



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค (ความแตกต่างของระดับสี) และพฤติกรรมการต้านกันหมองของทองขาวเจือต่ำ 8k

A Study and Analysis Influence of Silver Gold Copper Sing Ting Alloying Element onto Mechanical Properties and Microstructure (Specified a Colored Difference) and Anti Tarnish Behavior of Low Gold Alloys 8wt% Ag Au Cu Zn Sn

อาวุธ ฉายศิริ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ

พ.ศ. 2561 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ
อธิการบดี รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา และคณบดีคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของ
อาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครมาตั้งแต่เริ่มต้น ทำนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้
สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับการผลิตชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ โดยการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือโลหะเงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค (ความแตกต่างของระดับสี) และพฤติกรรมความต้านทานหมองของทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ผลการทดลอง พบว่าจากการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองขาวเจือดำ 8k มีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอมแบบหล่อเหวี่ยง ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ส่วนผสม $33.33\%Au+50.67\%Ag+10\%Cu+5\%Zn+1\%Sn$ มีค่า Ultimate Tensile Strength ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.54 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 55% และมีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 137.0HV ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงออกมาแบบนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุจะเป็นแบบเปราะ (Brittle Material) เมื่อนำไปขึ้นรูปจะเกิดการแตกหักได้ง่าย และกระบวนการขึ้นรูปจะเป็นไปได้ยาก แต่ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสมนี้มีค่าระดับสีของโลหะมีค่าระดับสีที่ดีที่สุดคือ มีค่าความสว่าง $L^* = 74.87$ มีค่า $a^* = -0.89$, $b^* = 13.74$ และมีค่า ΔE ที่มีระดับความแตกต่างของระดับสีน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.35 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบของโลหะทองขาวเจือดำ 8k มีสีค่อนข้างเขียวมากและออกมาค่อนข้างเหลืองเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระดับสีสีน้ำเงินที่มีค่าเข้าใกล้กับเส้นมาตรฐาน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k ต่อไป นอกจากนี้ยังจะพบว่าผลการทดลองชิ้นงานทดสอบอีก 2 สูตรส่วนผสมของโลหะทองขาวเจือดำ 8k $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$, $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+8\%Zn+0\%Sn$ มีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 1.10, 0.60 kN/mm^2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง 70, 61% และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 115.6, 123.3HV ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 70% และมีค่าความแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 115.6HV จะเหมาะสำหรับการขึ้นรูปเพราะมีคุณสมบัติเหนียว และยืดได้ดี (Ductile Material) การขึ้นรูปจะทำได้ง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลที่ดีในการขึ้นรูปโลหะมีค่า ต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k, กระบวนการขึ้นรูป, คุณสมบัติทางกล

Abstract

This Research is a Development of 8k White Gold low Alloy Metal Components for Jewelry Pieces. By Study and Analyze the Influence of Silver Alloy, Gold Alloy, Bronze Alloy, Zinc Alloy and Tin Alloy. Which Affect Microstructure and Mechanical Properties. (The Different of Color Scales) And Resistance Behavior of Lowered 8k White Gold Alloy in Varies Ratio.

The Results Showed that Tests and Analysis to Find the Quantities of Elements has found out that Chemical Components of 8k White Gold Low Alloy Metal had a Little Different Quantities when Compared Between Before and After Centrifugal Casting Process. The Tests and Analysis Results of Mechanical Properties of Test Pieces Showed that the Hardness and Tensile Strength of 8k White Gold Low Alloy Metal with Mixture of $33.33\%Au+50.67\%Ag+10\%Cu+5\%Zn+1\%Sn$ had Minimum Ultimate Tensile Strength Equal 0.54 kN/mm^2 , Minimum Elongation Percentage of 55% and Maximum Hardness of 137.0 HV. The Test Results also Show that the Mechanical Properties of the Material are Brittle Material. When Perform a Forming Process, the Pieces will be Easily Broken which was Meant that the Forming Process would be Difficult. But The Color Level of the Test Pieces at this Composite Ratio had the Best Metal Color Level. The Brightness $L^* = 74.87$ was $a^* = -0.89$, $b^* = 13.74$ and the Value of ΔE with the Lowest Color Difference Level of 1.35. Compared to other Varies Ratio. It Showed that 8k White Gold Low Alloy Metal Test Pieces were Very Green and Came out Slightly Yellow Compared to the Blue Line that Approached the Standard Line. These Properties were the Physical Properties Required in 8k White Gold Low Alloy Metal Jewelry Pieces Production. Also there were the Results of 8k White Gold Low Alloy Metal in Two Formulas $8k \ 33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$, $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+8\%Zn+0\%Sn$. These Formulas had Tensile Strength in the Range of 1.10, 0.60 kN /mm², Elongation Percentage in the Range of 70, 61% and Hardness of 115.6, 123.3HV, Respectively. The Results of the Mechanical Properties Test of the Test Pieces Showed that 8k White Gold Low Alloy Metal $33.33\% Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ has Similar Tensile Strength but Maximum Elongation Percentage of 70% and Minimum Hardness of 115.6HV. Which was Suitable for Forming Because of good Ductility and Stretchness Properties (Ductile Material). Forming would be Easy. These were Good Mechanical Properties for Forming Precious Metals.

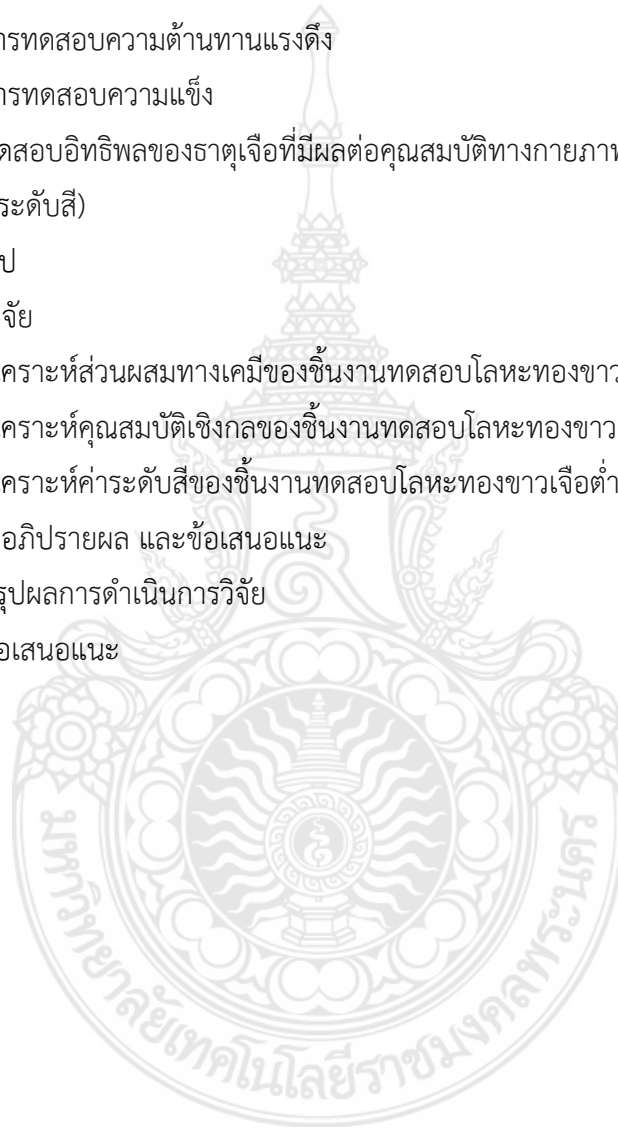
Keywords : 8k White Gold Low Alloy Metal Jewelry, Forming Process, Mechanical Properties

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| Abstract | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญภาพประกอบ | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย | 3 |
| 1.5 สมมุติฐานงานวิจัย | 6 |
| 1.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย | 6 |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 6 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 ทฤษฎีทองคำ | 8 |
| 2.2 โลหะวิทยาของทองคำเจือหรือทองคำกะรัต | 11 |
| 2.3 อิทธิพลธาตุของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของทองคำ | 15 |
| 2.4 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง | 27 |
| 2.5 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) | 37 |
| 2.6 การทดสอบแรงดึง (Tension Test) | 39 |
| 2.7 สี (Color) | 40 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 45 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | |
| 3.1 แผนการดำเนินงาน | 47 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ | 48 |
| 3.3 ขั้นตอนการติดตั้งเทียนสำหรับการหล่อ | 53 |
| 3.4 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ | 54 |
| 3.5 ขั้นตอนการทดสอบ | 58 |
| 3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง | 58 |
| 3.7 การทดสอบความแข็ง | 59 |
| 3.8 ทดสอบอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) | 61 |
| 3.9 สรุป | 61 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย | |
| 4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k | 62 |
| 4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k | 63 |
| 4.3 วิเคราะห์ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k | 65 |
| บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย | 69 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 70 |
| บรรณานุกรม | 72 |
| ภาคผนวก | 73 |
| ประวัติย่อผู้วิจัย | 74 |

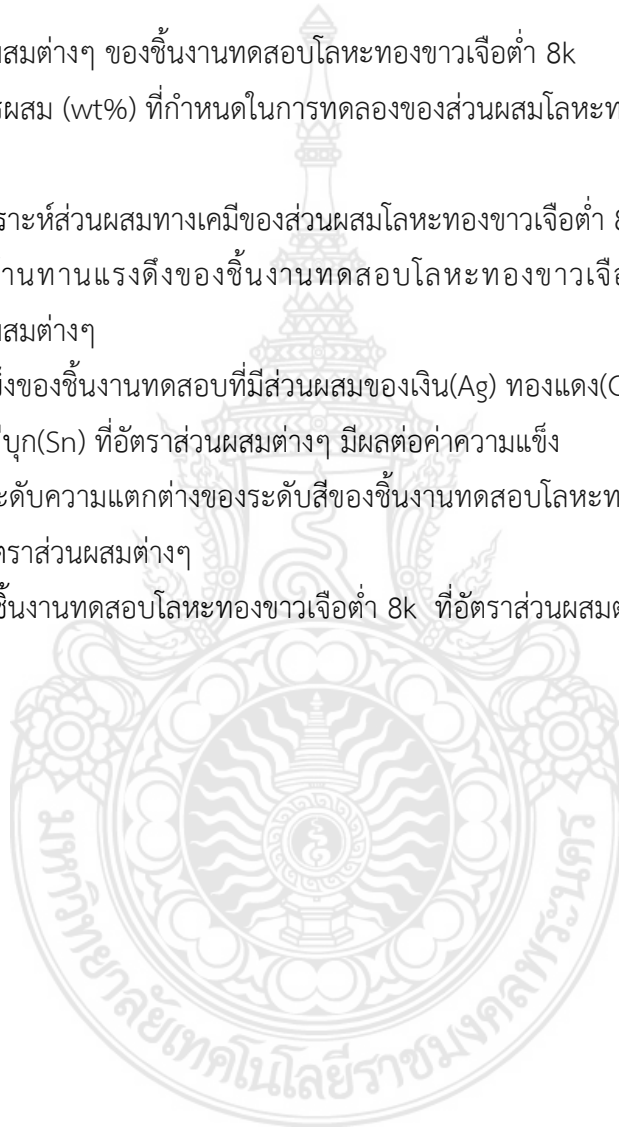


สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|---|----|
| 1.1 | ระยะเวลาและแผนการดำเนินโครงการวิจัย | 5 |
| 2.1 | สมบัติทางกายภาพของทองคำ | 9 |
| 2.2 | สมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป | 10 |
| 2.3 | การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในทองคำกะรัตต่างๆ | 11 |
| 2.4 | สมบัติพื้นฐานของเงินและทองแดง | 16 |
| 2.5 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุเจือ สีและสมบัติที่เกิดขึ้นของทองคำ | 16 |
| 2.6 | แสดงตารางถึงผลของธาตุทองแดงในปริมาณต่างๆ ในโลหะทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน- ทองแดง หลังจากผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด 15% 30% และ 60% | 19 |
| 2.7 | หน้าที่ของธาตุเจือในลักษณะธาตุเจือรองที่เป็นตัวเติม และสารมลทินที่เติมลงในทองคำเจือ | 21 |
| 2.8 | แสดงผลดีและผลเสียของธาตุเจือรองที่ผสมทองไปในทองคำเจือ | 21 |
| 2.9 | ค่าความแข็ง HV 10 ของทองคำเจือธาตุเจือชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันและอัตราการขึ้นรูปต่างๆ | 23 |
| 2.10 | ค่าความแข็งของทองคำเจือที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของธาตุเจือต่างๆ | 23 |
| 2.11 | ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่างๆ | 28 |
| 2.12 | คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส | 29 |
| 2.13 | ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ | 30 |
| 2.14 | ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM | 30 |
| 2.15 | คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน | 31 |
| 2.16 | แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ | 34 |
| 2.17 | ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ | 35 |
| 2.18 | ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง | 36 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.19 | ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาการรับแรงดึง (DIN 50125) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (สมนึก วัฒนศรีกุล, 2549: 17) สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือตั้ 8k | 39 |
| 3.1 | อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือตั้ 8k | 52 |
| 4.1 | สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือตั้ 8k | 62 |
| 4.2 | ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือตั้ 8k | 63 |
| 4.3 | ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือตั้ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ | 63 |
| 4.4 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี (Zn) และดีบุก(Sn) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีผลต่อค่าความแข็ง | 65 |
| 4.5 | พิกัดและระดับความแตกต่างของระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือตั้ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ | 66 |
| 4.6 | พิกัดสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือตั้ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ | 66 |



สารบัญภาพประกอบ

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเงินในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน – ทองแดง | 12 |
| 2.2 แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนของแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเงินในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ – เงิน-ทองแดง | 13 |
| 2.3 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเงินในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเงิน | 13 |
| 2.4 ภาพตัดในแนวตั้งที่ 18 14 และ 10 กระรัต บนแผนภาพสมดุล ทองคำ-เงิน-ทองแดง | 14 |
| 2.5 แผนแสดงสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน | 17 |
| 2.6 แผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-ทองแดง | 18 |
| 2.7 การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างระเบียบโครงสร้างมีระเบียบ | 18 |
| 2.8 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของทองคำ | 22 |
| 2.9 แผนภาพสมดุลทองคำ-ดีบุก (ที่มา : ASM International Handbooks) | 24 |
| 2.10 แผนภาพสมดุลทองคำ-พลวง (ที่มา : ASM International Handbooks) | 26 |
| 2.11 แผนภาพสมดุลทองคำ-เจอมาเนียม (ที่มา : ASM International Handbooks) | 27 |
| 2.12 แผนภาพสมดุลทองคำ-ซิลิกอน (ที่มา : ASM International Handbooks) | 27 |
| 2.13 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง | 32 |
| 2.14 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน | 36 |
| 2.15 ลักษณะห้วงกุดและรอยกุดของการทดสอบความแข็ง Vickers | 38 |
| 2.16 ลักษณะชั้นทดสอบภาคตัดวงกลม (สมนึก วัฒนศรัยกุล, 2549: 13) | 39 |
| 2.17 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุทึบแสง | 41 |
| 2.18 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส | 42 |
| 2.19 ระบบสี CIELAB (ที่มา : HunterLab) | 44 |
| 3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน | 47 |

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 3.2 | แสดงลักษณะโลหะทองคำที่ใช้การทดลอง | 48 |
| 3.3 | แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| 3.4 | แสดงลักษณะโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง | 50 |
| 3.5 | แสดงลักษณะสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง | 51 |
| 3.6 | แสดงลักษณะดีบุกที่ใช้ในการทดลอง | 52 |
| 3.7 | แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8K | 53 |
| 3.8 | แสดงการติดต้นเทียนสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ | 54 |
| 3.9 | แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์ | 55 |
| 3.10 | แสดงการอบปูน | 55 |
| 3.11 | แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ | 56 |
| 3.12 | การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ | 57 |
| 3.13 | ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป | 57 |
| 3.14 | เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ | 58 |
| 3.15 | ภาพแสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย) | 59 |
| 3.16 | ภาพแสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine) (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร) | 60 |
| 3.17 | ตำแหน่งการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E 92-16 [9] | 60 |
| 4.1 | กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ | 64 |
| 4.2 | กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ | 65 |
| 4.3 | กราฟแสดงค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบ | 67 |
| 4.4 | กราฟแสดงค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบ | 68 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทอง k โดยทั่วไปคนส่วนมากมักจะรู้จักและเคยได้ใช้สินค้ากลุ่มนี้มาบ้าง เช่นทอง 9k, 10k, 14k, 18k, 21k, 22k ที่ใช้ขึ้นรูปเครื่องประดับรูปลักษณะต่างๆ ที่ผู้ประกอบการทั่วไปผลิตและจำหน่ายในปัจจุบัน มีทั้งการขึ้นรูปด้วยมือและการหล่อขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้สอยและความสะดวกในการใช้งาน สำหรับทอง 8k ที่จะกล่าวถึงนั้น ไม่เป็นที่นิยมกันในต่างประเทศเพราะส่วนผสมที่ต่ำ แต่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันในหมู่คนไทย จากอดีต จนถึงปัจจุบัน ทำเป็นเข็มขัด สร้อยคอ แหวน กำไล และกำไลข้อเท้า เด็ก คนไทยจะรู้จักในชื่อ นาค นิยมนำมาหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและชิ้นส่วนตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อทำการฝังอัญมณีเพิ่มบนตัวเรือนเครื่องประดับ และการขัดแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จรูป ทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มมากขึ้น ทองขาว 8k ที่ผู้วิจัยมีความต้องการทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นมุ่งหวังที่จะพัฒนางานในด้านวัสดุทดแทน หรือวัสดุทางเลือกที่มีค่าในรูปแบบอื่น เพื่อการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งอุตสาหกรรมจิ๋วเวลรี่ และอุตสาหกรรมนาฬิกา ผู้วิจัยมุ่งหวังที่จะทำการวิจัยทองขาว 8k หรือในชื่อ (นาคขาว) สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นที่นิยมและเป็นที่รู้จักมากขึ้นในอนาคต เพื่อสอดคล้องกับภาวะปัจจุบัน ที่ราคาทองสูงขึ้น แต่รายได้ต่ำลง ด้วยสาเหตุปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจทั้งในและนอกประเทศ จึงต้องมองหาเครื่องประดับที่มีลักษณะคล้ายทองและสวยงาม ด้วยคุณสมบัติของทองขาว 8k ที่มีความแข็งแรงยังสามารถนำมาใช้ผลิตสปริงล๊อค หรือบานพับ ขาต่างหูที่ต้องการความแข็งแรงและแรงตีดกลับของชิ้นส่วนต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการประกอบชิ้นส่วนตัวเรือนเครื่องประดับ หรือส่วนที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับที่ราคาถูกแต่รูปลักษณะเหมือนกับเครื่องประดับทองขาว 9k, 10k, 14k, 18k, 21k หรือ 22k เป็นต้น

เมื่อกล่าวถึงขั้นตอนการประกอบตัวเรือนเครื่องประดับที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่า มีการใช้ในส่วนที่สำคัญในการใช้งานคือ การทำส่วนประกอบของสปริง ลีนสปริง และบานพับ ที่ใช้กับสร้อยข้อมือ สร้อยคอที่ยังรวมไปถึง ข้อต่อบานพับของกำไล หรือบานพับของขาต่างหู และสปริงก้านต่างหู โดยการประกอบมีส่วนที่ต้องเชื่อมประสานด้วยเปลวไฟจากหัวเชื่อม และการเชื่อมประสานด้วยเลเซอร์หรือยิงจุดต่อด้วยหมุด ซึ่งขั้นตอนการเชื่อมประสานทั้ง 3 วิธี บางวิธีเป็นการเชื่อมด้วยไฟ อาจทำให้คุณลักษณะความแข็งแรงและทำให้ตัวโลหะคลายความแข็งแรง และไม่สามารถตีดกลับเหมือนก่อนโดนไฟ จึงต้องหาส่วนผสมที่คงรูปและความแข็งแรงอยู่ได้หลังโดนไฟ หรือจะต้องใช้วัสดุตัวประสานในการเชื่อมประสานที่วิ่งเร็วใช้ความร้อนต่ำละลายเร็ว และไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสปริง และสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงหรือคืนรูปได้ ในเรื่องของสีผิวจะต้องมีระดับสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือน แต่จะต้องมีจุดหลอมละลายสูงกว่าวัสดุตัวเรือน และนอกจากนี้ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาผู้ประกอบการผลิตเครื่องประดับของไทยไม่มีองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโลหะวิทยาและธาตุเจือที่ให้สมบัติต่างๆ ที่มีคุณภาพ

ที่ดีที่สุดในเรื่องของความสามารถในการติดตัว ที่ใกล้เคียงกับวัสดุอื่นเช่น นิกเกิล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับวัสดุตัวเรือนเครื่องประดับแต่ละชนิด

จากการศึกษาปัญหาด้านผลเสียจากกระบวนการผลิต หรือเกิดจากการประกอบชิ้นส่วนย่อยของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทราบปัญหาในเรื่องของการประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งพบว่า วัสดุประกอบตัวเรือนเครื่องประดับมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเครื่องประดับ ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ หรือตัวเรือนเครื่องประดับ ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยทองขาวเจือดำที่มีผลต่อขบวนการผลิต การหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องประดับทองขาวเจือดำ 8k เพื่อหาอัตราส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม และหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติของความแข็ง และนำไปเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับทั้งภายในและต่างประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลธาตุเจือโลหะเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลของทองขาวเจือดำ 8k

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือโลหะเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) และพฤติกรรมความต้านทานการหมองของทองขาวเจือดำ 8k

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและดำเนินการวิจัยส่วนผสมธาตุเจือของทองขาวเจือดำ 8k ธาตุทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn)

สูตร 1 : 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn

สูตร 2 : 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn

สูตร 3 : 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn

1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมี คุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึง, ค่าความแข็ง)

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

1.3.4 ศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) และพฤติกรรมการต้านทานการหมองของโลหะทองขาวเจือดำ 8k

1.3.5 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) ดีบุกบริสุทธิ์ 99.99% ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด

1.4.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์สำหรับการหล่อหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นสอบนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าหลอมโลหะ ปูนสำหรับทำแบบหล่อ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง และเทียนสำหรับฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียน
- 2) วัสดุสำหรับการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วย กระจกทราย ผ้าขัด ผงเพชรขนาดต่างๆ และสารเคมี

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

- 1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการหลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งประกอบไปด้วย

หลอมผสมเทเมต์โลหะ เครื่องหล่อตูดสูญญากาศและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ (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) การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบสำหรับการวิจัยนี้ ดำเนินการโดยการหลอมโลหะทองขาวที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ซึ่งทำการหลอมส่วนผสมด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

สภาวะของการหลอมผสมเทเมต์โลหะเพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบ

- 1) อัตราส่วนผสมของเมต์โลหะประกอบด้วย Au+Ag+Cu+Zn+Sn
- 2) ความจุของการหลอมผสมโลหะครึ่งละ 1/2 กิโลกรัม
- 3) อุณหภูมิหลอมผสมโลหะ 1,150°C

2) การหล่อหลอมขึ้นรูปชิ้นทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ได้ดำเนินการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบเป็นแท่งดัมเบล สำหรับการวิเคราะห์สมบัติความต้านแรงดึงโดยตัวแบบเทียนของชิ้นทดสอบ สำหรับการหล่อขึ้นรูปได้จากการฉีดเทียนเข้าไปในโพรงแบบซิลิโคน สำหรับในส่วนขึ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง ชิ้นทดสอบถูกกำหนดให้มีขนาด 20×20×3 mm ซึ่งตัวแบบเทียนทั้งหมดจะถูกนำไปติดเป็นต้นเทียนสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยขบวนการหล่อเหวี่ยง

3) การทดสอบความต้านแรงดึงของโลหะทองขาวเจือดำ 8k เพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะทองขาว เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบพลาสติกและโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง โดยทำการทดสอบแรงดึงอัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น และเงื่อนไขการทดสอบเพิ่มความเค้นไม่เกิน 10 N/mm²ต่อวินาที ขนาดของชิ้นทดสอบช่วง Gauge length มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 mm ยึดถือตามมาตรฐาน ASTM E 8 M – 99

4) การทดสอบความแข็งของโลหะทองขาวเจือดำ 8k เป็นการตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Hardness Testing Machine ของ

| | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 9. สรุปผลการทดลองโครงการวิจัย และจัดทำรายงาน และส่งรายงานฉบับสมบูรณ์พร้อมถ่ายถอดองค์ความรู้ | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

กระบวนการผลิตเครื่องประดับประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตหลักๆ คือ การหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและชิ้นส่วน การเชื่อมประสานประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ การฝังอัญมณีบนตัวเรือนเครื่องประดับ และการขัดแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จรูป ซึ่งกระบวนการหล่อเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในขั้นตอนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของธาตุต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของทองขาวเจือดำ 8k สำหรับผลิตชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ (นาฬิกา) เพื่อให้ได้คุณสมบัติชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในแต่ละด้านต่อไป

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

การศึกษาวิจัยในโครงการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะทองขาว 8k สำหรับการผลิตชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวและปรับปรุงสมบัติทางกล ความเงา และแก้ปัญหาการเกิดข้อบกพร่องต่างๆ ของชิ้นงานเครื่องประดับเงินจากขบวนการหล่อขึ้นรูป โดยเฉพาะที่ปริมาณส่วนผสมของทองแดง (Cu) ที่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การเกิดคุณภาพผิวงานในลักษณะต่างๆ ทั้งภายนอกสภาพหล่อขึ้นรูปและภายในสภาพหลังทำการขัดเงาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับให้มีคุณภาพต่อไป

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

17.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในรูปแบบขององค์ความรู้สำหรับการ เผยแพร่ในวารสารและการนำไปใช้ประโยชน์ ประกอบด้วย

1. ได้ทราบข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือโลหะเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของทองขาวเจือดำ 8k
2. ได้ทราบข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือโลหะเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) และพฤติกรรมความต้านทานการหมองของทองขาวเจือดำ 8k
3. สามารถผลิตทองขาวเจือดำ 8k สำหรับผลิตชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ (นาฬิกา) ในเชิงพาณิชย์ และรูปแบบการค้า ต่อไป

4. ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปสู่การพัฒนาในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ที่รัฐบาลประกาศสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ
 5. สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัย ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ และดำเนินการจดสิทธิบัตร/ลิขสิทธิ์/เครื่องหมายการค้า ต่อไป
- 17.2 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ทั้งภาครัฐ และภาคเอกชน (ในด้านกระบวนการผลิต และเชิงพาณิชย์)

1. กลุ่มผู้ประกอบการภาคการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ชมรมช่างเครื่องประดับไทย สมาคมผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับแห่งประเทศไทย สมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับไทย
2. สถาบันการศึกษาและหน่วยงานของรัฐที่ดำเนินการจัดการเรียนการสอนทางด้านอัญมณีและเครื่องประดับ และส่งเสริมการประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา กาญจนนาภิเษกวิทยาลัยช่างทองหลวง สถาบันการศึกษาในสังกัดสำนักงานการอาชีวศึกษา ส่วนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
3. กลุ่มผู้ประกอบการภาคการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับโดยเฉพาะผู้ใช้ประโยชน์ที่ชัดเจน คือ
 - ห้างหุ้นส่วนจำกัด คลาสซี่ จิวเวลรี่ เป็นบริษัทที่ดำเนินการผลิต สินค้าตาม ใบสั่งซื้อ และผลิตสินค้าตามความต้องการของลูกค้า มีความชำนาญในด้านการผลิตเครื่องประดับทุกประเภท ผลที่บริษัทคาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้คือ
 - การผลิตที่ปรับปรุงประสิทธิภาพให้ได้มาตรฐานการส่งออก โดยวัดจากออเดอร์การสั่งซื้อ จากลูกค้าต่างประเทศที่เข้ามาอย่างต่อเนื่องและเพิ่มจำนวนลูกค้าใหม่ ในแต่ละ Collection
 - สามารถเพื่อขีดความสามารถ ในด้านการผลิต ได้ทุกรูปแบบ ตามคำสั่งซื้อ ของลูกค้า
 - ลดความเสียหายในการผลิต ได้มากขึ้น
 - ใช้เวลาในการผลิตน้อยลง
 - ผลิตได้ปริมาณมากขึ้น
 - สามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนได้
 - สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าโลหะทองคำ และมีคุณภาพสูงกว่าโลหะเงิน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับประเทศไทยนั้นใช้มาตรฐานความบริสุทธิ์ของทองคำที่ 96.5 เปอร์เซ็นต์ หากจะเทียบเป็นกะรัตแล้ว จะได้ประมาณ 23.16k ซึ่งจะได้สีทองที่เหลืองเข้ม และมีความแข็งของเนื้อทองพอเหมาะสำหรับการนำมาทำเครื่องประดับประเภทที่ไม่ฝังอัญมณีที่มักเรียกว่างานทอง หรือ งานร้านทอง นั้นเอง หรือ ถ้าหากจะฝังบ้าง ก็ฝังเพียงไม่กี่เม็ดและฝังแบบที่ลือคออัญมณีแน่นอนเท่านั้น ส่วนเครื่องประดับประเภทงานร้านเพชร หรือ งานจิวเวลรี่ มักนิยมความบริสุทธิ์ของทองคำอยู่ที่ 18k 14k 10k 9k และ 8k เพราะจะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อทองไม่มากนัก จึงทำให้เครื่องประดับมีความแข็งเพียงพอที่จะยึดเกาะอัญมณีเม็ดเล็กๆ ได้ นั่นเอง 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 หรือ บางรายอาจชอบให้ทองของตนสีออกเหลืองขาวก็ผสมเงินในอัตราส่วนที่พอเหมาะ 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 เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับต้น 3 รองจากเงินและทองแดง สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรตได้ถึง 97% จึงมักมีการนำเอาทองคำมาเป็นวัสดุป้องกันรังสี ซึ่งสมบัติทางกายภาพของทองคำบริสุทธิ์ที่สำคัญๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของทองคำ [3]

| | |
|--|-----------------------|
| เลขอะตอม | 79 |
| มวลอะตอม | 196.9655 |
| โครงสร้างผลึก | FCC |
| สี | เหลือง |
| ความถ่วงจำเพาะ | 19320 |
| ความถ่วงจำเพาะ 20 °c (kg/m ³) | 19320 |
| จุดหลอมเหลว (°c) | 1064.4 |
| จุดเดือด (°c) | 2940 |
| ความร้อนจำเพาะที่ 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%IACS (ทองแดง 100%) |
| ความต้านทานจำเพาะ (μΩmm) | 22 |
| สัมประสิทธิ์การต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (1/°c) | 0.0034 |
| ค่าศักย์ไฟฟ้า (Electrode Potential)(v) | +1.498 |

หมายเหตุ IACS = Intemation Annealed Copper Standard

2) สมบัติทางกล ทองคำเป็นโลหะที่มีความเหนียวสูงสามารถดึงเป็นเส้นหรือตีเป็นแผ่นได้ขนาดบางที่สุดถึง 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.) | Hardness (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 (Formability) ทองคำเหมาะสำหรับการขึ้นรูปทางกลทุกรูปแบบ เช่น การตีขึ้นรูป การรีดเป็นแผ่นและการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ข. ความสามารถทางด้านการเชื่อมประสาน (Weld Ability) การบัดกรีด้วยหัวทอร์ชใช้กับโลหะประสานที่มีธาตุเงินผสมไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้ได้กับเปลวไฟทุกชนิด กรณีการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะซีทีลีน (Oxy-Acetylene) ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้กับเปลวไฟทุกชนิดนอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance Welding) ได้

ค. อุณหภูมิการอบอ่อนที่ 300°C

ง. อุณหภูมิการขึ้นรูปร้อนต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

จ. อุณหภูมิเทหล่อที่ 1100 ถึง 1300°C

2.1.3 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ

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

$$\text{Fineness } xxx = xxx \text{ Fine} = xxx\% \text{ Au by Weight} = \frac{xxx}{1000} \times 100\%$$

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 ในทองคำกะรัตยังไม่มีมาตรฐานกำหนดที่แน่นอนตายตัว 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) ซึ่งประกอบด้วยเงิน ทองแดงและ สังกะสี ทางด้านโลหะวิทยาที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับของทองคำเจือ ซึ่งการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือรอง (Major Alloying Element) ต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหะวิทยาและผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับสีของทองคำที่ผสมธาตุเจือหลัก ดังนั้นในการศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาจึงมีการ

กล่าวอ้างถึงเฉพาะอิทธิพลของธาตุเจ้าหลัก เงิน ทองแดง และสังกะสี เท่านั้น ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อ
ย่อยต่อไป

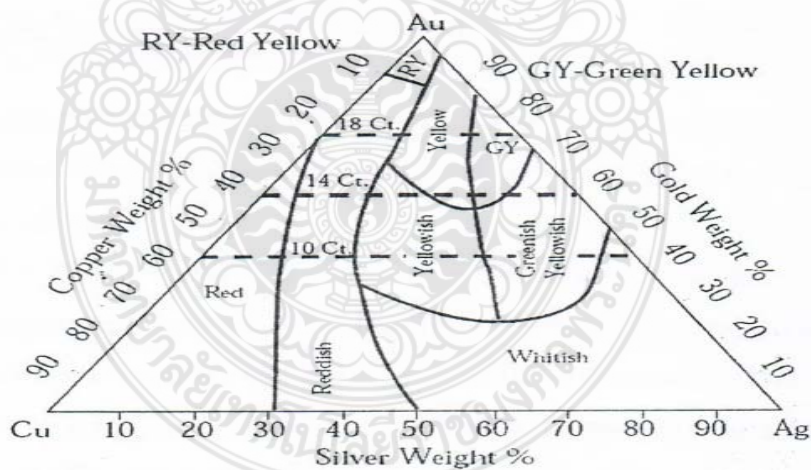
2.2.1 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง

จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติของโลหะผสมระบบ ทอง-เงิน-ทองแดง ทางด้านโลหวิทยา
โดย Pearson W.S. ทำให้ทราบถึงขอบเขตการละลายของแต่ละธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถ
แสดงแผนภาพสมดุลเฟสในระบบ 3 ธาตุได้ดังรูปที่ 2.1 รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

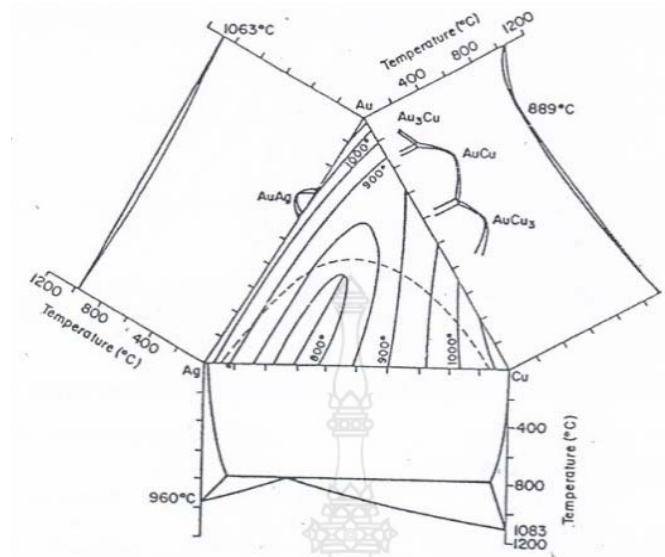
จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะทองคำเจือในระบบ 2 ธาตุระหว่างทองคำ-เงิน
บริเวณที่เป็นเฟสของแข็งเฟสเดียวเกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ
200°C ในช่วงส่วนส่วนผสมที่มีธาตุเงินระหว่าง 30 ถึง 40 wt% หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ
200°C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่สอง คือ AuAg เนื่องจากขอบเขตการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่อ
อุณหภูมิลดลง

ในระบบของทองคำ-ทองแดง แสดงบริเวณของเฟสเดียวที่เกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัว
สมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400°C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200°C จะเกิดการ
แยกตัวเป็นเฟสที่ 2 ในช่วงผสมที่แตกต่างกัน เป็น AuCu₃, AuCu และ Au₃Cu ซึ่งมีส่วนที่สำคัญที่ทำให้
ทองคำเจือมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น

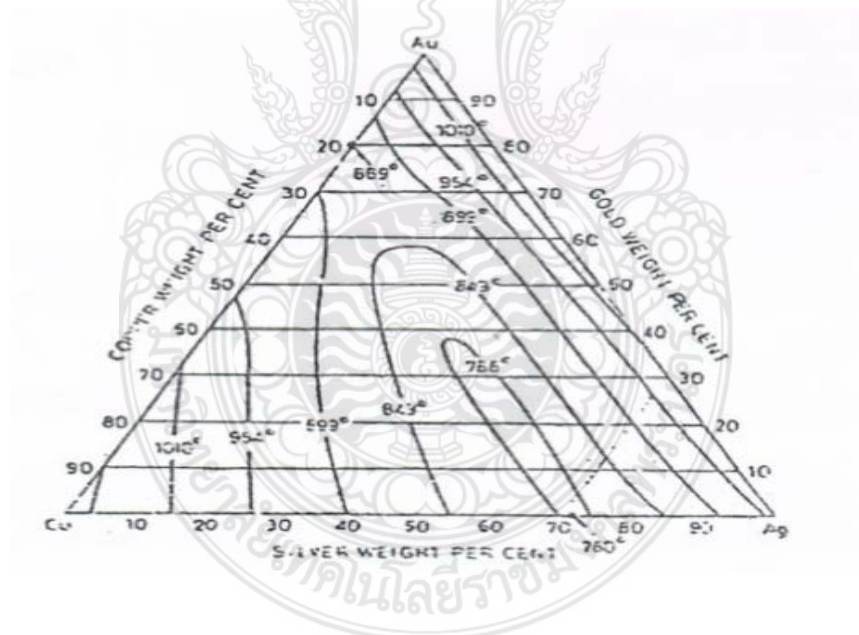
ในระบบของเงิน-ทองแดง แสดงปฏิกิริยายูเทคติกที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงโดยมีอุณหภูมิ
ยูเคติก ที่ 799°C ในช่วงที่มีทองแดงผสมอยู่ 8.8



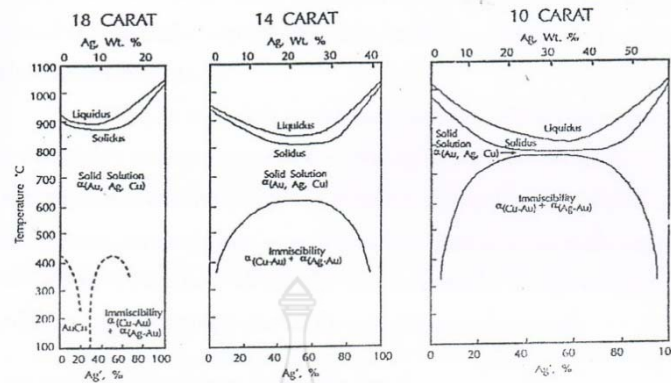
รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง [1]



รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-เงิน-ทองแดง [1]



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำ [4]



รูปที่ 2.4 ภาคตัดในแนวตั้งที่ 18 14 และ 10 กะรัต บนแผนภาพสมมูล ทองคำ-เงิน-ทองแดง [4]

จากรูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนผสมทางเคมีของทองคำเงินในระบบ 3 ธาตุ (Ternary Phase Diagram) ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเงิน ที่อัตราส่วนผสมต่างๆกัน ในตำแหน่ง 18 14 และ 10 กะรัตตามลำดับ

จากภาคตัดดังกล่าวทำให้ได้ภาพตัดแนวตั้งเสมือน 2 ธาตุ (Quasi-Binary Vertical Section) ขึ้นมา รูปที่ 2.4 แต่อย่างไรก็ตาม แทนที่จะเขียนแผนภาพจากค่าประमाणเงินหรือทองแดง เพื่อบอกปริมาณส่วนผสมทางเคมีในภาคตัดดังกล่าวแต่เพียงอย่างเดียวอาจจะไม่สะดวกเท่าใดนัก ในการเปรียบเทียบทองคำเงินที่กะรัตไม่เท่ากัน ดังนั้น Pearson W.S. จึงได้คิดค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน-ทองแดงในรูปของการแปรผันตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนค่าความเข้มข้นของธาตุเงินในรูปแบบแผนตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนที่ค่าความเข้มข้นของธาตุด้วยสัญลักษณ์ Ag' ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

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

จากสูตรแสดงว่าระบบทองคำเงิน ทองคำ-เงิน-ทองแดง และทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี สามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ ด้วยตัวแปรเพียง 2 ตัว จำนวนกะรัต (%Au) และค่า Ag' ของทองคำเงิน สามารถแบ่งออกเป็น 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) แต่ถ้าปล่อยให้ทองคำเจือเย็นตั้งลงมาอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เฟสที่ได้ คือ เฟสอัลฟา (α = Cu-Au) ตกตะกอนในทองคำเจือที่มีทองแดงสูง (Copper Rich Alloys) และจะได้ เฟสอัลฟา 2 (α_2 : Ag - Au)ⁿ ตกตะกอนอยู่ในทองคำเจือเงินสูง (Silver Rich Alloy) ทองคำเจือชนิดนี้จะมีความอ่อนปานกลางในสภาพที่ผ่านการอบอ่อน แต่สามารถปรับเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวิธีการบ่มเพิ่มความแข็งแรง

ค. ชนิดที่ 3 ค่า Ag' ในช่วงที่ 25-75% ทองคำเจือชนิดนี้จะมีช่วงที่เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวและสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดช่วงไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ แต่ถ้าให้เย็นตัวแบบสมดุลลงมาถึงอุณหภูมิห้อง เฟสของแข็งเนื้อเดียวนั้นสารละลายตัวไปเป็นเฟส α (Cu-Au) และเฟส (α_2 : Ag - Au)ⁿ ทองคำเจือชนิดนี้จะเพิ่มความแข็งแรงสูงในสภาพอบอ่อน ดังนั้นการอบอ่อนจึงลดความแข็งแรงจากนี้ยังสามารถทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้โดยกรรมวิธีการบ่มเพิ่มความแข็งแรง

2.2.2 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง-สังกะสี

ความสัมพันธ์ระหว่างสีและส่วนของทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ช่วงที่เป็นสีเหลืองจะเกิดใกล้มุมของทองคำ สีขาวเงินจะเกิดขึ้นมุมของเงินและสีแดงจะเกิดที่มุมของทองแดง สีแดงเป็นสีที่เด่นกว่าสีอื่น เพราะจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของทองคำเจือ ดังจะเห็นได้ว่าทองคำเจือไม่มีสีแดงเฉพาะตรงมุมของทองแดงเท่านั้น แต่ยังแผ่ไปถึงบริเวณมุมของทองคำด้วยการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงบริเวณที่มีสีแดงหรือสีอมแดงให้กลายเป็นสีอมเหลืองสามารถทำได้โดยการเติมสังกะสีลงไป โดยทั่วไปในการทางปฏิบัติ การเติมสังกะสีเข้าไปอาจเติมไปได้จนถึง 15 wt% ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดปริมาณของช่วงการเกิดความไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้บนแผนภาพสมดุลเฟส 3 ธาตุ โดยการลดความกว้างของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดช่วงดังกล่าวและลดความสูงของช่วงการเกิดไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ให้เคลื่อนลงมาเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงในทองคำเจือกระจัดต่างๆ ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้น การเติมสังกะสีจะส่งผลทำให้แนวโน้มของทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี มีความแข็งแรงน้อยกว่าทองคำเจือระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง ทั้งในสภาพที่ผ่านการอบอ่อนและในสภาพอบเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (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 |
| ความร้อน ในการหลอมละลาย ที่ 200°C (cal/g°C) | 25 | 50.6 |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ($\mu\text{in}/\text{in } ^\circ\text{C}$) | 19.68 (0-100°C) | 16.5 |
| ความต้านทานไฟฟ้า($\mu\Omega\text{cm}$) ที่ 20 °C | 1.59 | 1.673 |
| ความแข็ง (HB) | 30 | 37 |
| ความต้านแรงดึง (10^6 psi) | 11 | 16 |
| โมดูลัสของยัง (E : GPa) | 82.7 | 129.8 |
| บัคส์ โมดูลัส (K : GPa) | 103.6 | 137.8 |
| โมดูลัสเฉือน (G : GPa) | 30.3 | 48.3 |
| อัตราส่วนของพัชองส์ (γ) | 0.367 | 0.434 |
| ความหนืด (γ .cp) | 3.9 | 3.36 |

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

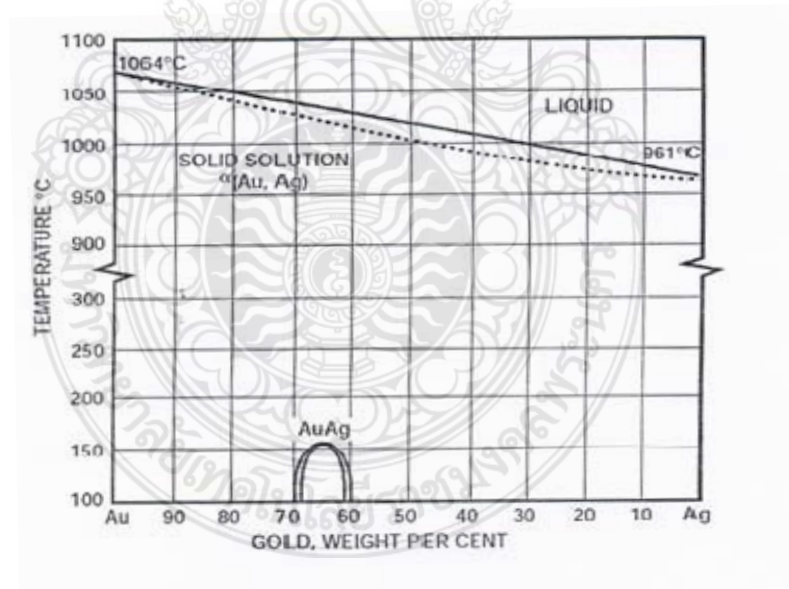
ตารางที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุเจือ สีและสมบัติที่เกิดขึ้นของทองคำ

| ชนิดของธาตุ | สีที่เปลี่ยนแปลงไป (ในกรณีมีธาตุเจือสูง) | บทบาทต่อสมบัติของทองคำเจือต่ำ |
|-------------|---|---|
| ทองแดง | สีแดงหรือสีชมพู | ตัวเพิ่มความแข็ง |
| เงิน | ขาว | ตัวเพิ่มความแข็ง (ทองแดง) และเพิ่มความต้านการกัดกร่อน |
| สังกะสี | ขาว | ลดการเกิดออกซิเดชัน |
| นิกเกิล | ขาว | เพิ่มความแข็งอย่างมาก แต่ทำให้สีของทองคำเป็นสีขาวเร็ว |

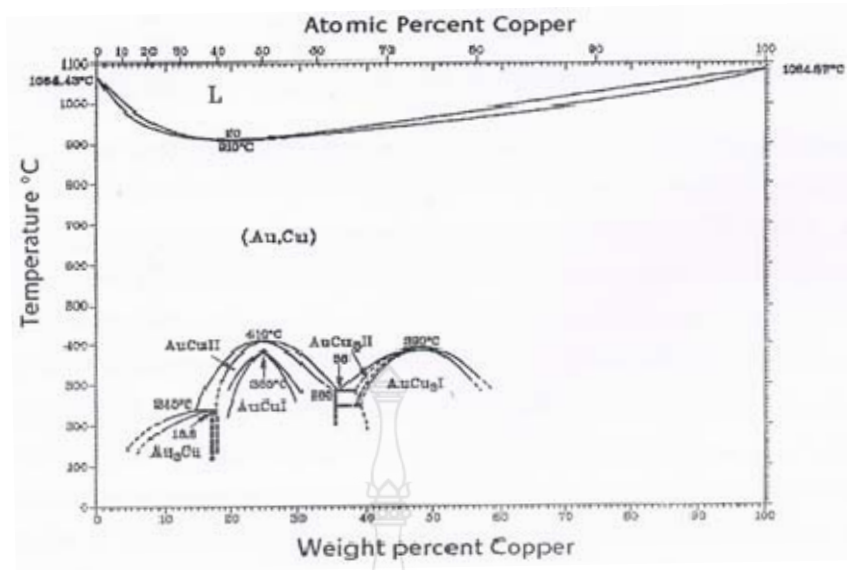
| | | |
|-------|-----|--|
| ดีบุก | ขาว | ประโยชน์ในการเคลือบสีของทองคำเพื่อป้องกันการกัดกร่อน |
|-------|-----|--|

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

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

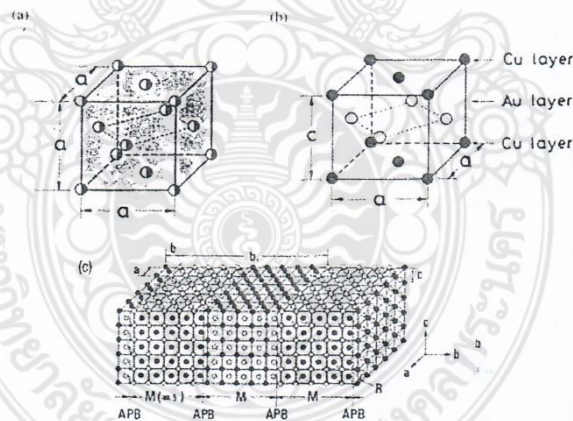


รูปที่ 2.5 แผนแสดงสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน [5]



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-ทองแดง [5]

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



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างระเบียบโครงสร้างมีระเบียบ [5]

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

เนื่องจากความแตกต่างของขนาดอะตอมทองคำและทองแดงทำให้โครงสร้าง Face-Center Cubic ของสารละลายของแข็งที่ไร้ระเบียบเกิดการบิดตัว (Distorted) ในทิศทางที่ทำให้เกิดโครงสร้าง

ผลึกแบบ Face-Center Cubic Face-Center Cubic การบิดตัวของแลตทิซทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ที่ลำบาก ส่งผลให้ทองคำเจือเกิดการเปลี่ยนรูปได้ลำบากเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้สารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจึงมีความแข็งแรงกว่า แข็งแรงกว่า และมีความเหนียวน้อยกว่าสารละลายของแข็งแบบไร้ระเบียบ การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจะเกิดที่การเย็นตัวอย่างช้า จากอุณหภูมิอบอุ่น สามารถทำการอบชุบที่ 410°C แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 150-300°C ทำให้เกิดปฏิกิริยาการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Ordered Reaction การจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบมีอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมทองคำ : ทองแดงอย่างง่าย ๆ คือ 1:1 1:3 และ 3:1 โดยเรียกชื่อเฟสเป็นปริมาณทองคำ 50.8 wt% เป็นทองคำที่อยู่ในช่วง 9 และ 14 กระจัด ส่วนทองคำเฟสเป็นทองคำเจือที่มีส่วนผสมทองคำ 83 wt% อย่างไรก็ตามเฟสทั้งสองนี้ไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการเป็นสารละลายของแข็งที่เป็นระเบียบมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ AuCu เนื่องจากเฟส AuCu เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยมีความแตกต่างของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ AuCu₁ ที่มีโครงสร้างเป็น Face-Center Tetragonal ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 385°C และ AuCu₁ เป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิก Orthorhombic ที่อุณหภูมิ 385°C - 410°C

ในกรณีของทองคำเจือ 18 กระจัดที่พิจารณาของทองแดงที่แตกต่างกันยังมีผลให้สมบัติของกลและสีของเนื้อโลหะมีความต่างกัน โดยที่ความแข็งแรงของทองคำเจือจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ ผลของการลดก็มีส่วนเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกของ Work Hardening ดังในตารางที่ 2.6

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

| สีของทองคำเจือ | ปริมาณทองแดง% | ความแข็งแรง บริเนลหลังจากผ่าน การลดขนาดต่างกัน 15% | ความแข็งแรง บริเนลหลังจากผ่าน การลดขนาดต่างกัน 30% | ความแข็งแรง บริเนลหลังจากผ่าน การลดขนาดต่างกัน 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. อิทธิพลของเงินและทองแดงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสและสมบัติของทองคำเจือ ในระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่ผ่านมานี้จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการอบเพิ่มความแข็งเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น AuCu และ AuCuL ซึ่งเฟสที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Ordered Phase) โดยศึกษาจาก กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical Microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ยังมีการศึกษากันไม่มากนัก สำหรับในกรณีของการศึกษา อิทธิพลของเฟสที่เกิดขึ้นต่อสมบัติทางกลของทองคำเจือในระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง จากการศึกษา ของ B.D.Razuvayeva และคณะ ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ (Atomic Ordering) และการลดลงของส่วนผสม (Decomposition) ในสารละลายของแข็ง (Solid Solution) เนื่องจากขอบเขตการละลายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ต่อสมบัติทางกลของทองคำเจือ 18 กระรัต ที่มีส่วนผสมของเงินและทองแดงต่างกันระหว่าง 5 : 21.3% และ 20 : 3.7% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

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

- สมบัติทางกล เช่น ค่าความแข็ง จะเปลี่ยนอะตอมในเนื้อโลหะผสมเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

- ช่วงเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ Ordered จะลดลงเมื่อผสมเงินเพิ่มลงไป และใช้เวลา น้อยลงในการเกิด

- การเพิ่มเงินลงไปในส่วนผสมของโลหะผสมทองคำ-เงิน-ทองแดง จะช่วยขจัดการเกิดการ แตกร้าวมตามขอบเกรน เมื่อเกิดการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ

- ปรากฏการแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรน (Embrittlement) สามารถลดลงได้ด้วยกระบวนการ ทางความร้อนโดยทำให้เกิดการเรียงตัวอย่างไร้ระเบียบ (Disordering)

- ปรากฏการแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรนที่มีสาเหตุจากสารมลทิน เช่น ซิลิกอน และตะกั่ว ไม่สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน

2.3.2 ธาตุเจือรอง (Minor Alloying Element)

ธาตุเจือรองเป็นธาตุที่ผสมลงไปทองคำเจือในปริมาณน้อย การผสมธาตุเจือรอง สามารถผสมธาตุ ลงไปได้หลายชนิด แต่ปริมาณในการใช้ไม่ควรเกินกว่า 1wt% วัตถุประสงค์ของการ เติมธาตุเจือรอง เพื่อต้องการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของทองเจือ โดยมีข้อที่ควรพิจารณาก่อน การเติมธาตุเจือรอง คือ ธาตุเจือรองแต่ละชนิดที่ผสมไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของทองคำ เจือมากกว่า 1 อย่างและธาตุเจือผสมลงไปจะให้ผลดีและผลเสียในเวลาเดียวกัน ดังตัวอย่างของธาตุ ต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.7 และตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 หน้าที่ของธาตุเจือในลักษณะธาตุเจือรองที่เป็นตัวเติม และสารมลทินที่เติมลงในทองคำเจือ [1]

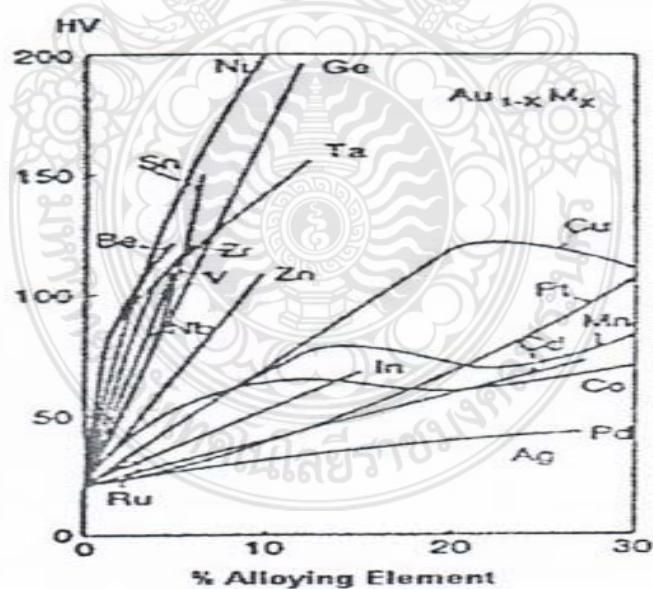
| ธาตุ | ทำให้เกรนละเอียด | ทำให้เกรนหยาบ | ปรับปรุงสมบัติการหล่อ | ทำให้เปราะ | เพิ่มความแข็ง | ลดออกซิเจน |
|-----------|------------------|---------------|-----------------------|------------|---------------|------------|
| อิริเดียม | A | - | - | I | - | - |
| รูทีเนียม | A | - | - | - | - | - |
| 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

ตารางที่ 2.8 แสดงผลดีและผลเสียของธาตุเจือรองที่ผสมทองไปในทองคำเจือ [1]

| ธาตุ | ผลดี | ผลเสีย |
|----------|---|--|
| ซิลิกอน | ปรับปรุงการไหลโลหะหลอมเหลวลดการเกิดทองแดงออกไซด์ที่ฝังงาน | เกิดความเปราะเมื่อเติมมากเกินไป |
| เหล็ก | ใช้ร่วมกับธาตุแมงกานีส ทำให้ได้ทองสีทองใกล้เคียงกับการให้ธาตุนิเกิล | 0.3-0.5 wt% ทำให้เกรนโตและหยาบ 25.0% ทำให้ทองคำมีสีเทาดำ |
| โครเมียม | - | 0.36-0.5% ทำให้เกรนโตและหยาบ |
| สังกะสี | >0.2wt% ลดการเกิดออกไซด์ชั้นของทองแดง 1-2wt% ปรับปรุงผิวให้เงางาม เติมปริมาณเท่ากับเงิน และทองแดงช่วยการแตกขณะที่ทำการรีด | - |

| | | |
|-----------|---|--|
| ตะกั่ว | เพิ่มความแข็ง | เกินกว่า 0.01 wt% เกิดการแตกหักแบบเปราะ |
| โบรอน | ให้ผลเหมือนซิลิกอน ที่ปริมาณที่ใช้เท่ากัน | - |
| นิกเกิล | เพิ่มความแข็ง และสีของทองคำจะอ่อนลง ใช้ผสมทำทองคำขาว | สีจะอ่อนลงอย่างรวดเร็ว มีผลต่อผิวหนังทำให้เกิดอาการแพ้ |
| ฟอสฟอรัส | ลดการเกิดออกซิเดชันดีที่สุดใน | ถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อได้รับความร้อน |
| โคบอลต์ | >8.4 wt% ปรับขนาดเกรนเล็กลง | - |
| รูทีเนียม | 0.001-0.1 wt% ปรับปรุงขนาดเกรนเล็กลง | - |
| แพลทินัม | เพิ่มความแข็งเมื่อทำการบ่มแข็ง และทำให้สีทองของทองคำลดลง | - |
| อิริเดียม | 0.01-0.1 wt% ปรับขนาดเกรนเล็กลงในการหล่อหลอมและการอบอ่อน | - |
| ไททาเนียม | < 1 wt% เพิ่มความแข็งเมื่อทำการบ่มแข็ง ในทองคำบริสุทธิ์ 990 | - |
| แคลเซียม | < wt% เพื่อความแข็งในทองคำ 99.9% | - |



รูปที่ 2.8 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของทองคำ [6]

นอกจากธาตุเจือหลักและธาตุเจือรอง ดังที่ได้กล่าวข้างต้นและยังมีธาตุอื่นๆ ที่มีต่อสมบัติทางกลของทองคำอีกหลายชนิด ซึ่งมีผลทำให้ทองคำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของธาตุผสมดัง

กราฟที่แสดงในรูปที่ 2.8 และแสดงอิทธิพลของธาตุเจือต่างชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันที่มีผลต่อค่าแข็งของทองคำเจือธาตุชนิดต่างๆ เมื่ออัตราการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลง สำหรับในส่วนของอิทธิพลของธาตุเจือธาตุชนิดต่างๆ เมื่ออัตราการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลง สำหรับในส่วนของอิทธิพลของธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านแรงดึง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าความแข็ง HV10 ของทองคำเจือธาตุเจือชนิดต่างๆ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันและอัตราการขึ้นรูปต่าง ๆ [7]

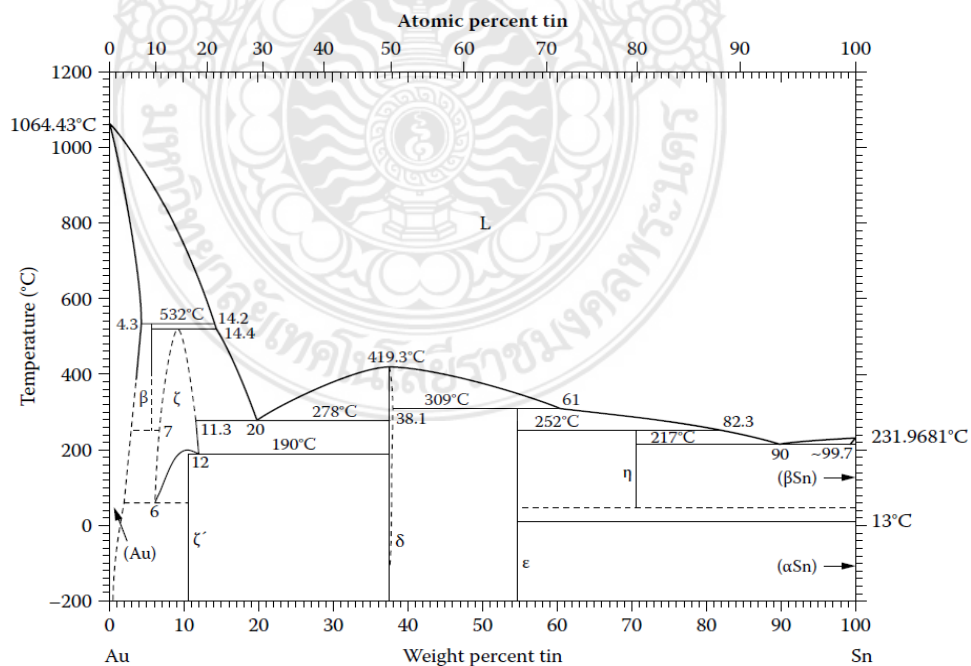
| ชนิดธาตุเจือและปริมาณของการเจือ | ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 0 | ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 40 | ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 80 |
|---------------------------------|--|---|---|
| Ag20 | 40 | 95 | 114 |
| Ag30 | 42 | 93 | 115 |
| Ag25Cu5 | 92 | 160 | 188 |
| Ag20Cu10 | 120 | 190 | 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 | ค่าความต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุ เจือ (%) 2 | ค่าความต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุ เจือ (%) 5 | ค่าความต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุ เจือ (%) 10 | ค่าความต้านแรงดึง MPa ปริมาณธาตุ เจือ (%) 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 Au₅Sn (ζ) ซึ่งเฟส ζ เป็นเฟสที่มีความแข็งแรงสูง แต่โดยธรรมชาติของเฟส ζ จะมีความเสถียรตลอดช่วงกว้างของส่วนผสมทางเคมี ดังแผนภาพสมดุลที่แสดงในรูปที่ 1 ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความเหนียว (ประมาณ 2wt% ที่อุณหภูมิห้อง) แต่ก็ยังสามารถทำการรีดร้อนเป็นแผ่นฟอยล์ (Foil) และขึ้นรูปเบื้องต้น (Preforms) ได้โดยการใช้เทคโนโลยีการหล่อที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่สามารถผลิตแผ่นฟอยล์ที่เหนียวและบางได้ความหนาประมาณ 75 μm และได้โครงสร้างจุลภาคที่ไม่เป็นระเบียบ แต่อย่างไรก็ตามสภาวะนี้ค่อนข้างจะไม่เสถียรและจะต้องทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหลังจากการขึ้นรูปแผ่นฟอยล์ภายในช่วงเวลา 30 นาที แผ่นฟอยล์ที่ได้นี้จะมีสมบัติทางกลที่ไม่แตกต่างจากแผ่นฟอยล์ที่ผลิตจากวิธีการธรรมดาต่างๆ ไป แต่โครงสร้างผลึกที่ได้นี้สามารถคงสภาพเดิมได้ประมาณ 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]

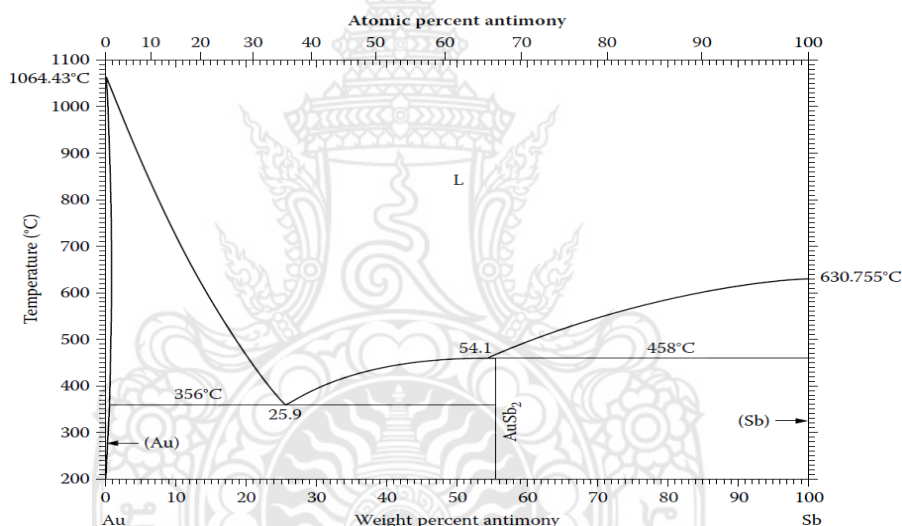
ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ไปใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานนั้น จะใช้วิธีการปกคลุมพื้นผิวรอยต่อด้วยชั้นผิวเคลือบของทองคำที่มีความหนาที่พอเหมาะ โดยการเคลือบทองคำทับบนชั้นพื้นผิวดีบุกที่บางกว่า โดยมีอัตราส่วนความหนาของทองคำต่อดีบุกเท่ากับ 2:1 แต่ถ้าเป็นการเคลือบผิวด้วยวิธี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

โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนที่มีส่วนผสม Au-20Sn มีนัยสำคัญต่อระดับการไหลตัวเพื่อให้เกิดการเปียกเมื่อโลหะหลอมละลาย ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การยึดติดชิ้นส่วนโลหะทองคำและการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดสุญญากาศสำหรับบรรจุภัณฑ์สารกึ่งตัวนำเซรามิก แต่ในบางครั้งก็มีการใช้ฟลักซ์เพื่อช่วยให้เกิดการไหลกระจายตัว ซึ่งการใช้ฟลักซ์นี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ดังนั้นการต่อชิ้นส่วนต่างๆ ในงานอิเล็กทรอนิกส์จึงดำเนินการภายใต้บรรยากาศปกคลุม

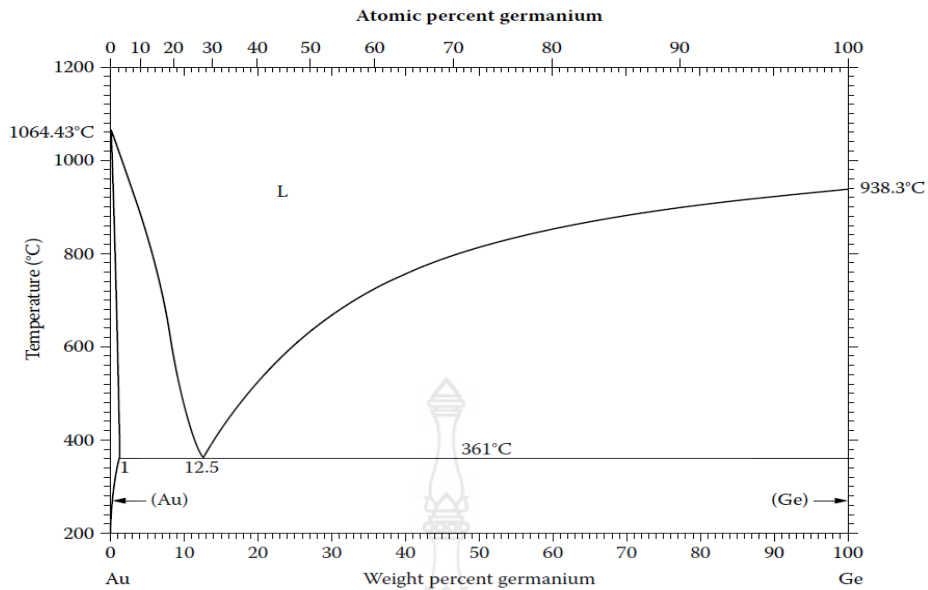
โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานชิ้นส่วนทองคำที่มีความหนามากๆ แต่ก็มีสิ่งที่ทำให้ให้เป็นอุปสรรคสำหรับการดำเนินการจากสมบัติของการสลายตัวของทองคำที่มีจุดหลอมละลายสูงขึ้นและไหลตัวได้ค่อนข้างยากส่งผลให้การเปียกเกิดขึ้นได้ยาก โลหะผสมที่เป็นส่วนผสมที่ก่อให้เกิดอุปสรรคสำหรับการไหลตัวประกอบด้วย ทองแดง นิกเกิล โครเมียมและไนโครม (Nichrome) ตัวอย่างของโลหะที่ช่วยให้เกิดการไหลตัวได้ดีสำหรับโลหะผสม Au-20Sn คือ ฟลลาเดียมซึ่งฟลลาเดียมช่วยให้โลหะผสม Au-20Sn ไหลตัวได้ดีโดยการละลายผสมในโลหะตัวประสานทองคำ-ดีบุก ในช่วงขอบเขตการละลายที่ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าบริเวณรอยบัดกรีต่อประสานนี้ถูกนำไปบ่มในสถานะของแข็ง จะเกิดการก่อตัวของช่องว่าง Kirkendall ที่บริเวณเฟสที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสระหว่างฟลลาเดียมที่ไม่ละลาย (ตกค้าง) กับสารประกอบเชิงโลหะ Pd₃Sn₂ ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และส่งผลให้รอยต่อประสานอ่อนแอ ความสามารถในการละลายของฟลลาเดียมในโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิสำหรับการ

บัดกรีโดยทั่วไปจะมีวัฏจักรของขบวนการที่สั้นและช่วยให้ชั้นบางๆ ของแพลทินัม (200nm) เกิดการเปื่อยอย่างรวดเร็วและเป็นชั้นอุปสรรคสำหรับการต่อประสานที่เสถียร

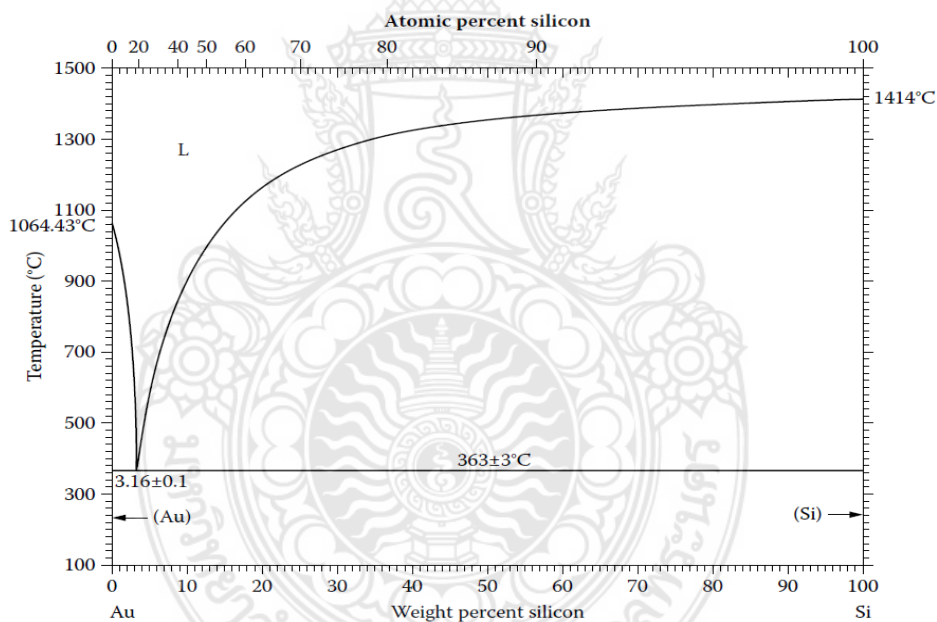
การผสมหรือเติมโลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าโลหะผสมที่เป็นตัวประสานยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการต่อประสานฟิล์มโลหะที่หนา ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการเติมเงินและทองแดงในโลหะผสมทองคำ-ดีบุกเพื่อแทนที่ทองคำ ซึ่งอัตราการผสมที่เหมาะสมและช่วงอุณหภูมิหลอมละลายไม่มีการเปิดเผย แต่มีข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการบัดกรีต่อประสานที่อุณหภูมิ 400°C เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมระบบสองธาตุ Au-20Sn ที่มีอุณหภูมิสำหรับการดำเนินการบัดกรีต่อประสานที่ 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 แผนภาพสมดุลของทองคำ-เจอร์มาเนียม (ที่มา : ASM International Handbooks) [8]



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

2.4 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง [1]

โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 หรือเงินสเตอร์ลิง 925 หมายถึง โลหะเงินเจือที่มีปริมาณเนื้อเงินบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 925 ใน 1000 ส่วนเจือรวมกับธาตุอื่นๆ ปริมาณไม่เกินกว่า 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 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่า เช่นเดียวกับทองคำ 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 ผิวของโลหะเงิน ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานๆ จะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากมีซัลเฟอร์ (Sulfur) อยู่ในอากาศมาก โลหะเงินบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ 960.8°C จุดเดือดที่อุณหภูมิ 2210°C ซึ่งจะทำให้กลายเป็นไอสีขาวเงิน ในขณะที่โลหะเงินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโลหะเงินสามารถดูดกลืน (Absorb) ออกซิเจนได้ประมาณ 20 เท่า คุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพของโลหะเงินสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.12

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 การตัดและการกดลากขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังขึ้นอยู่กับ

กรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การอบเป็นเนื้อเดียว การอบอ่อน และการอบเพิ่มความแข็ง ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.13

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) ในการศึกษาคุณสมบัติทางกลโลหะเงินนั้น จะต้องคำนึงถึงระดับความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน โดยกำหนดให้โลหะเงินบริสุทธิ์จะต้องมีเนื้อเงินอย่างน้อย 99.95% โดยปกติปริมาณของสารเจือปน (Impurities) แต่ละชนิดที่ผสมในเนื้อโลหะเงินจะต้องมีปริมาณไม่เกินกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.14

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 2.15

ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน [12]

| อัตราการขึ้นรูป (%) | ความต้านทานแรงดึง (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 |

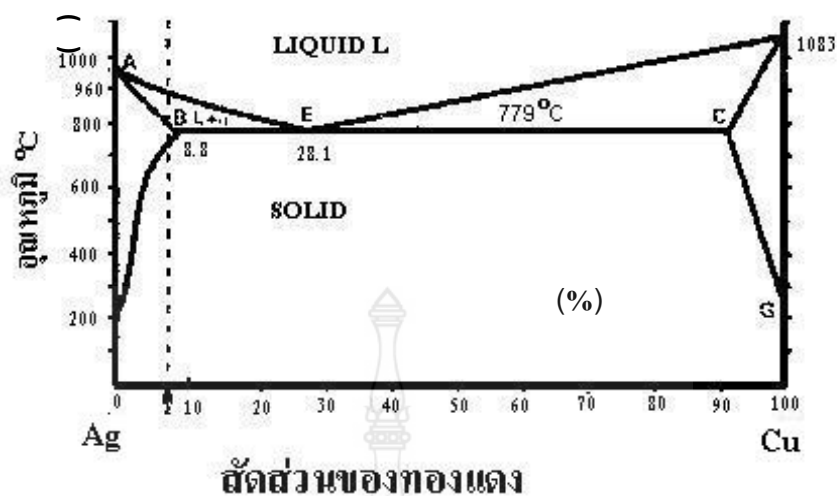
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรท (Argentum Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูนาร์คอสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต (Argentum Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide) กรดซัลฟูริกเจือจางไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเงินได้ในลักษณะของซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulphate)

กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) ทำปฏิกิริยากับเงินช้ามากและเกิดเพียงเฉพาะที่ผิวเท่านั้น โดยจะเกิดคลอไรด์เคลือบโลหะไว้ โพตัสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide) สามารถละลายเงินได้ อัลคาลิสไม่ทำปฏิกิริยากับเงินด้วยเหตุนี้ เบ้าหลอมเงินจึงเป็นพวกอัลคาไลน์

การตกตะกอนของเงิน กรดไฮโดรคลอริกและคลอไรด์ทำให้เงินคลอไรด์ตกตะกอนเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งถ้าให้ความร้อนและคนให้ทั่ว สารละลายจะมีลักษณะเป็นขุยและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกับแสงตะกอนจะมีสีเทาอมน้ำเงินและค่อยๆ เป็นสีม่วง จนในที่สุดจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ

2.4.2 โลหะวิทยาโลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ใช้สำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน มีคุณสมบัติทางกลอ่อนนิ่มความสามารถในการคงรูปต่ำไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งาน 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 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการละลายของโลหะเงินเข้ากับทองแดงในสถานะสารละลายของแข็งของโลหะเงินเจือทองแดง (Solid Solution of Copper in Silver Alloy) และโลหะทองแดงเจือเงิน (Silver in Copper Alloy) ซึ่งมีจุดยูเทคติกที่ 28.1 เปอร์เซ็นต์ทองแดง ความสามารถในการละลายทองแดงในเงินสูงสุดที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ทองแดง โดยความสามารถของการละลายทองแดงในเงินจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ สำหรับในกรณีของโลหะเงินเจือทองแดงที่มีปริมาณของทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกันที่สถานะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution (α), Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ที่เกิดจากทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วยที่อุณหภูมิสูงประมาณ 745°C ขึ้นไปโครงสร้างจะเป็น Primary Silver-Rich Solid Solution (α) เพียงเฟสเดียว แต่ถ้าหากอุณหภูมิลดต่ำกว่า 745°C ความสามารถในการละลายทองแดงในโลหะเงินสิ้นสุดลงทำให้เกิดโครงสร้าง Silver-Copper Eutectic และทองแดงแยกผลึกเป็นโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ซึ่งเม็ดเกรนของโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ที่ได้จะมีขนาดใหญ่ และมีผลทำให้โลหะเงินเจือทองแดงมีความแข็งแรงต่ำ โครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปเย็นและกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

2.4.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน

สินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็นผลผลิตที่เกิดจากงานช่างฝีมือทางด้านศิลปหัตถกรรมที่แสดงถึงวัฒนธรรมของชนชาติไทยโดยเฉพาะ จึงเป็นสินค้าที่รู้จักกันแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับของชาวต่างประเทศทั่วโลก 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 และด้านการเกิดออกซิเดชัน หลังการอบเหนียวจะเกิดออกไซด์ ที่ผิวนอกเกือบจะถึงผิวใน และจะไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับชั้นของออกไซด์ จุดหลอมเหลวที่สูงจะเหมาะกับการชุบผิว อย่างไรก็ตาม โลหะจะมีความแข็งเท่ากับเงินบริสุทธิ์และสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ และขึ้นรูปได้ดี และยังสามารถทำให้บางได้ถึง 75% ในระหว่างการอบเหนียวและต่อเนื่องกัน เพราะฉะนั้นวัสดุนี้เหมาะกับการขึ้นรูป (Ag950) และสามารถตัดเป็นลวดได้ดี ส่วนความแข็งจะเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 600°C และจำเป็นต้องเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการ หลอมเหลวและอบเหนียว ดังนั้นความสามารถในการทนการยืดและหดจะลดลง ลักษณะด้อยของ Ag950 คือการเสีรูปร่างง่าย [9]

เมื่อเพิ่มความแข็งจาก 50HB จนเกินกว่า 100 HB ด้วยการชุบแข็ง เป็นไปได้ว่าเกือบจะไม่มี การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมากนัก

Ag925 โดยทั่วไปจะเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากถึงคุณภาพเหมือนกับ Ag950 มีลักษณะเหมือนกับเงินบริสุทธิ์นิยมจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง โลหะผสมชนิดนี้ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวได้ดีเท่ากับ Ag950 อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการ

1. การอบเหนียวที่ 650°C เย็นตัวเร็วจะเกิดการแตกหักด้วยอัตราการยืดตัว 42%
2. การอบเหนียวที่ 650°C เย็นตัวช้า (ในเตาครึ่งชั่วโมงที่ 350°C) จะเกิดการแตกหัก ด้วยอัตราการยืดตัวที่ 25%

Ag835 ปกติจะใช้ในการทำเครื่องประดับ แต่ลักษณะสีของ Ag835 จะไม่ขาวสะอาด เหมือนกับเงินบริสุทธิ์มากนัก การใช้งานสามารถรู้สึกถึงความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น

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

2.4.3 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ธาตุมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังตัวอย่างที่จะกล่าวไปนี้

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

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

ดีบุก (Sn) ปริมาณดีบุกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง เงินบริสุทธิ์ สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19% อัลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกไซด์ชั้นน้อยกว่า อัลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้

เนื้ออัลลอยนิกัม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีตีบุกผสมมากกว่า 9% จะทำให้เกิด Cu_4Sn ซึ่งจะทำให้เปราะ และในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น SnO_2

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

สังกะสี (Zn) ประมาณ 20% สามารถจะละลายได้ในสถานะของแข็ง แต่ในทางปฏิบัติสามารถผสมได้ประมาณ 14% อัลลอยที่ได้สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และมีคุณสมบัติเป็นมันเงาจึงสามารถขัดเป็นเงาได้ง่าย และช่วยลดการรวมตัวของเงินกับออกซิเจนและทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดีและมีอัตราการยึดตัวสูงขึ้น

ซิลิกอน (Si) เกือบจะไม่ละลายในเงิน ซิลิกอนจะทำให้อัลลอยแข็งและเปราะ ซึ่งจะมีตะกอนบนขอบเกรน และเกือบที่จะทำให้อัลลอยใช้งานไม่ได้ แต่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้ โดยการใส่หินเขียวหนุมาน (Quartz) ลงในบ้ำหลอม

ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ AgP_2 หรือ Cu_3P ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับทองแดง-ฟอสฟอรัส ถ้าการดูเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์

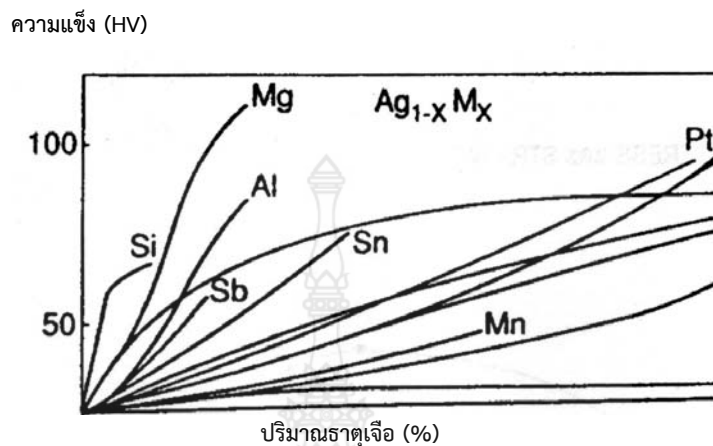
2.4.4 อิทธิพลของธาตุเจือต่อคุณสมบัติของโลหะเงินเจือ

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

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 2.18 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 หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผลทางด้าน การไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี และช่วยลดก๊าซออกซิเจน (Deoxidized) ในโลหะเงินหลอมละลาย

2.5 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

2.5.1 การทดสอบแบบ Vickers

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุซึ่งในบทรนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอยกด (Indentation) แบบกระดอน (Rebound) แบบขีดข่วน (Scratch) แบบสึกหรอ (Wear) และในแบบของความสามารถในการกลึงไส (Machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อน หัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็งแบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีด ข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้ เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และสุดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการ เกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้า แข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอนการทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore Scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell Superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มี ความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนั้นในการทดสอบความแข็ง บางครั้งต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่ พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชร รูปปิรามิด ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136 องศา ดังรูปที่ 2.18 และ น้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการ เดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของ รอยกด และจากรูปที่ 2.15 สามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ พื้นที่รอยกด = ซึ่งจะมีค่า โดยประมาณ = ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

จากความแข็ง Vickers = จะได้ $DPH = \frac{F}{d^2}$ เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm²) F คือ น้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาว

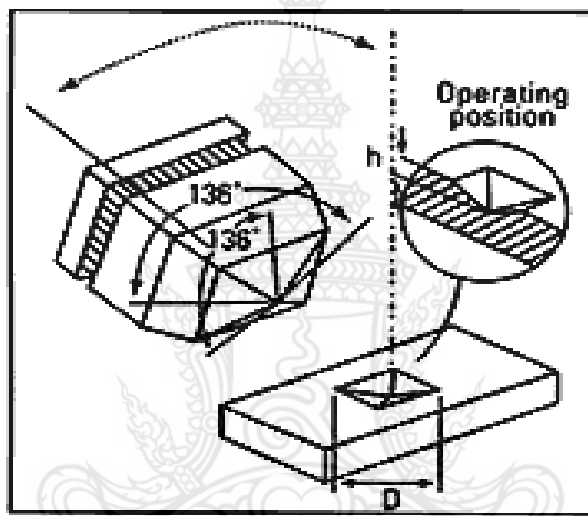
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin (136^\circ / 2)} \text{ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544}$$

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

จากความแข็ง Vickers = แรงกด/พื้นที่รอยกด

$$\text{จะได้ DPH} = \frac{1.8544 f}{d^2}$$

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



รูปที่ 2.15 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [2]

ในการทดสอบนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางชิ้นงานขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวกด จากนั้นให้ปลดล้อระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่างต่อเนื่อง จากนั้นน้ำหนักกดออก ลดระดับแท่นวางลง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรูรอยกดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏ การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขึ้นต้นจะใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการทดสอบนี้ คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ยอมรับมากกว่า ข้อเสียคือเป็นการทดสอบแบบทำลาย ขั้นตอนการทดสอบใช้เวลามากกว่าการทดสอบแบบ Brinell และ Rockwell ชิ้นทดสอบต้องทำการขัดเงาซึ่งใช้เวลาอีก นอกจากนั้น เครื่องทดสอบมีราคาแพง ตัวอย่าง 7.3 ค่าความแข็ง Vicker ของชิ้นทดสอบที่มีเส้นทแยงมุมของรอยกดเฉลี่ย 0.75 mm จากน้ำหนักกด 100 kg DPH = = 330 kg/mm^2

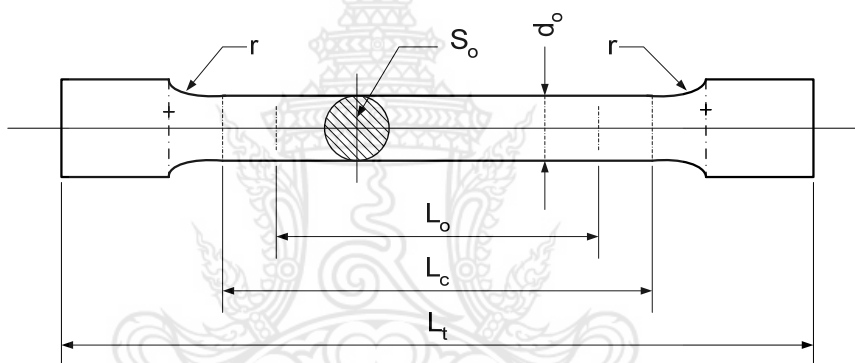
2.6 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

การทดสอบความแข็งแรงดึงเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถให้ผลเกี่ยวกับความต้านทานแรงดึง ความเค้นคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ วิธีการทดสอบชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน แรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึก

2.6.1 ชิ้นทดสอบ (Specimens)

ชิ้นทดสอบดึงจะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบอาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือในกรณีพิเศษอาจเป็นรูปอื่นก็ได้ สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะส่วนมากจะเตรียมโดยการกลึงให้มีพื้นที่ภาคตัดขวางกลมหรืออาจจะเตรียมให้มีพื้นที่ภาคตัดตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉากก็ได้ แสดงดังภาพที่ 2.16

ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.19



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

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

| เส้นผ่านศูนย์กลาง ชิ้นทดสอบ | เส้นผ่านศูนย์กลาง ปลายจับ | ระยะปลายจับ h | ความยาว พิกัด | ความยาวช่วง ขนาน | ความยาว รวม |
|--------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|
| D_0 | D_1 | | L_0 | L_c | 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 |

2.6.2 ความยาวพิกัด (Gauge Length) [2]

คือความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้นในส่วนที่ขนานกันของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้หาความยืดระหว่าง การทดสอบ

ความยาวพิกัด (L_0) หมายถึง ความยาวพิกัดก่อนการทดสอบ

ความยาวพิกัด (L_c) หมายถึง ความยาวพิกัดก่อนชิ้นทดสอบถูกดึงให้ขาดแล้วนำส่วนที่ขาดมาวางต่อ เข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรงเดียวกัน [9]

2.7 สี (Color)

สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ในการ อธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูด การมองเห็นสีของมนุษย์ เกิดจากการที่แสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นๆ มา กระทบตาเราและส่งไปสมองเพื่อแปลออกมาเป็นสีที่เห็น [3]

2.7.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็นมาจาก 2 แหล่งคือ

1.1 แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ได้แก่ แสงจากดวงอาทิตย์ หรือแสงแดดในตอนกลางวัน (Daylight) ส่องมายังพื้นผิวโลกเป็นแสงสีขาว และเมื่อผ่านปริซึมแสงสีขาวนี้จะแยกออกเป็นแถบสี ต่างๆ กัน 7 สี โดยแต่ละสีจะมีความยาวคลื่นต่างกันซึ่งอยู่ระหว่าง 400-780 นาโนเมตร แต่แสงแดด ในแต่ละท้องที่ของประเทศต่างๆ จะพบว่ามีการกระจายพลังงาน (Spectral Energy Distribution, SED) ที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาค ภูมิอากาศ ฤดู และช่วงเวลา ดังนั้นการมองเห็น สีที่มีแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติในช่วงเวลา สถานที่ หรือสภาพอากาศที่ต่างกันแล้ว ก็เป็นเหตุให้ การมองเห็นสีต่างกันไปด้วย

1.2 แหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่ หลอดไฟทังสเตน, หลอด ฟลูออเรสเซนต์, หลอดไฟซินอนอาร์ค

A : Incandescent หรือ Tungsten (มีอุณหภูมิ 2856 K)

F2 (CWF, F11, F02) : Cool White Fluorescent (มีอุณหภูมิ 4100 K)

F7 : Broad Brand Fluorescent Lamp (มีอุณหภูมิ 6500 K, CRI90) ซึ่งเทียบเท่ากับ CIE Illuminant D65

F11 : Narrow Tri-band Fluorescent (มีอุณหภูมิ 4000 K, CRI83)

F12 : Narrow Tri-band Fluorescent (มีอุณหภูมิ 3000 K, CRI83)

D50 : Horizontal Daylight แสงของดวงอาทิตย์ ช่วงดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก (มีอุณหภูมิ 5000 K)

D55 : Mid Morning / Mid Afternoon Daylight แสงของดวงอาทิตย์ช่วงสายๆ หรือบ่ายๆ (มีอุณหภูมิ 5500 K)

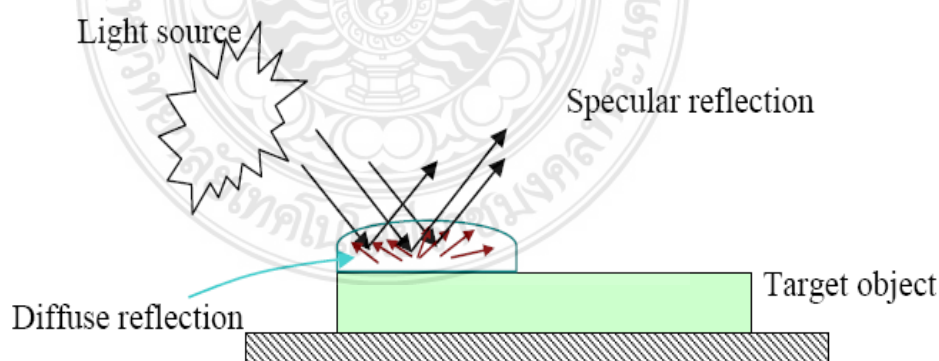
D65 : Average Noon Daylight เป็นแหล่งแสงที่นิยมกันมากที่สุด ช่วงดวงอาทิตย์ตอนเที่ยง (มีอุณหภูมิ 6504 K)

D75 : Overcast DayLight เป็นแสงอาทิตย์ช่วงเมฆครึ้ม (มีอุณหภูมิ 7500 K)

2. วัตถุที่มอง (Specimen) วัตถุที่ทึบแสง (opaque) จะให้การสะท้อนของแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุที่โปร่งแสง (Translucent) และโปร่งใส (Transparent)

ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ

เมื่อวัตถุทึบแสง ได้รับแสงกระทบจากภายนอก การสะท้อนแสงจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ การสะท้อนแสงเสมือนจริง (Specular Reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย (Diffuse Reflection) การสะท้อนแสงเสมือนจริงคือการสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือนและมีขนาดใกล้เคียงกับแสงตกกระทบแต่ทิศทางตรงข้าม การสะท้อนแสงเสมือนจริงจะแสดงออกมามากที่สุดเพียง 4% ของการสะท้อนแสงทั้งหมด (Total Reflection) ซึ่งจะเกิดในกรณีที่วัตถุมีผิวมันเงา 100% ดังนั้นการสะท้อนแสงเสมือนจริงในวัตถุที่มีผิวมันเงาจะมากกว่าวัตถุผิวด้านและผิวขรุขระตามลำดับ ส่วนการสะท้อนแสงกระจายเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณผิวจากวัตถุไปทุกทิศทางและมีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก ซึ่งการสะท้อนแสงกระจายนี้เองเป็นส่วนของการสะท้อนที่ใช้ในการวัดเฉดสีการสะท้อนแสงทั้งหมด (Total Reflection) = Specular Reflection+Diffuse Reflection

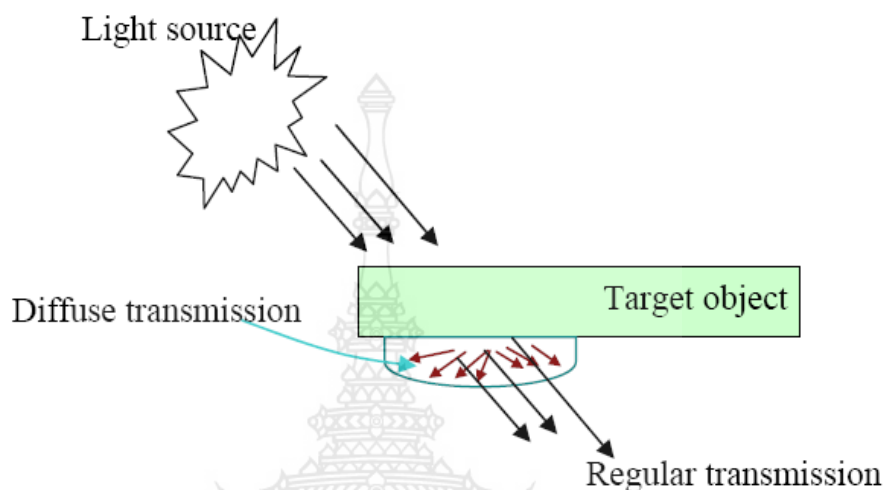


รูปที่ 2.17 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุทึบแสง

(ที่มา : http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/ea341/lesson2/ch02_6.pdf)

สำหรับวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส แสงจะทะลุผ่านวัตถุได้แตกต่างกัน วัตถุโปร่งแสงจะมีความขุ่นอยู่ภายในเนื้อและจะดูดกลืนแสงบางส่วนไว้ สำหรับวัตถุโปร่งใส นั้น แสงจะถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุ

เป็นส่วนใหญ่ การทะลุผ่านแสงมี 2 รูปแบบ คือ การทะลุผ่านปกติ (Regular Transmission) และการทะลุผ่านกระจาย (diffuse transmission) ถ้าวัตถุโปร่งแสงหรือมีความขุ่น เช่น กระจกทึบ การทะลุผ่านปกติจะน้อยกว่าวัตถุวัตถุโปร่งใส การวัดสีของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใสจะวัดที่ Diffuse Transmission ลักษณะเดียวกับการวัดสีแบบหลักการสะท้อนของแสงการทะลุผ่านแสงทั้งหมด (Total Transmission) = Regular Transmission+Diffuse Transmission



รูปที่ 2.18 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส
(ที่มา : http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/ea341/lesson2/ch02_6.pdf)

3. ผู้สังเกตการณ์ (Observer) เป็นปัจจัยสุดท้ายของการมองเห็นเมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุที่มีสีและสะท้อนเข้าตาผู้สังเกตการณ์แล้วส่งไปยัง เรตินาที่มีส่วนไวต่อแสงแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิดคือ ส่วนที่จะแยกความแตกต่างระหว่างความมืด และความสว่างที่เรียกว่า Rods และส่วนที่สามารถแยกสีที่เรียกว่า Cones แบ่งออกอีก 3 ชนิด คือส่วนที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินการมองเห็นด้วยตาจะบ่งบอกลักษณะของวัตถุได้ 3 ลักษณะคือ

1. สีที่ปรากฏในการมองเห็น เช่น สีแดง สีเขียวหรือสีน้ำเงิน เรียกว่า Hue
2. ความสว่างของสีซึ่งเป็นการสะท้อนของแสงที่มีค่าต่างกันเรียกว่า Lightness
3. ความสดใส ความเข้มและความบริสุทธิ์ของสี เรียกว่า Chroma

2.7.2 การวัดสี

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่าเครื่อง Spectrophotometer ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขได้ ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น Reflectance Curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมา ก็จะมีค่าความยาวคลื่นต่างกันโดยที่

สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร

สีเขียว มีความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร

สีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร

ระบบการวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer มีอยู่หลายระบบด้วยกัน คือ ระบบ Munsell ซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว, ระบบ Tristimulus Value, ระบบ Chromaticity Coordinate และระบบ CIE L*a*b* ระบบ Tristimulus Value ค่าที่หาได้ออกมาเป็น X, Y, Z โดยค่านี้จะระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างกันของสีที่มองเห็น จึงไม่สามารถที่นำมาใช้ประโยชน์อะไรได้มาก ระบบ CIE Chromaticity Coordinate เป็นวิธีการที่สามารถระบุความหมายของสีได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งค่าที่ได้เป็น

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

โดยที่ค่า x และ y เป็นค่าที่ระบุความเป็นสี ส่วนความสว่างของสีเป็นค่า Y แต่วิธีการวัดสีโดยวิธีการนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบอกค่าความแตกต่างของสีได้ดี ระบบ CIE L*a*b* เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ Color Space



รูปที่ 2.19 ระบบสี CIELAB (ที่มา : HunterLab)

โดยกำหนดให้ L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 จะพบว่าจุดๆ หนึ่ง ใน Space นั้น เป็น $L_1^* a_1^* b_1^*$ และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น $L_2^* a_2^* b_2^*$

ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีดังกล่าว

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

โดย ΔE คือค่าความแตกต่างของสี

เราอาจจะกล่าวได้ว่าการมองเห็นสีของมนุษย์และการวัดสีจากเครื่องวัดจะต้องอาศัยปัจจัย 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสีและและการอ่านค่าสี แต่กับการมองเห็นสีของมนุษย์นั้นจะพบว่า

แต่ละคน อาจจะอ่านค่าสีแตกต่างกันไป สำหรับเครื่องวัดสีนั้นจะให้ค่าที่ได้จากการวัดสีในทางอุตสาหกรรมการเป็นไป ตามมาตรฐานสากล รวมทั้งยังสามารถที่จะวัดค่าความแตกต่างของสีที่มีเฉดสีต่างออกไปเพียงเล็กน้อยได้ เป็นผลให้ในทางอุตสาหกรรมสามารถกำหนดให้ค่าความแตกต่างของสีได้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล, กรรมวิธีทางความร้อน, ความต้านทานการหมองและการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการหล่อโลหะเงิน+ทองแดง+สังกะสี+ซิลิกอน ด้วยเทคนิคการหล่อในเตาหล่อเหวี่ยงแบบสูญญากาศ 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 $1050^{\circ}C$ จากผลการวิจัยที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าในโครงการดังกล่าวไม่สามารถทำการศึกษาปริมาณของธาตุเจือรอง (Zn,Si) ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งตรงกับข้อสงสัยของผู้ประกอบการ SMEs ที่ทำการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา ที่ต้องมีการเติมสังกะสี หรือทองเหลืองเข้าไปในโลหะเงินเพื่อทำหน้าที่เป็นธาตุ Deoxidized หรือไล่แก๊สในน้ำโลหะ

สุรัตน์ วรรณศรี (2548) ได้ทำการศึกษาลักษณะข้อบกพร่องของโลหะเงินเจือทองแดง จากกรรมวิธีหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา พบว่าลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อสามารถสรุปลักษณะข้อบกพร่องและสาเหตุของการเกิดออกเป็น 3 ประเภทดังนี้คือ 1) ข้อบกพร่องที่ผิวที่เกิดจากส่วนผสมของโลหะความสกปรกของโลหะและปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะกับปูนแบบหล่อหรือบรรยากาศในการหล่อหลอมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามดผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริตกรอยแตกร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือและการหดตัวของโลหะ 2) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมแบบหล่ออัตราการผสมของน้ำกับปูนที่ใช้ทำแบบหล่อไม่เหมาะสมระยะเวลาในการผสมปูนไม่เหมาะสมทำให้ปูนมีการเซ็ตตัวก่อนที่จะเทลงกระบอกปูนเพื่อทำแบบหล่อการสั่นสะเทือนของแบบหล่อขณะที่ปูนกำลังเซ็ตตัวตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นผิวชิ้นงานหยาบมีคราบน้ำที่ผิวชิ้นงานรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและเนื้อปูนฝังในชิ้นงานหล่อเป็นต้นและ 3) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการหล่อหลอมโลหะอุณหภูมิของการหล่อโลหะไม่เหมาะสมและบรรยากาศในการหล่อไม่เหมาะสมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามดการเกิดฟองแก๊สในชิ้นงานรอยร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงานลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำปรีรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริตก เป็นต้น

LarryDimond. (1987) ได้สร้างโมเดลข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยขบวนการหล่อแบบ Investment casting ที่มีความสัมพันธ์ขบวนการหล่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมแบบหล่อล้วนมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อแทบทั้งสิ้น

Dieter Ott. (1991) ได้ทำการศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งบางองค์ประกอบจะเกี่ยวข้องกับเทคนิค และความละเอียดรอบคอบในการปฏิบัติงานหล่อ และในหลายๆกรณีจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาหรือเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ซึ่งประกอบด้วย การหดตัวของโลหะ การเกิดฟองแก๊สในน้ำโลหะหรือชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

Aldo M. Reti. (1997) ได้ทำการศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทองแดงและโลหะอื่นๆ ลงไป พบว่าธาตุเจือต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะโครงสร้างจุลภาค และนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการผสม Zn Ge และ Si เพื่อแก้ปัญหาการเกิด Fire Stain และศึกษาพฤติกรรมการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

John P. Nielsen. (1987) ได้ทำการศึกษาความแตกต่างและความแข็งแรงของแบบหล่อของขบวนการหล่อ Investment Casting ที่มีผลต่อความเสียหายของแบบหล่อในขบวนการหล่อขึ้นรูป และบริเวณของแบบหล่อที่มีลักษณะเป็นป่าหรือมีการหักมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ส่งผลให้เกิดพฤติกรรม Hot Tear กับชิ้นงานหล่อเครื่องประดับ ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด Hot Tear ประกอบด้วย ความซับซ้อนของแบบหล่อ พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะในโพรงแบบหล่อ อุณหภูมิหลอมละลายความร้อนในการหลอมละลายที่สูงเกินไป วัสดุทำโพรงแบบหล่อ อุณหภูมิโพรงแบบหล่อ และความสามารถในการหล่อขึ้นรูปของวัสดุ

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

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการสืบค้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนวัตกรรมย้อนรอยแห่งการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตทองขาวเจือดำ 8k เพื่อนำมาผลิตเครื่องประดับให้มีประสิทธิภาพอีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเครื่องประดับ โดยการสร้างแผนการปฏิบัติงานนี้เพื่อเสนอแนะและเป็นแนวทางการปฏิบัติงานที่เหมาะสม

3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ได้กำหนดแผนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์โดยมีแผนภาพการทำงานตามที่กำหนด



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน

3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ

การเตรียมโลหะในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบทองขาวเจือดำ 8k จะต้องใช้ส่วนผสมของอัลลอย และสูตรการทดลอง 3 สูตรโดยมีเนื้อโลหะที่จำเป็นต่อการทดสอบ ดังนี้ ทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง (Cu) สังกะสี(Zn) ดีบุก(Sn)

3.2.1 ทอง

ทองคำจะมีความแวววาวอยู่เสมอ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนั้น เมื่อสัมผัสกับอากาศสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม 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 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่า เช่นเดียวกับทองคำ ธาตุโลหะเงินมีสัญลักษณ์ทางเคมี Ag และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic) โลหะเงินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ในรูปแบบลักษณะเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือแสดงดัง รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง

โดยโลหะเงินที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นโลหะเงินความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือ

3.2.3 ทองแดง

ธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดง คุณสมบัติของการเจือเพื่อการทดสอบครั้งนี้โดยให้มีความสามารถด้านความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง

ทองแดงที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.9% มีลักษณะเป็นเม็ดที่สามารถนำมาเจือได้สะดวกแสดงดัง รูปที่ 3.4

3.2.4 สังกะสี

เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มีน้ำหนัก เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ซึ่งการทดลองครั้งนี้เจือเพื่อเพิ่มความสามารถด้านการหลอมละลาย เมื่อเจือธาตุสังกะสีอุณหภูมิการหลอมละลายจะต่ำลง ง่ายแก่การขึ้นรูปงานหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ลดขนาดของส่วนเจือนี้เพื่อความสะดวกโดยการเจาะเอาครีบหรือซี่เจาะให้เป็นแผ่นสะดวกแก่การใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 ดีบุก

ดีบุก (Sn) ปริมาณดีบุกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง เงินบริสุทธิ์สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19% อลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า อลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้เนื้ออลลอยนิ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 9% จะทำให้เกิด Cu_4Sn ซึ่งจะทำให้เปราะและในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น SnO_2 การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ลดขนาดของส่วนเจือนี้เพื่อความสะดวกโดยการเจาะเอาครีบริบหรือซีเจาะให้เป็นแผ่นสะดวกแก่การใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะดีบุกที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6 การออกแบบการทดลองเจือธาตุในอัตราส่วนต่างๆ

การดำเนินการหลอมโลหะที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์โลหะทองขาวเจือดำ 8k เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล (Tensile Test , Hardness Test) โดยทำการผสมอัลลอยตามอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับการศึกษาวเคราะห์สมบัติทางกล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบดังกล่าวที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

| อัตราส่วนผสม | สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|----|----|----|
| | Au | Ag | Cu | Zn | Sn |
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 33.33 | 50.67 | 10 | 5 | 1 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 33.33 | 50.67 | 8 | 7 | 1 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 33.33 | 50.67 | 8 | 8 | 0 |



รูปที่ 3.7 แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

3.3 ขั้นตอนการติดต้นเทียนสำหรับการหล่อ

การติดต้นเทียนคือการนำแบบเทียนที่ได้จากการฉีดและแต่งเรียบร้อยแล้วมาติดโดยรอบต้นโดยใช้หัวแร้งไฟฟ้าช่วยในการประสาน เมื่อติดต้นเสร็จแล้วจะนำไปสวมประกอบเข้ากับกระบอกเหล็ก ทำการเทปูนต่อไป (ดังรูปที่ 3.8)





รูปที่ 3.8 แสดงการติดต้นเทียนสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ

กระบวนการหล่อโลหะ คือ กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานวิธีหนึ่งที่ใช้โลหะหลอมเหลวในการสร้างชิ้นงาน หลักการสร้างชิ้นงานโดยการหล่อนั้นเริ่มจากการเทน้ำโลหะลงสู่ช่องว่างของวัสดุทนไฟที่เตรียมไว้ โดยช่องว่างดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานที่ต้องการหลังจากเทน้ำโลหะลงในช่องว่างแล้วก็จะปล่อยให้ น้ำโลหะเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวได้ชิ้นงานหล่อออกมามีลักษณะใกล้เคียงชิ้นงานจริง ในการหล่อแท่งทดสอบจะมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการเทปูน

การเทปูนคือ การผสมปูนกับน้ำตามสัดส่วนหลังจากติดต้นเทียนเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำต้นเทียนใส่ฐานยาง และเทน้ำปูนที่ผสมเสร็จตามสูตรของปูนที่นำมาเพื่อการทดลองเทลงกระบอกปูนที่มีต้นเทียนในนั้นการเทปูนเพื่อเตรียมสร้างโพลแบบก่อนกำจัดต้นแบบเทียนและส่วนของเทียนทั้งหมดออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อ ทำให้แม่พิมพ์ปูนเกิดเป็นโพรงต้นแบบขึ้นด้านใน พร้อมกับทางเดินน้ำโลหะ (ดังรูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์

3.4.2 การอบปูน

ในการอบปูนนั้นจะนำเบ้าที่เทปูนเสร็จแล้วเข้าเครื่องอบปูน ความร้อนในเตาอบจะช่วยในการกำจัดต้นแบบเทียนช่วงเวลาอบไล่เทียนใช้เวลา 3 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส และช่วยปรับอุณหภูมิของกระบอกหล่อให้มีความเหมาะสมกับอุณหภูมิในการหล่อในการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการอบเบ้างานหล่อที่ 720 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 แสดงการอบปูน

3.4.3 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงาน

กระบวนการหล่อเป็นแนวทางการขึ้นรูปโลหะเพื่อการสร้างขึ้นทดสอบเพื่อการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยเลือกการหล่อด้วยระบบแบบหล่อเหวี่ยง (ดังรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ

3.4.4 ขั้นตอนการล้างเบ้าโลหะหลังการหล่อ

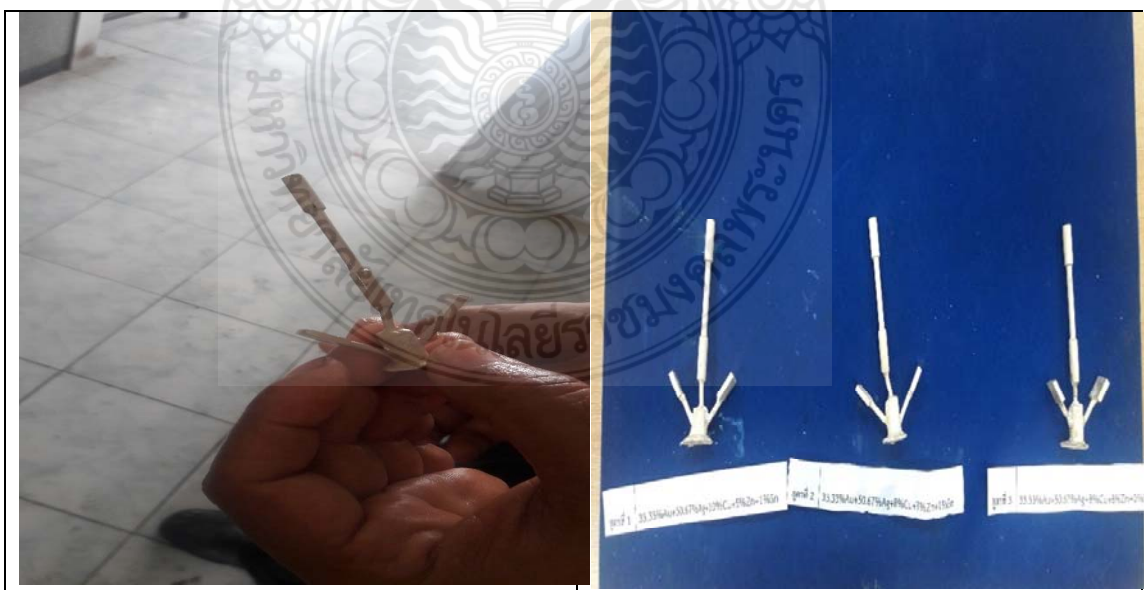
การล้างกระบอกละหลังการหล่อ ควรพักกระบอกลูกหลังจากหล่อไว้ 5-10 นาที เพื่อให้น้ำโลหะเกิดการเซตตัวหรือที่เรียกว่าการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งจากนั้นทำการล้างเบ้าด้วยน้ำเย็น เพื่อให้ปูนหลุดออกมือง่าย เมื่อชิ้นงานออกมาจากกระบอกละแล้วให้ทำสะอาดชิ้นงานให้สะอาด (ดังรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ

3.4.5 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานและขัดแต่งชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการตัดแต่งเอาเฉพาะงานชิ้นทดสอบหล่อออกจากส่วนที่เป็นกึ่งก้านรูเทรูล้นออก (ดังรูปที่ 3.13) และรวมไปถึงขั้นตอนการตะไบแต่งผิวส่วนที่ไม่เรียบบอกไป ชิ้นงานหล่อเพื่อชิ้นทดสอบจะถูกตัดโดยใช้เครื่องมือตัด เพื่อแยกชิ้นงานออกจากต้นไมหรือฐานของมันและพร้อมเพื่อการทดสอบด้านต่างๆ



รูปที่ 3.13 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

จากเม็ดอัลลอยที่มีความแตกต่างกัน ศึกษาและดำเนินการวิจัยส่วนผสมธาตุเจือของทองขาวเจือต่ำ 8k ธาตุทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) โดยจากการหลอมผสมโลหะให้ได้ส่วนผสมตามอัตราส่วน และทำการหล่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบทองขาวเจือต่ำ 8k จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณธาตุที่อัตราต่างๆ เป็นวิธีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ที่มีความรวดเร็ว สะดวกในการตรวจสอบ และมีความแม่นยำสูงของห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) อาคารไอทีเอฟ ทาวเวอร์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ

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

3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงดึงของทองขาวเจือต่ำ 8k ชิ้นงานทดสอบเพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะทองผสม เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง ตามมาตรฐาน ASTM E 8 M – 99 ซึ่งมีสัดส่วนการเจือต่างๆ ดังแสดงใน (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 ภาพแสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย)

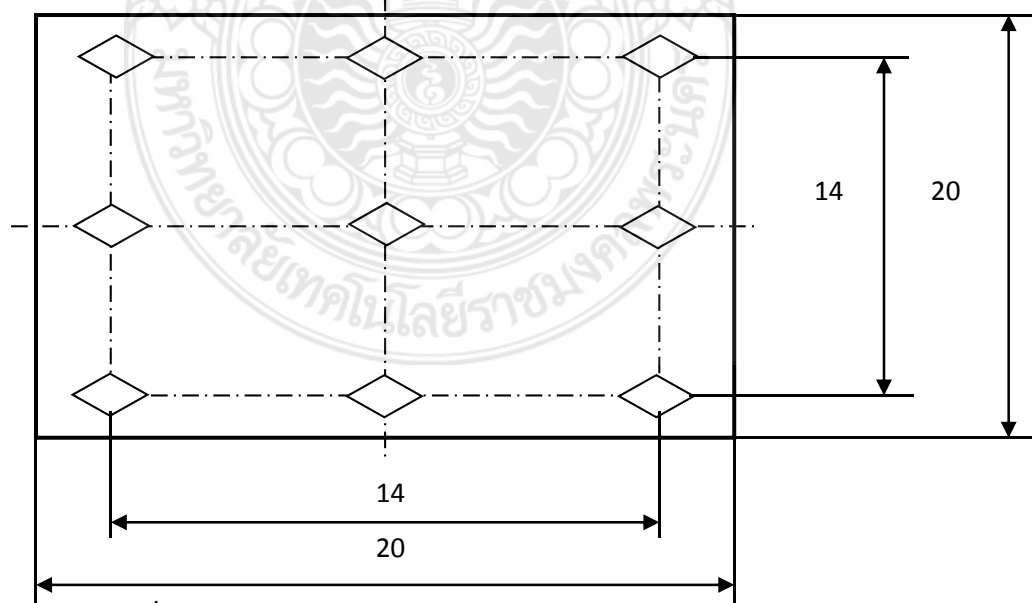
3.7 การทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Hardness Testing Machine ของ Mitutoyo, Japan รุ่น MVK-H11 ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ที่ได้รับการสอบเทียบความแข็งกับแผ่นทดสอบความแข็งมาตรฐานก่อนการทดสอบชิ้นทดสอบทุกครั้ง

สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) เพราะสามารถทดสอบความแข็งโลหะที่มีความแข็งแตกต่างกันได้ดีและยังสามารถเลือกแรงกดที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบได้ โดยแรงกดที่เลือกใช้คือ 9.81 N (HV) เวลาในการกดแช่ 30 วินาที การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งหน้าตัด 9 จุด ดังตำแหน่งการกดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.17 หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อต้องการทราบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 3.16 ภาพแสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine) (ที่มา : ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร)



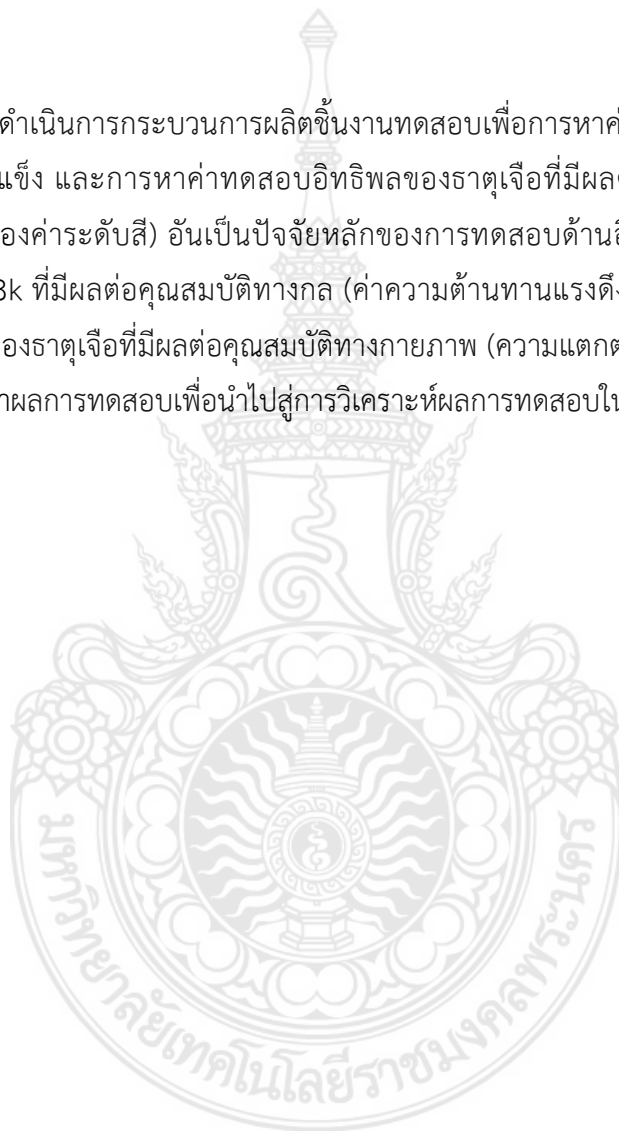
รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E 92-16 [9]

3.8 ทดสอบอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี)

โดยสำหรับวัดค่าความแตกต่างของค่าระดับสี ของโลหะโดยไม่มีการสูญเสียเนื้อของตัวอย่าง ทำได้รวดเร็ว แต่วิเคราะห์ได้เฉพาะส่วนประกอบบริเวณพื้นผิวนอกของชิ้นงานด้วยการตกกระทบและการหักเหของแสง ตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบผ่านการประมวลผลความแม่นยำสูงของการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีคอมพิวเตอร์(Spectrophotometer Mode Datacolor 600 TM) ของห้องปฏิบัติการทดสอบสี จากสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ

3.9 สรุป

จากการดำเนินการกระบวนการผลิตชิ้นงานทดสอบเพื่อการหาค่าทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง และการหาค่าทดสอบอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) อันเป็นปัจจัยหลักของการทดสอบด้านอิทธิพลของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าความแข็ง) การหาค่าทดสอบอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความแตกต่างของค่าระดับสี) โดยการทดลองครั้งนี้ได้นำผลการทดสอบเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผลการทดสอบในบทต่อไป



บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการศึกษาในบทนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาพัฒนาส่วนผสมของธาตุเจือที่เหมาะสมของโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k โดยทำการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลปริมาณของธาตุเจือเงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล การทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความแข็ง และความแตกต่างของระดับสี ซึ่งนอกจากนี้ผลของการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 24 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขาหนึ่งของประเทศ

4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k โดยการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณธาตุที่อัตราต่างๆ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1-4.2 และชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนทั้ง 3 ชนิด พบว่า โลหะผสมทุกสูตรที่ทำการผสมจริงมีอัตราส่วนและปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการสูญเสียปริมาณธาตุขณะทำการหลอมโลหะ จึงส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ตรวจพบมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k

| อัตราส่วนผสม | สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|----|----|----|
| | Au | Ag | Cu | Zn | Sn |
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 33.33 | 50.67 | 10 | 5 | 1 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 33.33 | 50.67 | 8 | 7 | 1 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 33.33 | 50.67 | 8 | 8 | 0 |

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k

| อัตราส่วนผสม | สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|-------|------|------|
| | Au | Ag | Cu | Zn | Sn |
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 33.74 | 51.70 | 10.32 | 3.20 | 1.04 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 33.78 | 52.75 | 8.88 | 2.67 | 0.92 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 35.34 | 52.34 | 8.89 | 3.43 | 0 |

หมายเหตุ ใบรายงานผลการวิเคราะห์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (GIT) ดังแสดงในภาคผนวก

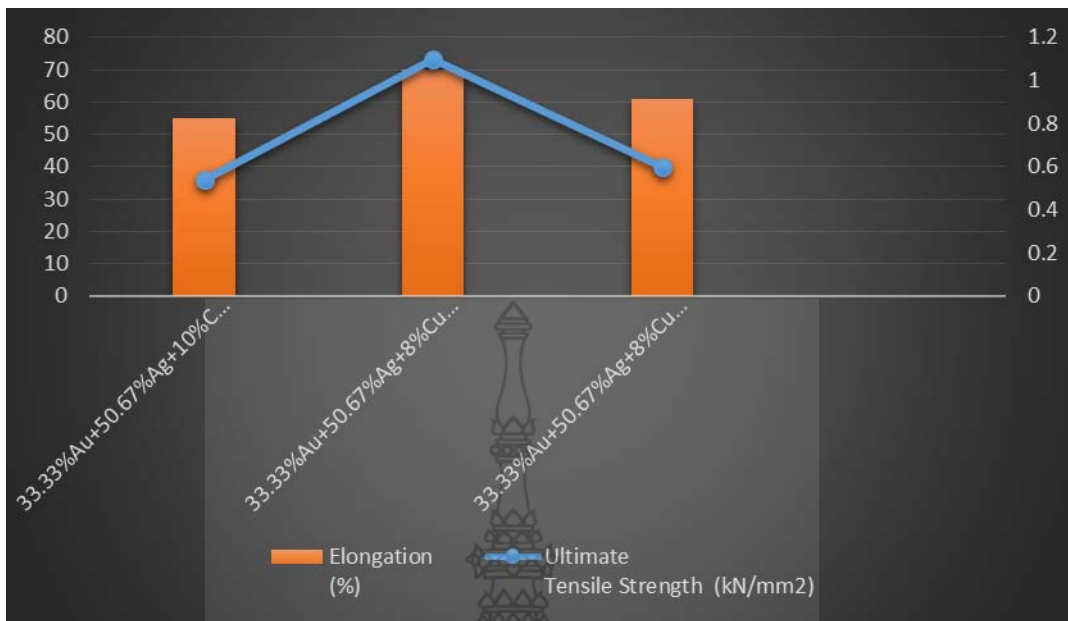
4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k 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 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn มีค่าสูงที่สุด และมีค่า Elongation สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ นอกจากนี้พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสม 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn และ 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn สมบัติทางกลแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้การที่อัตราส่วนผสมมีปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกันและอิทธิพลคุณสมบัติของธาตุแต่ละชนิดไม่เหมือนกันจึงทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงและมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงต่ำไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

| อัตราส่วนผสม | Force Max. (kN) | Strength Maximum (MPa) | Ultimate Tensile Strength (kN/mm ²) | Elongation (%) |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------|---|----------------|
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 1.67 | 184.09 | 0.54 | 55 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 1.78 | 198.08 | 1.10 | 70 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 1.55 | 180.33 | 0.60 | 61 |



รูปที่ 4.1 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

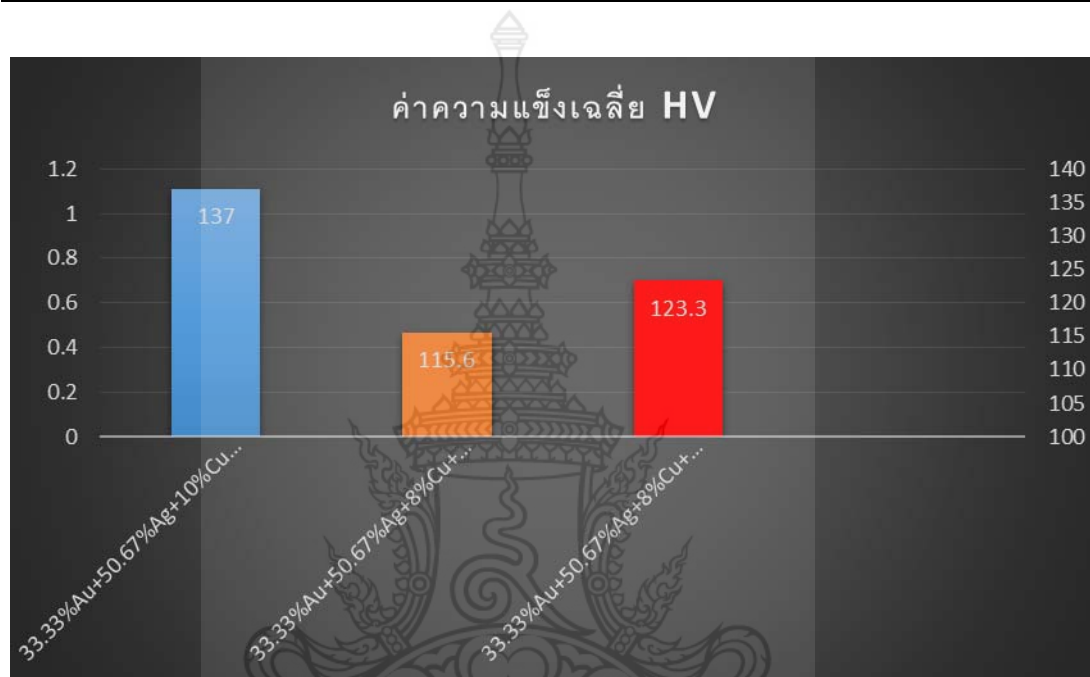
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

จากการศึกษาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k หลังเติมธาตุเงิน(Ag) ทองแดง (Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) เข้าไปในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในแต่ละด้านของชิ้นงานทดสอบ โดยเฉพาะค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) สามารถแสดงรายละเอียดค่าความแข็งดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 พบว่าโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราผสม 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn มีค่าความแข็งเท่ากับ 137.0 HV ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงส่วนผสม ซึ่งเกิดจากการผสมทองแดงและสังกะสีผสมเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะสารละลายของแข็ง และตรงกับทฤษฎีพื้นฐานทางโลหะวิทยาที่โลหะผสมจะมีความแข็งแรงสูงสุดที่ส่วนผสมยูเทคติก และปริมาณทอง(Au) เงิน(Ag) และทองแดง (Cu) ที่ผสมเข้าไปมีปริมาณค่อนข้างมากจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่สูงกว่าโลหะทองขาวเจือดำ 8k ของส่วนผสมอื่นๆ ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสม 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn มีค่าความแข็งค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีค่าเท่ากับ 123.3 HV และที่ในส่วน ของ อัตราส่วนผสม โลหะทองขาวเจือดำ 8k 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn มีค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 115.6 HV จากผลการทดสอบเป็นไปตามหลักทฤษฎีพื้นฐานทางโลหะ

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

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และ ดีบุก(Sn) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีผลต่อค่าความแข็ง

| อัตราส่วนผสม | ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV) |
|-----------------------------------|------------------------|
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 137.0 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 115.6 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 123.3 |



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.3 วิเคราะห์ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

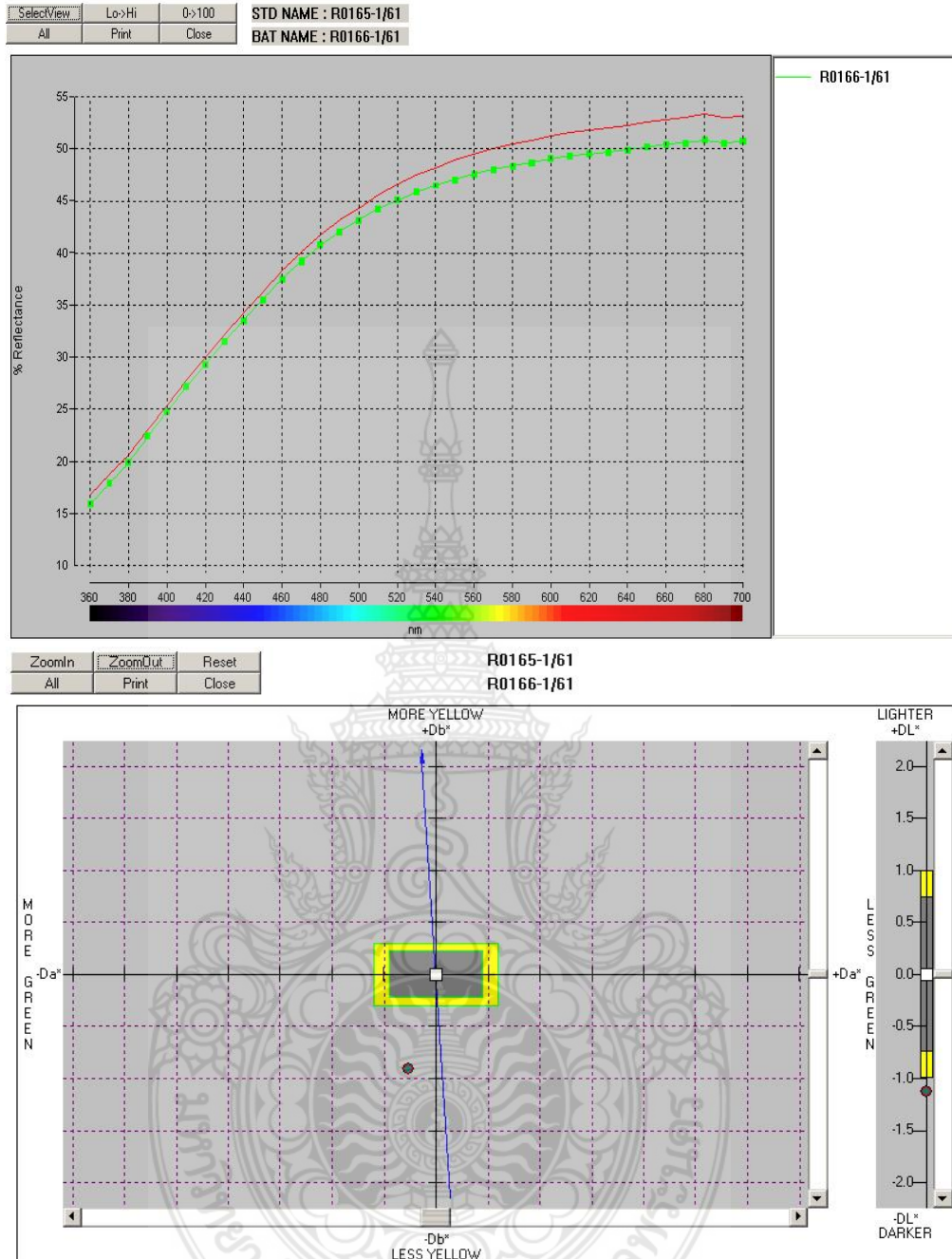
หลังจากทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของส่วนผสมต่างๆ โลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่ผลิตขึ้น ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ค่าระดับสีโดยใช้เครื่องมือสำหรับวัดค่าระดับสี จากการวิเคราะห์ค่าระดับสีโดยปริภูมิสีโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแตกต่างของ ΔL แทนระดับความสว่างของสี ($L = 0$ (สีดำ), $L = 100$ (สีขาว)), Δa แทนค่าความเป็นสีแดง - เขียว ($a = 100$ (สีแดงเข้ม), $a = -100$ (สีเขียว)), Δb แทนค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินเข้ม ($b = 100$ (สีเหลือง), $b = -100$ (สีน้ำเงินเข้ม)) แสดงพิกัดสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 โดยยึดปริภูมิสีระบบ CIELAB และนำค่าที่ได้จากการวัดวิเคราะห์ทดสอบมาคำนวณหาค่า ΔE เพื่อใช้อธิบายความแตกต่างของระดับสีตามทฤษฎีที่ใช้สำหรับการวัดค่าระดับความแตกต่างของสีทองคำ

ตารางที่ 4.5 พิกัดและระดับความแตกต่างของระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

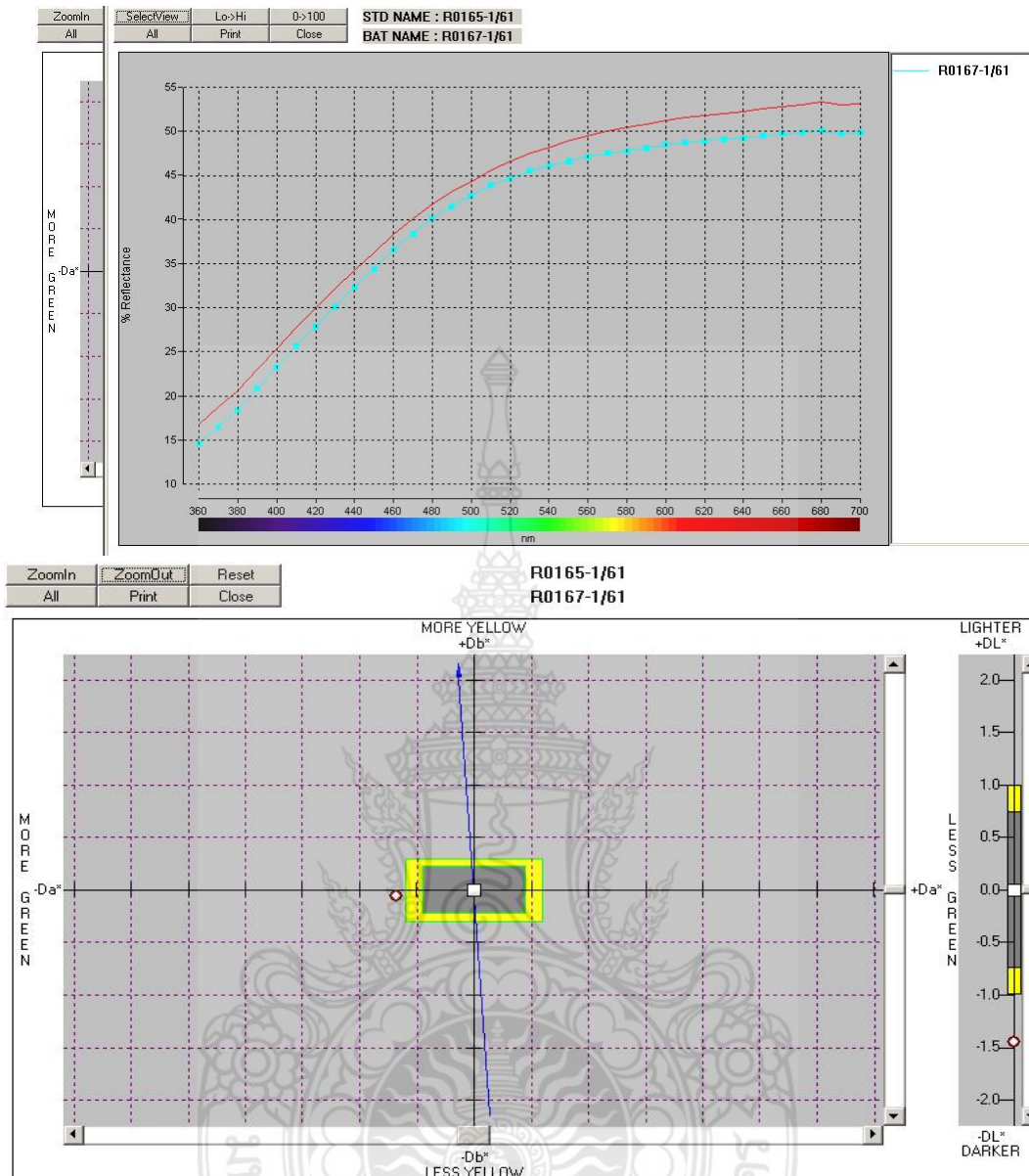
| ชิ้นทดสอบ\ ค่าปริภูมิสี CIELAB | Color Coordinates | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|
| | L* | a* | b* | ΔL | Δa | Δb | ΔE |
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | 74.87 | -0.89 | 13.74 | - | - | - | 1.35 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | 73.75 | -1.16 | 12.83 | -1.13 | -0.26 | -0.91 | 1.47 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | 73.42 | -1.57 | 13.67 | -1.45 | -0.67 | -0.06 | 1.60 |

ตารางที่ 4.6 พิกัดสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

| ชิ้นทดสอบ/ค่าปริภูมิสี CIELAB | | Color Coordinates | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | L* | a* | b* | C* | h | X | Y | Z | x | y |
| 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn | D65/10 | 74.87 | -0.89 | 13.74 | 13.77 | 93.73 | 45.27 | 48.07 | 39.17 | 0.34 | 0.36 |
| | A/10 | 75.66 | 2.40 | 13.79 | 14.00 | 80.11 | 55.84 | 49.34 | 13.21 | 0.47 | 0.42 |
| | F11/10 | 75.43 | -0.04 | 15.46 | 15.46 | 90.16 | 50.84 | 48.97 | 23.57 | 0.41 | 0.40 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn | D65/10 | 73.75 | -1.16 | 12.83 | 12.88 | 95.15 | 43.51 | 46.31 | 38.33 | 0.34 | 0.36 |
| | A/10 | 74.45 | 2.02 | 12.77 | 12.93 | 81.01 | 53.52 | 47.41 | 12.92 | 0.47 | 0.42 |
| | F11/10 | 74.25 | -0.27 | 14.42 | 14.43 | 91.06 | 48.81 | 47.09 | 23.07 | 0.41 | 0.40 |
| 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn | D65/10 | 73.42 | -1.57 | 13.67 | 13.76 | 96.55 | 42.91 | 45.81 | 37.20 | 0.34 | 0.36 |
| | A/10 | 74.13 | 1.83 | 13.50 | 13.63 | 82.26 | 52.88 | 46.91 | 12.57 | 0.47 | 0.42 |
| | F11/10 | 73.93 | -0.55 | 15.37 | 15.38 | 92.07 | 48.18 | 46.59 | 22.35 | 0.41 | 0.40 |



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบ

จากการวิเคราะห์ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าแนวโน้มมีค่าระดับสีที่มากไปหาน้อยหรือเข้าใกล้ค่าระดับสีโดยรวม ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ผสมเข้าไปมีอิทธิพลต่อค่าระดับตามปริภูมิสีที่สามารถวิเคราะห์ได้ และให้ค่าระดับสีต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นที่อัตราส่วนผสม 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn มีค่าความสว่าง (L^*) มากที่สุด เท่ากับ 74.87 ส่วนค่า ΔE ที่มีระดับความแตกต่างของระดับสีน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณธาตุที่ผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อระดับสีที่ได้มีความคล้ายและแตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อัลลอยสำหรับการผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักของอัลลอยเกือบทุกส่วนผสมประกอบไปด้วยธาตุเงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) ดังรายละเอียดสูตรที่ 1 : 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn สูตรที่ 2 : 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn และสูตรที่ 3 : 33.33%Au+50.67%Au+8%Cu+8%Zn+0%Sn สามารถสรุปได้ว่า ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก หรือสารเจือหลักในอัลลอยทอง 8k ประกอบไปด้วย เงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก โดยมีสารเจือหลักที่มีปริมาณเงินอยู่ในช่วงประมาณ 42-54% wt ทองแดงอยู่ในช่วงประมาณ 0-12% wt สังกะสีอยู่ในช่วงประมาณ 5-8% wt และดีบุกอยู่ในช่วงประมาณ 0-1% wt ซึ่งเป็นตามโลหะวิทยาของทองคำเจือ หรือทองคำกะรัตโลหะผสมระบบ ทองคำ เงิน ทองแดงและ สังกะสีที่แต่ละธาตุมีความสัมพันธ์กัน [2]

5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาสูตรการผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k โดยใช้วิธีการหลอมโลหะผสมเป็นชิ้นงาน ทดสอบด้วยเครื่องหล่อแบบเหวี่ยง และได้ทำการวิเคราะห์ศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึง และแรงกด) วิเคราะห์ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบ และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองขาวเจือดำ 8k มีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอม

5.1.2 จากการทดสอบ และวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึง และ ค่าความแข็งของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ส่วนผสมสูตรที่ 1 : 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn มีค่า Ultimate Tensile Strength ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.54 kN/mm² มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 55% และมีค่าความแข็งสูงที่สุดเท่ากับ 137.0HV ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงออกมาแบบนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุจะเป็นแบบเปราะ (Brittle Material) เมื่อนำไปขึ้นรูปจะเกิดการแตกหักได้ง่าย และกระบวนการขึ้นรูปจะเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้จะพบว่าผลการทดลองอีก 2 สูตรส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn, 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 1.10, 0.60 kN/mm² มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง 70, 61% และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 115.6, 123.3HV ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สูตรที่ 2 :

33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์ของการยึดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 70% และมีค่าความแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 115.6HV จะเหมาะสำหรับการขึ้นรูปเพราะมีคุณสมบัติเหนียว และยืดได้ดี (Ductile Material) การขึ้นรูปจะทำได้ง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลที่ดีในการขึ้นรูปโลหะมีค่า ต่อไป

5.1.3 จากการทดสอบ และวิเคราะห์ค่าระดับสีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k อัตราส่วนผสมที่มีค่าระดับสีของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมสูตรที่ 1: 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn มีค่าระดับสีที่ดีที่สุด คือ มีค่าความสว่าง L^* = 74.87 มีค่า a^* = -0.89, b^* = 13.74 และมีค่า ΔE ที่มีระดับความแตกต่างของระดับสีน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.35 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบของโลหะทองขาวเจือดำ 8k มีสีค่อนข้างเขียวมากและออกมาค่อนข้างเหลืองเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระดับเส้นสีน้ำเงินที่มีค่าเข้าใกล้กับเส้นมาตรฐาน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k ต่อไป

5.1.4 ส่วนผสมทางเคมีของอัลลอยสำหรับผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สามารถแบ่งออกตามประเภท ได้ดังนี้

1) ส่วนผสมทางเคมีของอัลลอย ในระบบทองคำเจือที่อิงระบบทอง เงิน ทองแดง สารเจือหลัก ซึ่งมีผลในระบบส่วนผสมทองคำเจือที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับสีทองแดงและเงินสามารถเพิ่มความแข็ง สารละลายจะเป็นส่วนผสมหลักโดยสารเจือหลักมีปริมาณเงินอยู่ในช่วงประมาณ 42-57% wt ทองแดงอยู่ในช่วงประมาณ 0-12% wt สังกะสีอยู่ในช่วง 5-8% wt และดีบุกคงที่ คือ 1% wt ตามลำดับ

2) ส่วนผสมทางเคมีของทองคำกะรัตที่ได้จากนำทองบริสุทธิ์ผสมอัลลอยสำหรับผสมทองคำกะรัต ในระบบทอง เงิน ทองแดงและสังกะสี อิทธิพลของเงินที่มีต่อทองคำเจือ เงินเป็นโลหะที่ช่วยเพิ่มความแข็งเมื่อผสมลงไปในทองคำเจือมีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผสมทองแดงและสีที่เปลี่ยนแปลงไปทางขาว อิทธิพลของทองแดงที่มีต่อทองคำเจือทองแดงสามารถเพิ่มความแข็งให้กับทองคำเจือได้มากกว่าเมื่อเทียบกับเงินและสีที่เปลี่ยนแปลงไปทางสีแดง หรือชมพู อิทธิพลของสังกะสีที่มีต่อทองคำเจือ จะส่งผลทำให้แนวโน้มของทองคำระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสีมีความแข็งน้อยลงกว่าทองคำระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดงลดการเกิดออกซิเดชัน สีที่เปลี่ยนไปทางขาว และเพิ่มสภาวะการไหลลื่นในระบบทองคำเจือ ส่วนธาตุเจือดีบุกปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง และจะทำให้เนื้ออัลลอยนิ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะจากผลการทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นทดสอบของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ในอัตราส่วนผสมของสูตรที่ 1: 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโลหะทองขาวเจือดำ 8k เนื่องจากมีค่าระดับสีและค่าความสว่างมากที่สุด

การทดลองนี้ ส่วนชั้นทดสอบของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ในอัตราส่วนผสมของสูตรที่ 2: $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ มีผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่ผู้วิจัยยังคงต้องเปรียบเทียบผลการวิจัยในเรื่องของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับผลิตชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งอยู่ในแผนงานวิจัยนี้ต่อไป

5.2.2 ควรทำการศึกษาาระบบทองคำเจืออื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนผสมรองอีกหลายชนิดที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค ความเรียบผิว และระดับสีของทองคำกะรัตผสมอัลลอยของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ในโครงการนี้เป็นเพียงตัวอย่างอัลลอยในระบบทองคำ-ทองคำและเงินมาตรฐาน และยังไม่ได้ทำการศึกษาในระบบทองคำเจือระบบอื่นๆ หรือส่วนผสมรอง จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยอิทธิพลของโลหะผสมรองชนิดต่างๆ ที่สามารถเข้าไปในโลหะทอง นอกเหนือจากระบบทองคำเจือระบบทองคำ-ทองแดง-เงินและสังกะสี



บรรณานุกรม

1. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,การใช้งานทองและทองผสม, การสัมมนาโครงการวิจัย คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ, 2541,76 หน้า
2. สมนึก วัฒนศรีกุล. การทดสอบวัสดุ (Material Testing). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549. หน้า 13-19
3. เอกสารสรุปจากโครงการจัดการองค์ความรู้ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2556 (<http://cms2.swu.ac.th/Portals/155>)
4. 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.
5. Katsuhiko Yasuda. Age Hardening and Relate Phase Trans for major in Dental Gold Alloys. Gold Bulletin.20 1982 : 90-103 pp.
6. Dieter Ott. Optimizing Gold Alloys For The Manufacturing Process. Gold Technology, Issue No.34, World Gold Council, 2002, 37-44 pp.
7. 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.
8. Ing. F.Arbin, 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.
9. Dave Sehneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
10. Cristopher W. Corti. Assaying of Gold Jewelry-Choice of Technique. Gold Technology, Issue No. 32, World Gold Council, 2001, 20-30 pp.
11. Gold Technology, Issue No.1 : Gold Alloy Data, World Gold Council,1990,6-17 pp.
12. Cristian Cretu, Elma van der Lingen. Colored Gold Alloys. Gold Technology, Issue No.30, World Gold Council, 2000, 31-40 pp.
13. Deuseh Normen. DIN 8238 Colors of Gold. August 1996.

ภาคผนวก

ใบรายงานผลการทดสอบ/วิเคราะห์ จากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
Iron and Steel Institute of Thailand

ใบรายงานผลการวิเคราะห์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การ
มหาชน) (สวอ)

The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

ใบรายงานผลการทดสอบ จากสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ
Thailand Textile Institute



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอาวุธ ฉายศิริ
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Awut Chaysiri
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 3 7201 00460 51 6
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร
สาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์/โทรสาร: 0-2836-3000 ต่อ 4187
โทรศัพท์มือถือ: 09-5942-3396 [E-mail : awutxime@outlook.co.th](mailto:awutxime@outlook.co.th)
5. ประวัติการศึกษา
ค.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์
วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
6. ความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)
การทำต้นแบบโลหะ, การทดสอบทางกล, ไทโรโบโลยี, ปรับปรุงสมบัติโลหะมีค่าสำหรับการผลิต
เครื่องประดับ
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วม
วิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
 - 7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาอิทธิพลส่วนผสมโลหะทองขาว 6k ที่มีผลต่อ
สมบัติทางกายภาพสำหรับกระบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ทุนสนับสนุนงานวิจัย
งบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2560
 - 7.2 ผู้ร่วมวิจัย : โครงการวิจัย การศึกษาและพัฒนาส่วนผสมโลหะของน้ำประสานทองสำหรับการ
ผลิตตัวเรือนเครื่องประดับทอง 18k เพื่อเพิ่มมูลค่า ทุนสนับสนุนงานวิจัย สำนักงานกองทุน
สนับสนุนการวิจัย (สกว.) 2558
 - 7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน
อาวุธ ฉายศิริ และคณะ การศึกษาหาส่วนผสมของทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหมาะสม
เพื่อใช้ทดแทนวัสดุเงินสเตอร์ลิง 925 Proceeding of the 2 RMUTP Conference
Engineering and Technology, 2560.P.152