิวชิ้นงานรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและเนื้อปูนฝังในชิ้นงานหล่อเป็นต้นและ 3) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการหล่อหลอมโลหะอุณหภูมิของการหล่อโลหะไม่เหมาะสมและบรรยากาศในการหล่อไม่เหมาะสมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามดการเกิดฟองแก๊สในชิ้นงานรอยร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงานลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำปลีรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริติก เป็นต้น

LarryDimond. (1987) ได้สร้างโมเดลข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยขบวนการหล่อแบบ Investment casting ที่มีความสัมพันธ์ขบวนการหล่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมแบบหล่อล้วนมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อแทบทั้งสิ้น

DieterOtt. (1991) ได้ทำการศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งบางองค์ประกอบจะเกี่ยวข้องกับเทคนิค และความละเอียดรอบคอบในการปฏิบัติงานหล่อ และในหลายๆ กรณีจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาหรือเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ซึ่งประกอบด้วยการหดตัวของโลหะ การเกิดฟองแก๊สในน้ำโลหะหรือชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

Aldo M. Reti. (1997) ได้ทำการศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทองแดงและโลหะอื่นๆ ลงไป พบว่าธาตุเจือต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะโครงสร้างจุลภาคและนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการผสม Zn Geและ Si เพื่อแก้ปัญหาการเกิด Fire Stain และศึกษาพฤติกรรมการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

John P. Nielsen. (1987) ได้ทำการศึกษาความแตกต่างและความแข็งแรงของแบบหล่อของขบวนการหล่อ Investment Casting ที่มีผลต่อความเสียหายของแบบหล่อในขบวนการหล่อขึ้นรูปและบริเวณของแบบหล่อที่มีลักษณะเป็นบ่าหรือมีการหักมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ส่งผลให้เกิดพฤติกรรม

Hot Tear กับชิ้นงานหล่อเครื่องประดับ ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด Hot Tear ประกอบด้วยความซับซ้อนของแบบหล่อ พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะในโพรงแบบหล่อ อุณหภูมิหลอมละลายความร้อนในการหลอมละลายที่สูงเกินไป วัสดุทำโพรงแบบหล่อ อุณหภูมิโพรงแบบหล่อ และความสามารถในการหล่อขึ้นรูปของวัสดุ

Richard V. Carrano. (1996) ได้ทำการศึกษาและสรุปปัญหาจากการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิง สามารถแบ่งปัญหาที่เกิดจากการหล่อออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัญหาที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานและปัญหาที่เกิดจากการดูดซับออกซิเจนไว้ในน้ำโลหะในขั้นตอนการหลอมโลหะ ซึ่งปัญหาการดูดซับออกซิเจนนี้จะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเกิดโพรงอากาศอยู่ภายในและส่งผลให้ทองแดงที่ภายในโลหะเงินสเตอร์ลิงเกิดออกไซด์และฝังตัวอยู่ภายในชิ้นงานหล่อ

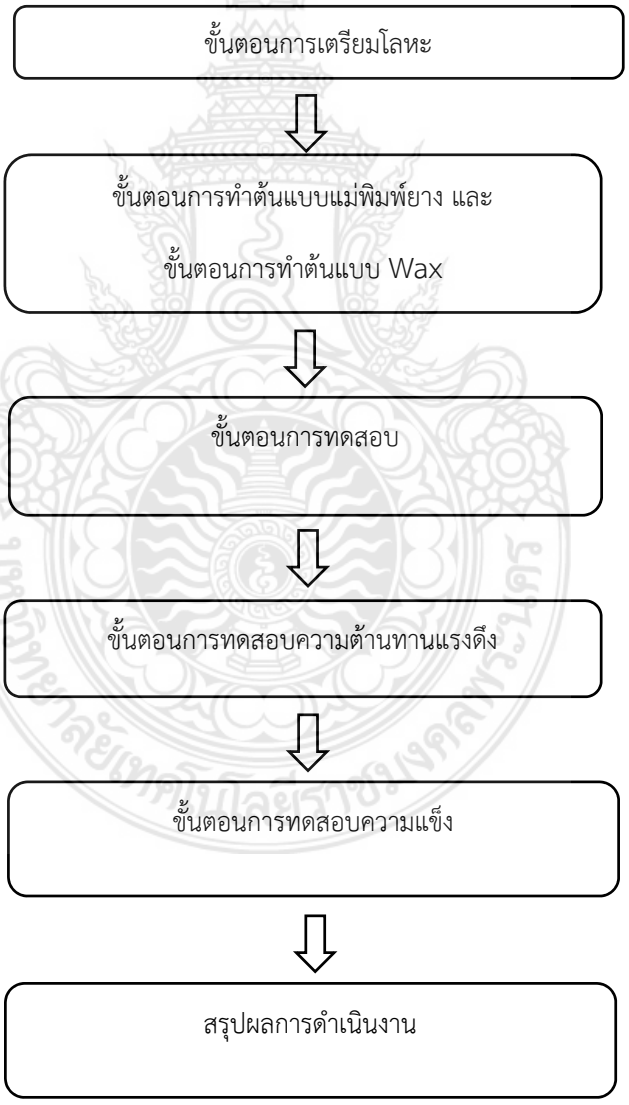
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการสืบค้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนวัตกรรมย้อนรอยแห่งการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตทองขาว 6k เพื่อนำมาผลิตเครื่องประดับให้มีประสิทธิภาพอีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเครื่องประดับ โดยการสร้างแผนการปฏิบัติงานนี้เพื่อเสนอแนะและเป็นแนวทางการปฏิบัติงานที่เหมาะสม

3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับได้กำหนดแผนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์โดยมีแผนภาพการทำงานตามที่กำหนด



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน

3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ

การเตรียมโลหะในการขึ้นรูปชิ้นงานทองขาว 6k จะต้องใช้ส่วนผสมของอัลลอยและสูตรการทดลอง 4 สูตรโดยมีเนื้อโลหะที่จำเป็นต่อการทดสอบ ดังนี้ ทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) พาเลเดียม(Pd)

3.2.1 ทอง

ทองคำจะมีความแวววาวอยู่เสมอ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนั้น เมื่อสัมผัสถูกอากาศสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม มีความอ่อนตัว ทองคำเป็นโลหะที่มีความอ่อนตัวมากที่สุด ด้วยทองเพียงประมาณ 2 บาท เราสามารถยืดออกเป็นเส้นลวดได้ยาวถึง 8 กิโลเมตร หรืออาจตีเป็นแผ่นบางได้ถึง 100 ตารางฟุต เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีทองคำเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะโลหะทองคำที่ใช้การทดลอง

โดยโลหะทองที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นโลหะทองความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือแสดงดัง รูปที่ 3.2

3.2.2 เงิน

โลหะเงินเป็นธาตุโลหะที่หายากและมีราคาแพง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่าเช่นเดียวกับทองคำ ธาตุโลหะเงินมีสัญลักษณ์ทางเคมี Ag และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic) โลหะเงินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ในรูปลักษณะเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือแสดงดัง รูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง

โดยโลหะเงินที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นโลหะเงินความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือ

3.2.3 ทองแดง

ธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดง คุณสมบัติของการเจือเพื่อการทดสอบครั้งนี้โดยให้มีความสามารถด้านความแข็งแรงของวัสดุ

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะโลหะทองแดง

ทองแดงที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.9% มีลักษณะเป็นเม็ดที่สามารถนำมาเจือได้สะดวกแสดงดัง รูปที่ 3.4

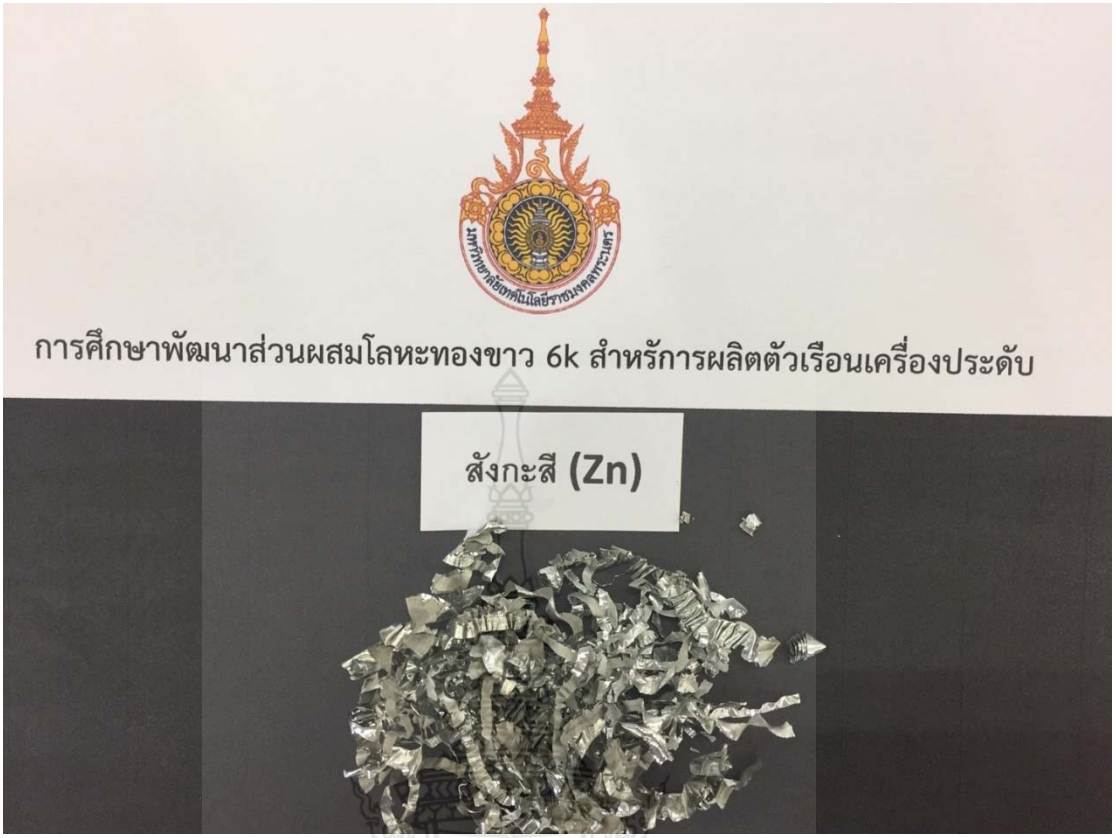
3.2.4 พาเลเดียม

พาเลเดียม คือโลหะชนิดหนึ่งที่เป็นโลหะที่มีสีขาวมีความวาวแบบโลหะสีผงละเอียด คุณสมบัติทางกายภาพพาเลเดียมมีสูตรทางเคมี Pd คุณสมบัติของการเจือเพื่อการทดสอบนี้โดยให้มีความสามารถด้าน ความเงางามและอีกนัยหนึ่งเพื่อสร้างความเป็นสีขาวให้แก่ทองขาว 6k สำหรับการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะพาเลเดียมที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 สังกะสี

เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มันวาว เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ซึ่งการทดลองครั้งนี้เจือเพื่อเพิ่มความสามารถด้านการหลอมละลาย เมื่อเจือธาตุสังกะสีอุณหภูมิการหลอมละลายจะต่ำลง ง่ายแก่การขึ้นรูปงานหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ลดขนาดของส่วนเจือนี้เพื่อความสะดวกโดยการเจาะเอาครีบหรือขี้เจาะให้เป็นแผ่นสะดวกแก่การใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6 การออกแบบการทดลองเจือธาตุในอัตราส่วนต่างๆ

การดำเนินการหลอมโลหะที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์โลหะทองขาว 6k เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล (Tensile Test , Hardness Test) โดยทำการผสมอัลลอยตามอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโลหะทองขาว 6k สำหรับการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบดังกล่าวที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6K

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง				
	Au	Ag	Cu	Zn	Pd
25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd	25	42	12	3	18
25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd	25	46	8	3	18
25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd	25	50	4	3	18
25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd	25	54	0	3	18

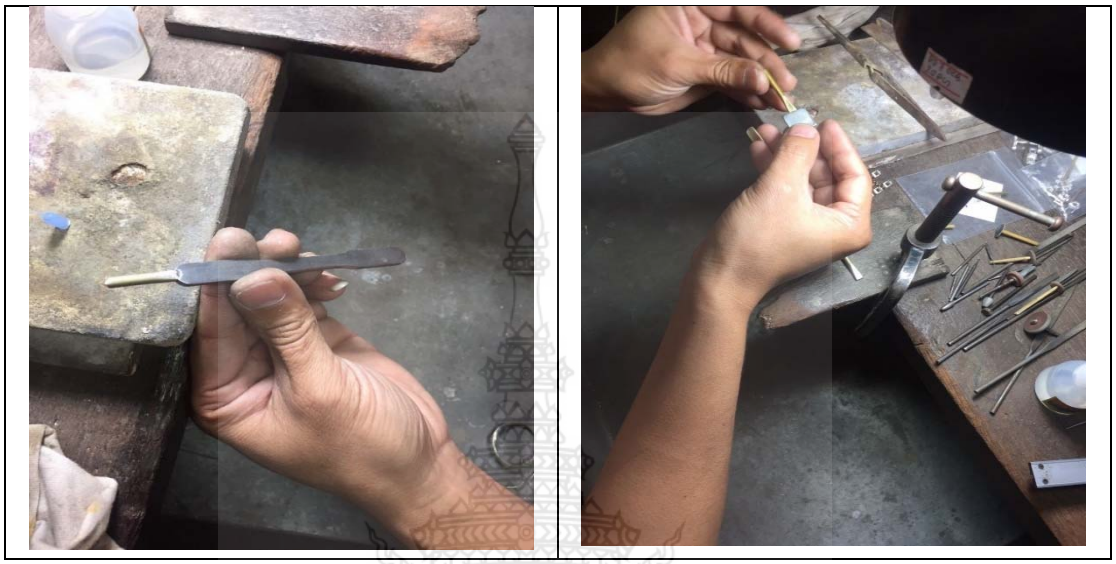
รูปที่ 3.7 แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6K

3.3 ขั้นตอนการทำต้นแบบพิมพ์ยาง และขั้นตอนการทำต้นแบบ Wax

การทำแบบแม่พิมพ์เป็นกรรมวิธีการทำแบบหล่อสำหรับการฉีด Wax ซึ่งจะนำไปใช้เป็นแบบสำหรับการหล่อปูนพลาสเตอร์เพื่อทำการหล่อต่อไป

3.3.1 ขั้นตอการติดก้านทางเดินน้ำโลหะ

การติดก้านทางเดินน้ำโลหะติดเพื่อใช้เป็นทางเดินน้ำโลหะสำหรับการฉีดน้ำเทียนเข้าสู่แม่พิมพ์



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการติดก้านทางเดินน้ำโลหะ

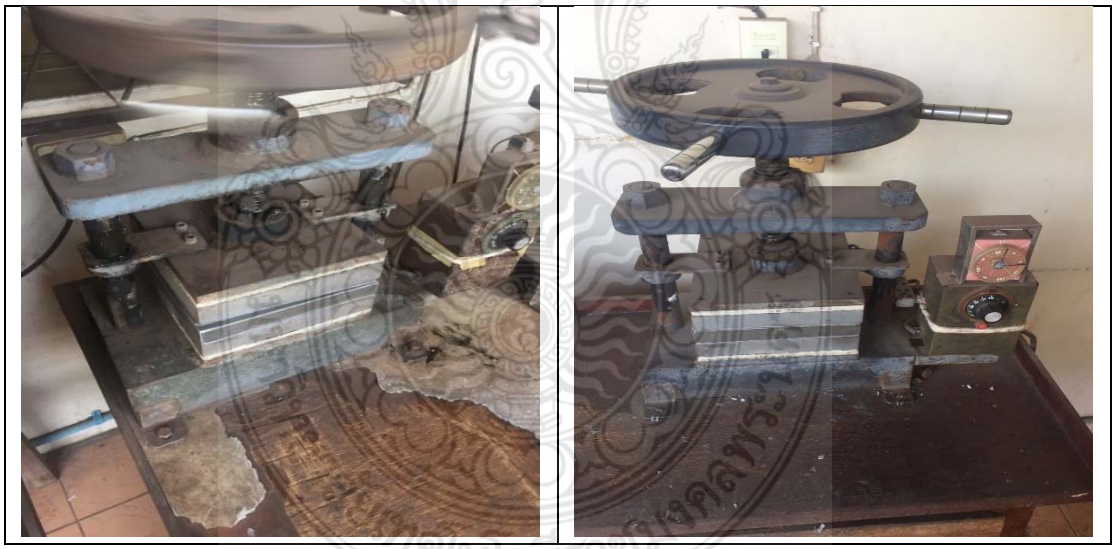
ติดกาวที่แท่งทางเดินน้ำโลหะและนำมาติดกับชิ้นงานทดสอบ เพื่อทำทางเดินน้ำโลหะเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญขั้นตอนหนึ่งทางเดินน้ำโลหะกรณีที่เล็กเกินไปอาจทำให้น้ำโลหะไม่เต็มโพรงแบบหรือกรณีที่ใหญ่เกินไปน้ำโลหะอาจเข้าไปในโพลงแบบอย่างรุนแรงก่อให้เกิดความเสียหายจากการกระแทกทำให้โพรงแบบเกิดความเสียหายชิ้นทดสอบหล่อมาไม่ได้ตามคุณภาพ (ดังรูปที่ 3.8)

3.3.2 ขั้นตอนการวางชิ้นงานในบล็อคเพื่อเตรียมอัดพิมพ์ยาง

การวางชิ้นงานทดสอบลงบนยางดิบเพื่อเตรียมอัดพิมพ์ยาง ด้วยความร้อนต้องมีการวางแผนสำหรับความเหมาะสมโดยจะเลือกบล๊อกแม่พิมพ์ที่มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาให้สอดคล้องกับกระสวนหรือแบบหล่อชิ้นงานทดสอบโดยจะเว้นระยะให้มีเนื้อยางพอดีและมีความแข็งแรงพอ

รูปที่ 3.9 แสดงการวางชิ้นงานลงบล็อกอัดพิมพ์ยาง

เป็นขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ยางโดยการนำแผ่นยางดิบมาเรียงซ้อนกันในโครงอลูมินัม และวางแม่พิมพ์ชิ้นงานภายในและปิดทับด้วยยางดิบจนได้ขนาดตามความต้องการ (ดังรูปที่ 3.9) จากนั้นทำการอบแบบพิมพ์ยางด้วยความร้อนเพื่อให้ยางที่อัดเป็นชั้นๆเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (ดังรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 แสดงการอัดพิมพ์ยางสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ

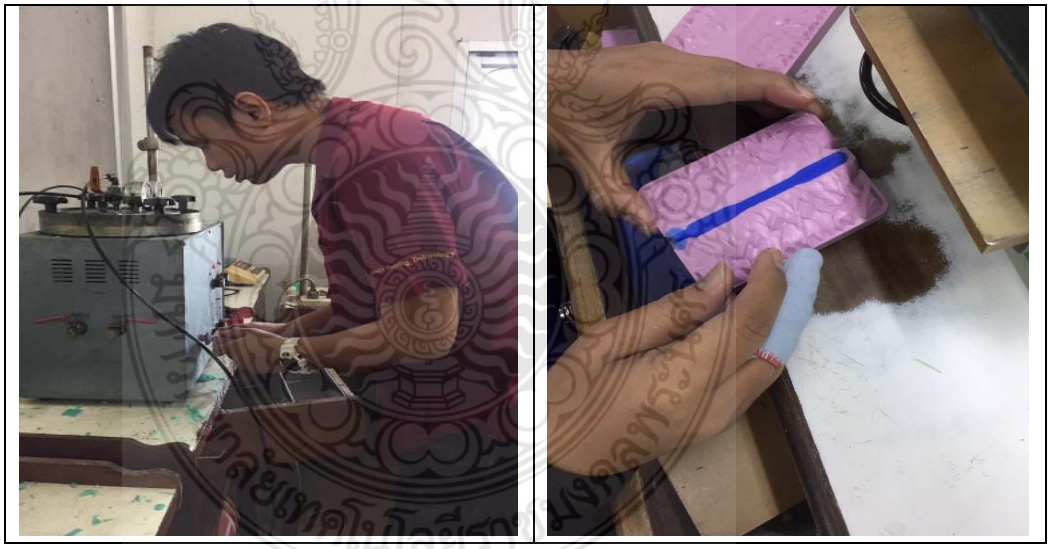
3.3.3 ขั้นตอนการผ่าพิมพ์ยาง

คือการผ่ายางเพื่อนำต้นแบบโลหะออกจากพิมพ์ยางในการผ่าพิมพ์ยางจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์เพื่อให้น้ำเทียนสามารถไหลเข้าไปยังแม่พิมพ์ได้ดีและไม่มีครีบหลังการฉีดเทียนฉะนั้นรอยกรีดต้องมีความคมเมื่อเวลาประกบกันทำให้ไม่เกิดช่องว่าง (ดังรูปที่ 3.11)

รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการผ่าพิมพ์ยางสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ

3.3.4 ขั้นตอนการฉีด Wax

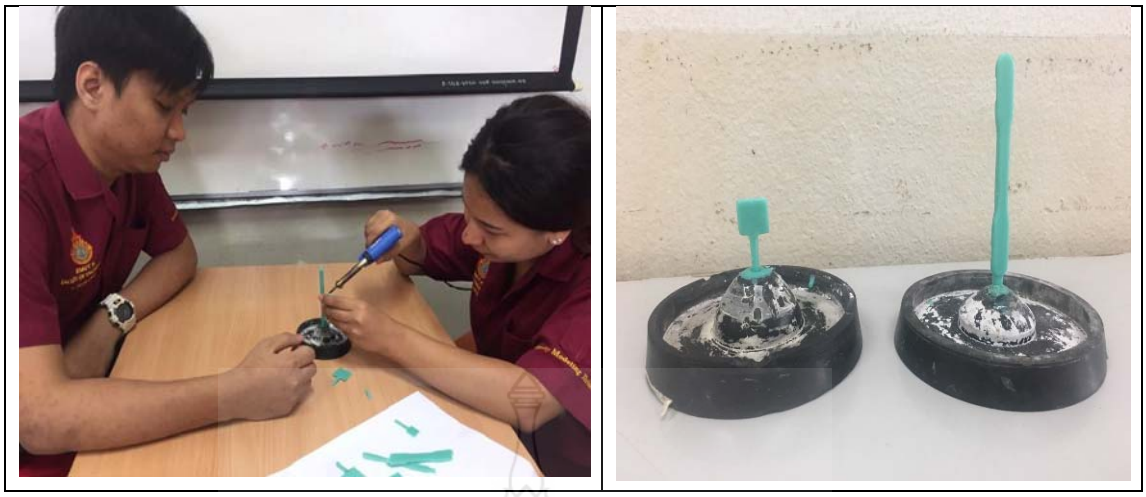
คือการฉีดน้ำเทียนเข้าไปยังพิมพ์ยางให้เต็มเพื่อให้เกิดชิ้นงานตามลักษณะที่ต้องการ และการติดต้นเทียนเพื่อนำไปสู่กระบวนการหล่อ (ดังรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 แสดงการฉีด Wax สำหรับทำชิ้นงานทดสอบ

3.3.5 ขั้นตอนการติดต้นเทียนสำหรับการหล่อ

การติดต้นเทียนคือการนำแบบเทียนที่ได้จากการฉีดและแต่งเรียบร้อยแล้วมาติดโดยรอบต้นโดยใช้หัวแร้งไฟฟ้าช่วยในการประสาน เมื่อติดต้นเสร็จแล้วจะนำไปสวมประกอบเข้ากับกระบอกเหล็ก ทำการเทปูนต่อไป (ดังรูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 แสดงการติดต้นเทียนสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ

กระบวนการหล่อคือ กระบวนการหล่อโลหะ คือ กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานวิธีหนึ่งที่ใช้โลหะหลอมเหลวในการสร้างชิ้นงาน หลักการสร้างชิ้นงานโดยการหล่อนั้นเริ่มจากการเทน้ำโลหะลงสู่ช่องว่างของวัสดุทนไฟที่เตรียมไว้ โดยช่องว่างดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานที่ต้องการหลังจากเทน้ำโลหะลงในช่องว่างแล้วก็จะปล่อยให้น้ำโลหะเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวได้ชิ้นงานหล่อออกมามีลักษณะใกล้เคียงชิ้นงานจริง ในการหล่อแท่งทดสอบจะมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการเทปูน

การเทปูนคือ การผสมปูนกับน้ำตามสัดส่วนหลังจากติดต้นเทียนเสร็จเรียบร้อย นำต้นเทียนใส่ฐานยาง และเทน้ำปูนที่ผสมเสร็จตามสูตรของปูนที่นำมาเพื่อการทดลองเทลงกระบอกปูนที่มีต้นเทียนในนั้นการเทปูนเพื่อเตรียมสร้างโพลงแบบก่อนกำจัดต้นแบบเทียนและส่วนของเทียนทั้งหมดออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อ ทำให้แม่พิมพ์ปูนเกิดเป็นโพรงด้นแบบขึ้นด้านใน พร้อมกับทางเดินน้ำโลหะ (ดังรูปที่ 3.14)

รูปที่ 3.14 แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์

3.4.2 การอบปูน

ในการอบปูนนั้นจะนำเบ้าที่เทปูนเสร็จแล้วเข้าเครื่องอบปูน ความร้อนในเตาอบจะช่วยในการกำจัดต้นแบบเทียนช่วงเวลาอบไล่เทียนใช้เวลา 3 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส และช่วยปรับอุณหภูมิของกระบอบหล่อให้มีความเหมาะสมกับอุณหภูมิในการหล่อในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการอบเบ้างานหล่อที่ 720 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 3.15)

รูปที่ 3.15 แสดงการอบปูน

3.4.3 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงาน

กระบวนการหล่อเป็นแนวทางการขึ้นรูปโลหะเพื่อการสร้างชิ้นทดสอบเพื่อการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยเลือกการหล่อด้วยระบบสุญญากาศเพราะเป็นการป้องกันมิให้เกิดการทำปฏิกิริยาขณะเกิดการหลอมละลายแสดงการหล่อชิ้นงานทดสอบ (ดังรูปที่ 3.16)

รูปที่ 3.16 แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ

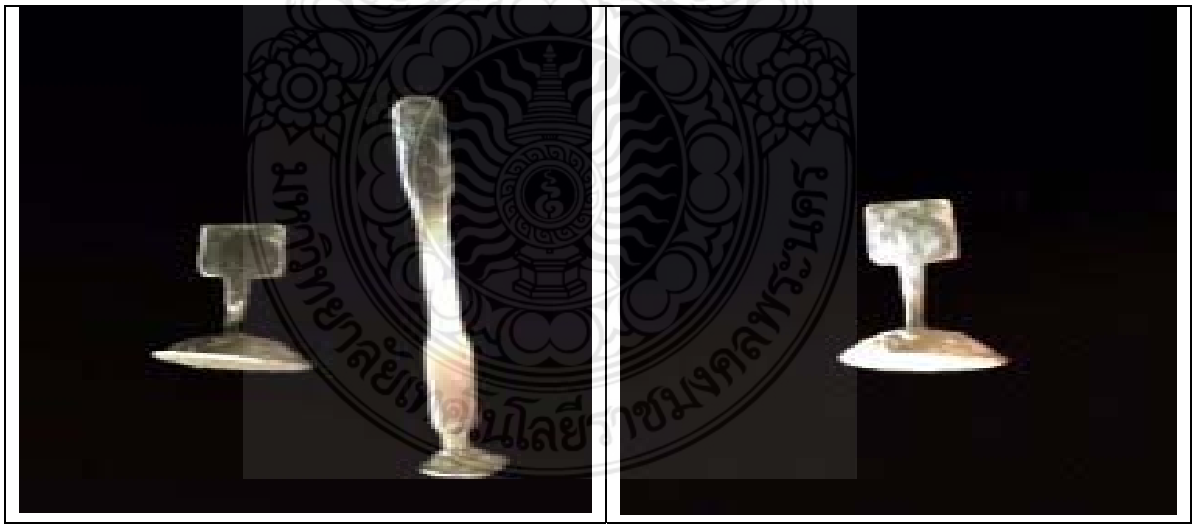
3.4.4 ขั้นตอนการล้างเบ้าโลหะหลังการหล่อ

การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ ควรพักกระบอกปูนหลังการหล่อไว้ 5-10 นาที เพื่อให้น้ำโลหะเกิดการเซตตัวหรือที่เรียกว่าการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งจากนั้นทำการล้างเบ้าด้วยน้ำเย็น เพื่อให้ปูนหลุดออกมาง่าย เมื่อชิ้นงานออกมาจากกระบอกโลหะแล้วให้ทำสะอาดชิ้นงานให้สะอาด (ดังรูปที่ 3.17)

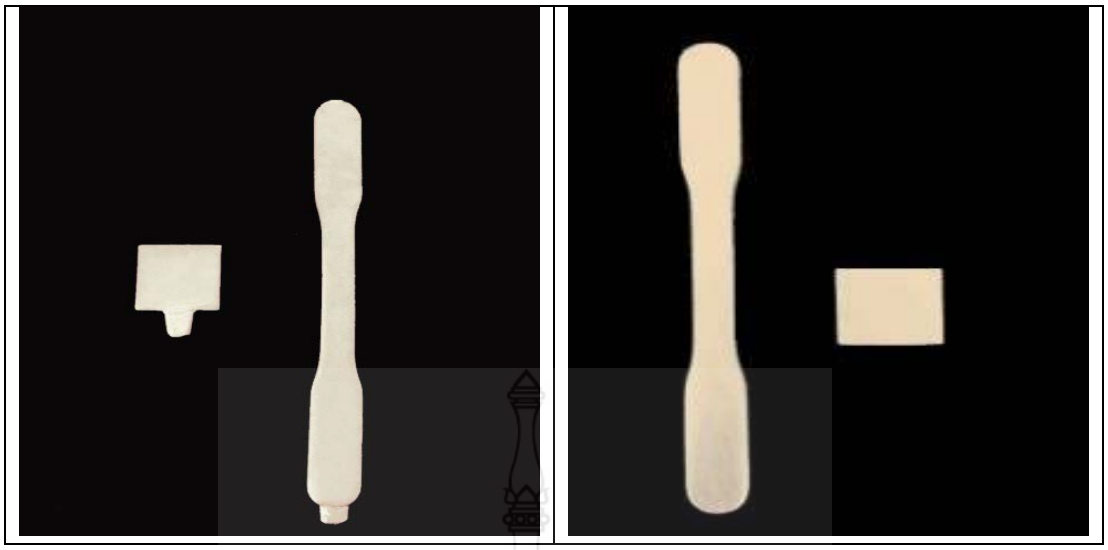
รูปที่ 3.17 การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ

3.4.5 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานและขัดแต่งชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการตัดแต่งเอาเฉพาะงานชิ้นทดสอบหล่อออกจากส่วนที่เป็นกิ่งก้านรูเทรูล้นออก (ดังรูปที่ 3.18) และรวมไปถึงขั้นตอนการตะไบแต่งผิวส่วนที่ไม่เรียบออกไป ชิ้นงานหล่อเพื่อชิ้นทดสอบจะถูกตัดโดยใช้เครื่องมือตัด เพื่อแยกชิ้นงานออกจากต้นไม้หรือฐานของมันและพร้อมเพื่อการทดสอบด้านต่างๆ (ดังรูปที่ 3.19)



รูปที่ 3.18 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป



รูปที่ 3.19 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการตัดต้น

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

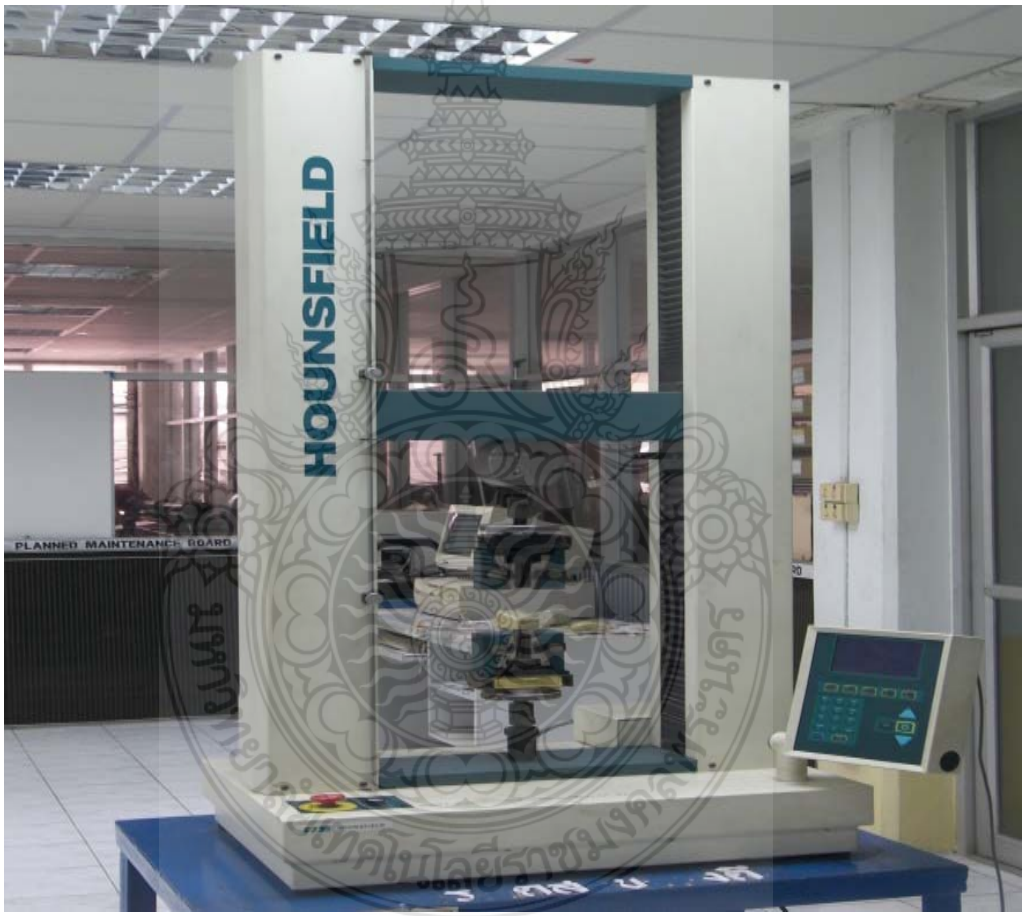
จากเม็ดอัลลอยที่มีความแตกต่างกัน ศึกษาและดำเนินการวิจัยส่วนผสมธาตุเจือของทองขาว 6k ธาตุทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) พาเลเดียม(Pd) สังกะสี(Zn) โดยจากการหลอมผสมโลหะให้ได้ส่วนผสมตามอัตราส่วน และทำการหล่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบทองขาว 6k จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณธาตุที่อัตราต่างๆ เป็นวิธีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ที่มีความรวดเร็ว สะดวกในการตรวจสอบ และมีความแม่นยำสูงของห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) อาคารไอทีเอฟ ทาวเวอร์ ชั้น 4 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพฯ 10500 (ดังรูปที่ 3.20)

รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ

(ที่มา:Download ห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) อาคารไอทีเอฟ ทาวเวอร์ ชั้น 4 ถนนสีลม)

3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การทดสอบความต้านแรงดึงของทองขาว 6k ชิ้นงานทดสอบเพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะทองผสม เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง ตามมาตรฐาน ASTM E 8 M – 99 ซึ่งมีสัดส่วนการเจือต่างๆ ดังแสดงใน (รูปที่ 3.21)



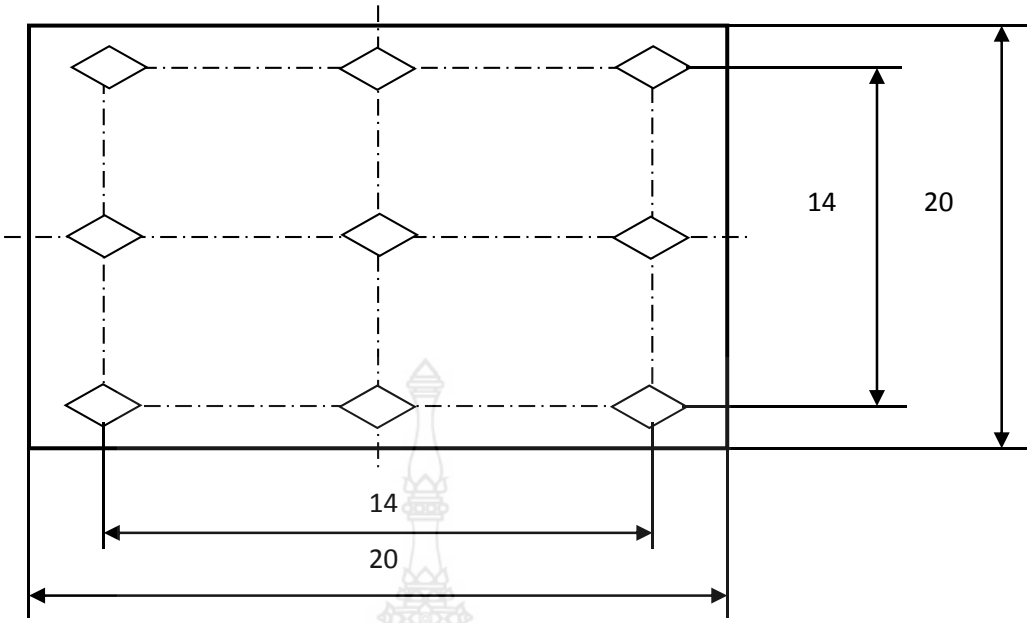
รูปที่ 3.21 ภาพแสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร)

3.7 การทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Hardness Testing Machine ของ Mitutoyo, Japan รุ่น MVK-H11 ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ที่ได้รับการสอบเทียบความแข็งกับแผ่นทดสอบความแข็งมาตรฐานก่อนการทดสอบชิ้นทดสอบทุกครั้ง

สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) เพราะสามารถทดสอบความแข็งโลหะที่ มีความแข็งแตกต่างกันได้ดีและยังสามารถเลือกแรงกดที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบได้ โดยแรงกดที่เลือกใช้คือ 9.81 N (HV) เวลาในการกดแช่ 30 วินาที การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งหน้าตัด 9 จุด ดังตำแหน่งการกดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.22 หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อต้องการทราบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

รูปที่ 3.22 ภาพแสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine) (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร)



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E 92-16 [9]

3.8 สรุป

จากการดำเนินการกระบวนการผลิตชิ้นงานทดสอบและการหาค่าทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และการทดสอบความแข็ง อันเป็นปัจจัยหลักของการทดสอบด้านอิทธิพลของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าความแข็ง) โดยการทดลองครั้งนี้ได้นำผลการทดสอบเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผลการทดสอบในบทต่อไป

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ผลการศึกษาในบทนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาพัฒนาส่วนผสมของธาตุเจือที่เหมาะสมของโลหะทองขาว 6k โดยทำการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลปริมาณของธาตุเจือเงิน ทองแดง พาเลเดียม และสังกะสี ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล การทดสอบความต้านทานแรงดึง และการทดสอบความแข็ง ซึ่งนอกจากนี้ผลของการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากว่า 20 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ

4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k โดยการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณธาตุที่อัตราต่างๆ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1-4.2 และชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนทั้งสี่ชนิด พบว่า โลหะผสมที่ได้ทุกสูตรที่ทำการผสมจริงมีอัตราส่วนและปริมาณแตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (X- ray Fluorescence Spectrometers) ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการสูญเสียปริมาณธาตุขณะทำการหลอมโลหะ จึงส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ตรวจพบมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง				
	Au	Ag	Cu	Zn	Pd
25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd	25	42	12	3	18
25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd	25	46	8	3	18
25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd	25	50	4	3	18
25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd	25	54	0	3	18

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาว 6k

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง				
	Au	Ag	Cu	Zn	Pd
25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd	25.41	53.70	13.53	1.82	5.43
25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd	25.77	59.86	8.69	-	5.68
25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd	25.46	60.38	6.60	1.96	5.49
25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd	24.83	64.40	1.74	3.58	5.37

หมายเหตุ ใบรายงานผลการวิเคราะห์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (GIT) ดังแสดงในภาคผนวก

4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k

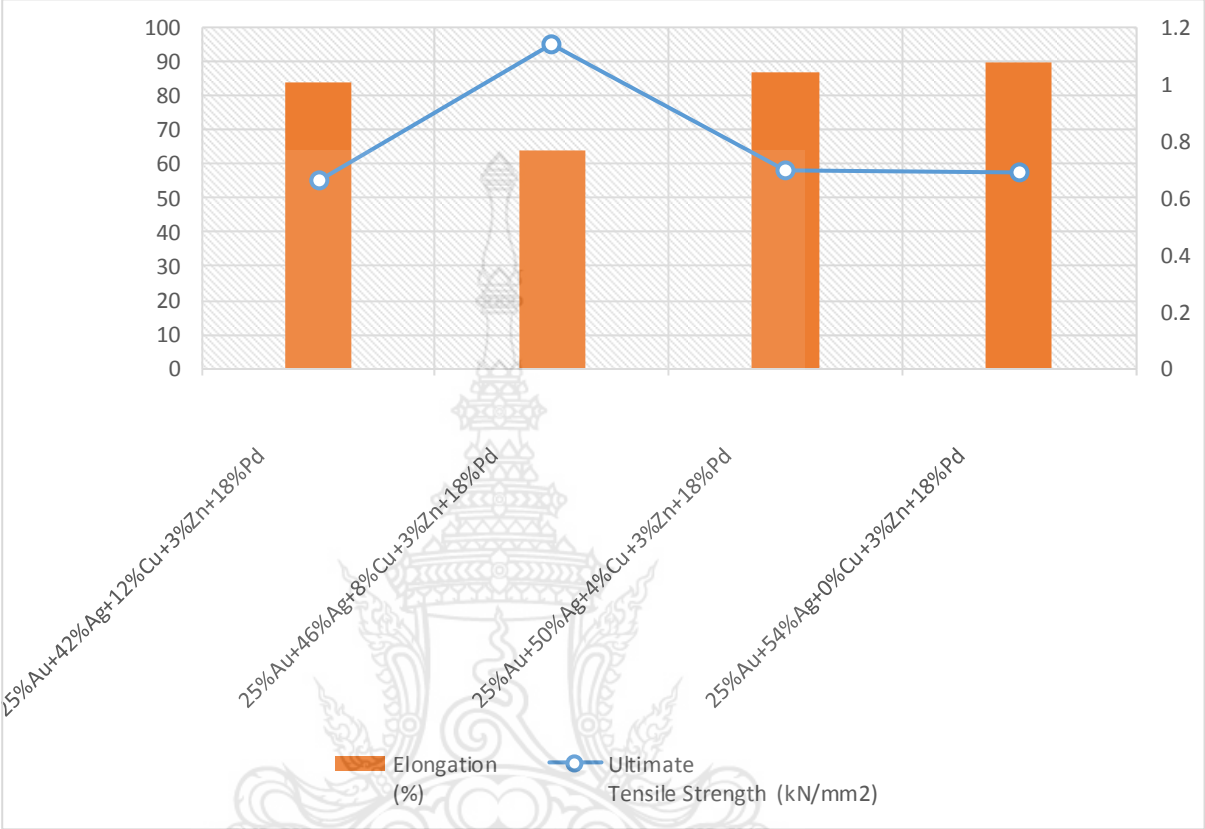
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ค่า Force Max. Strength Max., Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 จากผลการทดสอบ พบว่าค่า Force Max., Strength Max., Ultimate Tensile Strength ของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสม 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าสูงที่สุด และมีค่า Elongation ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆนอกจากนี้พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสม 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd, 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd และ 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd สมบัติทางกลแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้การที่อัตราส่วนผสมมีปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกันและอิทธิพลคุณสมบัติของธาตุแต่ละชนิดไม่เหมือนกันจึงทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงและมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงต่ำไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

อัตราส่วนผสม	Force Max. (kN)	Strength Maximum (MPa)	Ultimate Tensile Strength (kN/mm^2)	Elongation (%)
25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd	3.14	0.54	0.66	84
25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd	4.97	0.92	1.14	64
25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd	3.32	0.58	0.70	87

25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn +18%Pd	3.20	0.56	0.69	90



รูปที่ 4.1 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

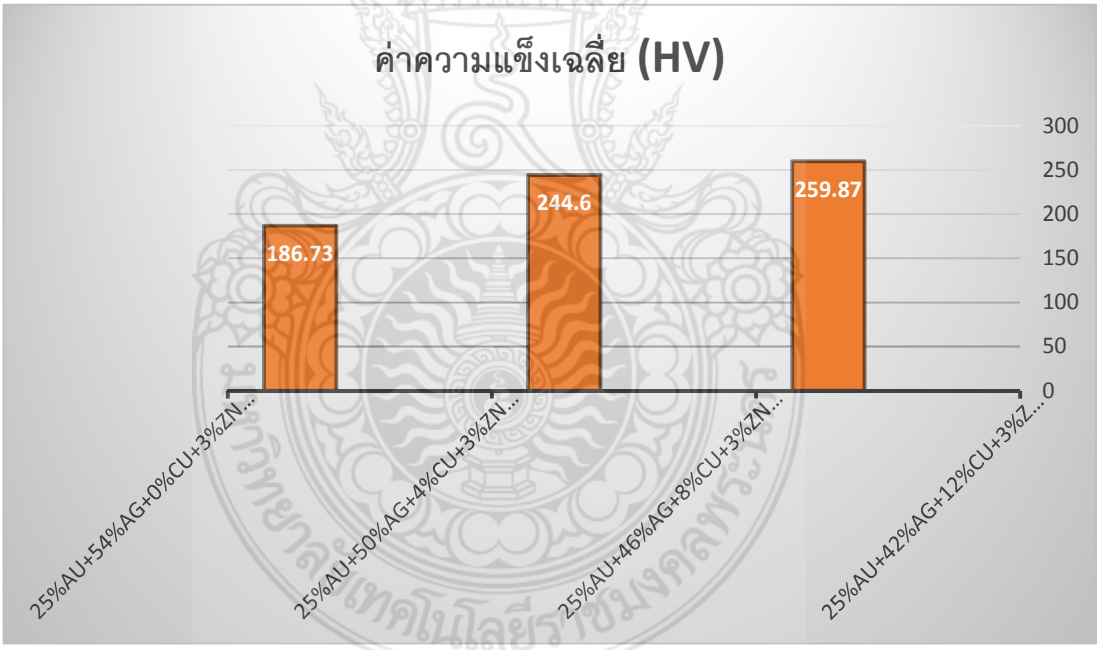
จากการศึกษาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k หลังเติมธาตุเงิน(Ag) ทองแดง (Cu) สังกะสี(Zn) และพาเลเดียม(Pd) เข้าไปในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในแต่ละด้านของชิ้นงานทดสอบ โดยเฉพาะค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) สามารถแสดงรายละเอียดค่าความแข็งดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 พบว่าโลหะทองขาว 6k ที่อัตราผสม 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงส่วนผสม ซึ่งเกิดจากการผสมทองแดงและสังกะสีผสมเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะสารละลายของแข็ง และตรงกับทฤษฎีพื้นฐานทางโลหะวิทยาที่โลหะผสมจะมีความแข็งแรงสูงสุดที่ส่วนผสมยูเทคติก และปริมาณทอง(Au) เงิน(Ag) และทองแดง(Cu) ที่ผสมเข้าไปมีปริมาณค่อนข้างมากจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่สูงกว่าโลหะทองขาว 6k ของส่วนผสมอื่นๆ ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสม 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd กับ อัตราส่วนผสม 25%Au+50%Ag+4%Cu3%Zn+18%Pd มีค่าความแข็งค่อนข้างใกล้เคียงกันมี

ค่าเท่ากับ 259.87 HV และ 244.60 HV ตามลำดับ และที่อัตราส่วนผสมโลหะทองขาว 6k 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 186.73 HV จากผลการทดสอบเป็นไปตามหลักทฤษฎีพื้นฐานทางโลหะ

1. ปริมาณของเงินที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความแข็งของส่วนผสมอัลลอย มีแนวโน้มลดลง
2. ปริมาณของทองแดงที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความแข็งของส่วนผสมอัลลอย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
3. ปริมาณของสังกะสีที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความแข็งของส่วนผสมอัลลอย มีแนวโน้มคงที่

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และพาเลเดียม(Pd) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีผลต่อค่าความแข็ง

อัตราส่วนผสม	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd	277.60
25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd	259.87
25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd	244.60
25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd	186.73



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาว 6k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

บทที่ 5
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อัลลอยสำหรับการผสมโลหะทองขาว 6k ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักของอัลลอยเกือบทุกส่วนผสมประกอบไปด้วยธาตุเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และพาเลเดียม(Pd) ดังรายละเอียด A)25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd B) 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd C) 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd และ D) 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd

สามารถสรุปได้ว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก หรือสารเจือหลักในอัลลอยทอง 6k ประกอบไปด้วย เงิน ทองแดง สังกะสี และพาเลเดียม โดยมีสารเจือหลักที่มีปริมาณเงินอยู่ในช่วงประมาณ 42-54% wt ทองแดงอยู่ในช่วงประมาณ 0-12% wt สังกะสีอยู่ในช่วงประมาณ 3% wt และพาเลเดียมอยู่ในช่วงประมาณ 18% wt ซึ่งเป็นตามโลหะวิทยาของทองคำเจือ หรือทองคำกะรัตโลหะผสมระบบ ทองคำ เงิน ทองแดงและสังกะสีที่แต่ละธาตุมีความสัมพันธ์กัน [2]

5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาสูตรการผสมโลหะทองขาว 6k โดยใช้วิธีการหลอมโลหะผสมเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องหล่อแบบสูญญากาศ และได้ทำการวิเคราะห์ศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึง และแรงกด) สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองขาว 6k มีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอม

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะทองขาว 6k สูตรส่วนผสม 25%Au+46%Ag+8%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.14 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 64% และมีค่าความแข็งเท่ากับ 259.87HV ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงออกมาแบบนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุจะเป็นแบบแข็งเปราะ (Brittle Material) เมื่อนำไปขึ้นรูปจะเกิดการแตกหักได้ง่าย และกระบวนการขึ้นรูปจะเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้จะพบว่าผลการทดลองอีก 3 สูตรส่วนผสมโลหะทองขาว 6k 25%Au+42%Ag+12%Cu+3%Zn+18%Pd, 25%Au+50%Ag+4%Cu+3%Zn+18%Pd และ 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 0.66-0.70 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง 84-90% และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 277.60, 244.60 และ 186.73HV ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมโลหะทองขาว 6k 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 90% และมีค่าความแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 186.73HV จะเหมาะสำหรับ

การขึ้นรูปเพราะมีคุณสมบัติแข็งเหนียว (Ductile Material) การขึ้นรูปจะทำได้ง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลที่ดีในการขึ้นรูปโลหะมีค่า ต่อไป

5.1.3 ส่วนผสมทางเคมีของอัลลอยสำหรับผสมโลหะทองขาว 6k สามารถแบ่งออกตามประเภท ได้ดังนี้

1) ส่วนผสมทางเคมีของอัลลอย ในระบบทองคำเจือที่อิงระบบทอง เงิน ทองแดง สารเจือหลัก ซึ่งมีผลในระบบส่วนผสมทองคำเจือที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับสีทองแดงและเงิน สามารถเพิ่มความแข็ง สารละลายจะเป็นส่วนผสมหลักโดยสารเจือหลักมีปริมาณเงินอยู่ในช่วงประมาณ 42-57% wt ทองแดงอยู่ในช่วงประมาณ 12-0% wt สังกะสีและพาเลเดียม คงที่ คือ 3 และ 18% wt ตามลำดับ

2) ส่วนผสมทางเคมีของทองคำกะรัตที่ได้จากนำทองบริสุทธิ์ผสมอัลลอยสำหรับผสมทองคำกะรัต ในระบบทอง เงิน ทองแดงและสังกะสี อิทธิพลของเงินที่มีต่อทองคำเจือ เงินเป็นโลหะที่ช่วยเพิ่มความแข็งเมื่อผสมลงไปในทองคำเจือมีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผสมทองแดงและสีที่เปลี่ยนแปลงไปทางขาว อิทธิพลของทองแดงที่มีต่อทองคำเจือทองแดงสามารถเพิ่มความแข็งให้กับทองคำเจือได้มากกว่าเมื่อเทียบกับเงินและสีที่เปลี่ยนแปลงไปทางสีแดง หรือชมพู อิทธิพลของสังกะสีที่มีต่อทองคำเจือ จะสงผลทำให้แนวโน้มของทองคำระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสีมีความแข็งน้อยลงกว่าทองคำระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดงลดการเกิดออกซิเดชั่น สีที่เปลี่ยนไปทางขาว และเพิ่มสภาวะการไหลลื่นในระบบทองคำเจือ ส่วนธาตุเจือพาเลเดียมจะช่วยให้โลหะมีความขาวและแวววาวเพิ่มมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะในส่วนของสูตร 25%Au+54%Ag+0%Cu+3%Zn+18%Pd เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโลหะทองขาว 6k มากที่สุดในการทดลองนี้ แต่ผู้วิจัยยังคงต้องเปรียบเทียบผลการวิจัยในเรื่องของการศึกษาอิทธิพลส่วนผสมโลหะทองขาว 6k ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) สำหรับกระบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาว 6k ซึ่งอยู่ในแผนงานวิจัยนี้ต่อไป

5.2.2 ควรทำการศึกษาระบบทองคำเจืออื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนผสมรองอีกหลายชนิดที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และระดับสีของทองคำกะรัตผสมอัลลอยของโลหะทองขาว 6k ในโครงการนี้เป็นเพียงตัวอย่างอัลลอยในระบบทองคำ-ทองคำและเงินมาตรฐาน และยังไม่ได้ทำการศึกษาในระบบทองคำเจือระบบอื่นๆ หรือส่วนผสมรอง จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยอิทธิพลของโลหะผสมรองชนิดต่างๆ ที่สามารถเข้าไปในโลหะทอง นอกเหนือจากระบบทองคำเจือระบบทองคำ-ทองแดง-เงินและสังกะสี

บรรณานุกรม

1. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,การใช้งานทองและทองผสม, การสัมมนาโครงการวิจัย คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ, 2541,76 หน้า
2. สมนึก วัฒนศรียกุล. การทดสอบวัสดุ (Material Testing). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549. หน้า 13-19
3. A.S. McDonal, and G.H.Sistare. The Metallurgy of Some Carat Gold Jewelry Alloys. Gold Bulletin Volume 11 No.3 1978: 66-73 pp.
4. Katsuhiro Yasuda. Age Hardening and Relate Phase Trans for major in Dental Gold Alloys. Gold Bulletin.20 1982 : 90-103 pp.
5. Dieter Ott. Optimizing Gold Alloys For The Manufacturing Process. Gold Technology, Issue No.34, World Gold Council, 2002, 37-44 pp.
6. Medeleinc du Toit, Elma van der Lingen, Lizelle Glaner, Rainer Suss. The Development of a Novel Gold Alloy with 995 Fineness and Increased Hardness Gold Bulletin. Volume 35 Noi.2 2002 : 46-52 pp.
7. Ing. F.Arbini, Ing.ARicci, Prof.Ing.M.Rosso. Effect of Cobalt Additions on the Properties of 5N Red Gold Alloys. Gold Technology, Issue No.25, World Gold Council, 1999, 11-19 pp.
8. Dave Sehneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
9. Cristopher W. Corti. Assaying of Gold Jewelry-Choice of Technique. Gold Technology, Issue No. 32, World Gold Council, 2001, 20-30 pp.
10. Gold Technology, Issue No.1 : Gold Alloy Data, World Gold Council,1990,6-17 pp.
11. Cristian Cretu, Elma van der Lingen. Colored Gold Alloys. Gold Technology, Issue No.30, World Gold Council, 2000, 31-40 pp.
12. Deuiseh Normen. DIN 8238 Colors of Gold. August 1996.
13. Dave Sehneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
14. Gunter Petzow, Metallography Etching, ASM, Ohio, 1998, 43-46 pp.

ภาคผนวก

ใบรายงานผลการวิเคราะห์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายธีระวัฒน์ แม้นด้วง

(ภาษาอังกฤษ) Mr.Teerawat Mandoung

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวกพร้อมหมายเลขโทรศัพท์โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์: 0-2836-3000 ต่อ 4187 โทรศัพท์มือถือ: 08-5523-6634
โทรสาร: 0-2836-3000 ต่อ 4187
E-mail: teerawat_gt@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ–เครื่องมือกล คณะวิศวกรรมเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วศ.ม. เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

การทดสอบทางกล, ไทรโบโลยี, ปรับปรุงสมบัติโลหะมีค่าสำหรับการผลิตเครื่องประดับ, การหล่อเครื่องประดับ, การปรับปรุงสมบัติทางกลและไทรโบโลยีของ UHMWPE ด้วยไมโคร-นาโนฟิลเลอร์และเทคนิคทางกล, Precious Metal Metallurgy, Investment Casting, Metal Thermal Processing, Polymer Tribology

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย :

1. การศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2557
2. การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2560

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย :-

1. การศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) และพฤติกรรมความต้านทานการหมองของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2557

2. การศึกษาและพัฒนาส่วนผสมโลหะของน้ำประสานทองสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับทอง 18k เพื่อเพิ่มมูลค่า ทุนสนับสนุนงานวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) 2558

3. การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติทางกลของตะกรันอลูมิเนียม ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2559

4. การศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาว 6k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2560

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

<u>หัวหน้าโครงการ</u>

1. T.Mandoung , S.V.panin , L.R.Ivanova , L.A.Kornienko “Influence of Polypropylene onto Wear Resistance and Tensile Property of UHMWPE-based Composites” 6th International Scientific Conference «Modern Problems of Engineering» 28 September - 2 October 2011 Tomsk, Russia

<u>ผู้ร่วมโครงการ</u>

1. S.V.panin, L.A.Kornienko, L.R.Ivanova, S.Piriyaon, T.Poowadin, T.Mandoung ,N.Sonjaitham , S.V.Shilko and V.P.Sergeev, “Design of Polymeric UHMWPE-Based Composites with Increased Tribotechnical Properties By Mechanical Activation Ion Implantation , Chemical Modification and Nanofiller Enforcement”, 3rd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2011), 22-26 May 2011, Shanghai (Chong Ming Island), China.

2. S.V. Panin ,L.A. Kornienko , T. Poowadin, S. Piriyaon , T. Mandoung, N. Sonjaitham , L.R. Ivanova , V.P. Sergeev and S.V. Shilko , “Effect of Chemical Modification and High-Energy Irradiation onto Physical-Mechanical Properties of UHMWPE-Based Nanocoposites”. 4th National Conference on Nanomaterial, 1-4 Mach 2011, Moscow, Russia. P. 472