



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ
โลหะเงินเจือสีชมพู 54%

A study an optimum casting condition for manufacturing
jewelry setting of Composition Pink silver 54%

ประเสริฐ ชุมปัญญา

Presert Chumpanya

จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง

Jakkrit Yimchang

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัย : การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงิน
เจือสีชมพู 54%

ผู้วิจัย : ประเสริฐ ชุมปัญญา, นายจักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง

บทคัดย่อ

จากผลการทดลองหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับสำหรับโลหะเงินเจือสีชมพูเพื่อทดลองหาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเข้าปูนหล่อที่เหมาะสม พบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสชิ้นงานดี 26% ชิ้นงานเสีย 74% อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสชิ้นงานดี 26% ชิ้นงานเสีย 74% อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสชิ้นงานดี 40% ชิ้นงานเสีย 60% มีผิวงานใกล้เคียงกันพบว่าชิ้นงานเสียเป็นครีบเป็นส่วนมาก มีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดครีบบนชิ้นงาน การใช้ปูนหล่อที่แรงยึดตัวต่ำ อีกทั้งการใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไปหรือการให้ความร้อนเปลี่ยนอย่างฉับพลันทำให้เกิดการขยายตัวและการหดตัวไม่เท่ากัน จึงก่อให้เกิดรอยแตกร้าวจากแรงดันน้ำโลหะเข้าไปขยายตัว ในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสชิ้นงานดี 56% ชิ้นงานเสีย 44% อุณหภูมินี้พบว่าชิ้นงานเสียเกิดจากผิวงานไม่เรียบมากที่สุด สาเหตุเกิดจากอัตราการเย็นตัวในแต่ละส่วนของงานหล่อไม่เท่ากัน และในอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่สุดในการหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพูเนื่องจากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานเสียมีน้อยที่สุด พบว่ามีชิ้นงานดี 70% ชิ้นงานเสีย 30%

คำสำคัญ : อุณหภูมิ, การหล่อ, เงินสเตอร์ริง

Abstract

The results of the experiments were found that the temperature of the castings was higher than that of the silver alloys. The workpiece temperature is 500C, the workpiece is good 26%. The workpiece is 74%. The temperature is 550C. The workpiece is 26%. The workpiece is 74%. The temperature is 600C. The workpiece is 40%. The workpiece is 60%. The workpiece is a fin. There are many factors that cause fins on the workpiece. Use of low-strength mortar In addition, the use of excessive compression or heat transfer, resulting in the expansion and shrinkage is not equal. This causes the cracking of the metal water to expand at a temperature of 650 ° C. The fine specimen 56% of the workpiece loses 44%. This temperature results in the smallest workpiece caused by the uneven surface. Cause of the cooling rate in each part of the casting is not equal. And at 700 degrees Celsius, it is best to cast silver ornaments with pink color because the results show that the work is minimal. There are 70% good work piece 30%

Keywords: temperature, castings, sterling silver

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึง อาจารย์ประจำสาขาวิชา เทคโนโลยีแม่พิมพ์ เครื่องประดับ ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทำให้นักวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



สารบัญ

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อ | ก |
| กิตติกรรมประกาศ | ข |
| สารบัญ | ค |
| สารบัญตาราง | ง |
| สารบัญรูป | จ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 โลหะเงิน | 4 |
| 2.2 โลหะแพลเลเดียม | 22 |
| 2.3 การหลอมโลหะ | 18 |
| 2.4 เทคนิคและวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB | 19 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย | 33 |
| 3.1 บทนำ | 33 |
| 3.2 แผนการดำเนินการ | 33 |
| 3.3 ออกแบบการทดลองค่าระดับสีของส่วนผสมโลหะเงินเจือสีชมพู | 34 |
| 3.4 ออกแบบการทดลองการหล่อโลหะเงินเจือสีชมพู | 35 |
| 3.5 สรุปผล | 51 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ | 52 |
| 4.1 ผลการดำเนินงาน | 52 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าระดับสี | 52 |
| 4.3 สรุปผล | 57 |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ | 58 |
| 5.1 สรุปผลที่ได้จากการวิจัย | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 59 |
| บรรณานุกรม | 60 |
| ภาคผนวก | 61 |

| สารบัญญัตินำ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส | 4 |
| 2.2 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ | 5 |
| 2.3 ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM | 6 |
| 2.4 คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97 % ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน | 6 |
| 2.5 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ | 10 |
| 2.6 สมบัติทางกายภาพของทองคำ | 13 |
| 2.7 สมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป | 13 |
| 2.8 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในทองคำกะรัตต่างๆ | 15 |
| 2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิสัยความถี่ตามมาตรฐาน DIN 8238 | 32 |
| 3.1 วัดค่าระดับสีโลหะเงินเจือสีชมพูตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB | 34 |
| 3.2 ตารางแสดงเกณฑ์การประเมินชิ้นงาน | 41 |
| 3.3 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 500°C | 42 |
| 3.4 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 550°C | 44 |
| 3.5 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 600°C | 46 |
| 3.6 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 650°C | 48 |
| 3.7 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 700°C | 50 |
| 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี - ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 500°C | 51 |
| 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี - ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 550°C | 52 |
| 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี - ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 600°C) | 53 |
| 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี - ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 650°C | 54 |
| 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี - ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 700°C | 54 |
| 4.6 การหาของเสียทางเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากกระบวนการผลิตโลหะเงินเจือสีชมพู | 56 |
| 4.7 แผนภูมิแสดงการหาของเสียทางสถิติเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากกระบวนการผลิตของอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพู | 57 |

สารบัญรูป

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.1 | แสดงลักษณะสารละลายของแข็ง | 7 |
| รูปที่ 2.2 | แสดงแผนภาพสมดุลเฟสของทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน -ทองแดง | 16 |
| รูปที่ 2.3 | แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนของแผนภาพสมดุลเฟสของทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ - เงิน-ทองแดง | 16 |
| รูปที่ 2.4 | แสดงแผนภาพสมดุลเฟสของทองคำเจือในระบบ 3ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเจือ | 17 |
| รูปที่ 2.5 | ภาคตัดในแนวตั้งที่ 18 14 และ 10 กระรัต บนแผนภาพสมดุล ทองคำ-เงิน-ทองแดง | 17 |
| รูปที่ 2.6 | ไดอะแกรมสี x, y ของ CIE ในปี 1931 | 20 |
| รูปที่ 2.7 | ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function) | 21 |
| รูปที่ 2.8 | ภาพสีรุ้งของรุ้งกินน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ | 22 |
| รูปที่ 2.9 | ภาพคลื่นแสงในช่วงความยาวที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ที่เรียกว่า Visible Light | 22 |
| รูปที่ 2.10 | ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี a^* , b^* | 23 |
| รูปที่ 2.11 | ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (B) ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b (L^*a^*b Color Space) | 24 |
| รูปที่ 2.12 | ค่าสัมประสิทธิ์สี a^* , b^* ที่ใช้แสดงค่าปริภูมิสีระบบ L^*C^*h | 25 |
| รูปที่ 2.13 | ค่าโครมาและความสว่าง | 26 |
| รูปที่ 2.14 | ค่าความแตกต่างสีในปริภูมิสีระบบ L^*a^*b | 27 |
| รูปที่ 2.15 | ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี a^* , b^* ในปริภูมิสีระบบ L^*C^*h | 30 |
| รูปที่ 2.16 | พิกัดการวัดสี | 31 |
| รูปที่ 3.1 | แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน | 33 |
| รูปที่ 3.2 | อุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อ | 35 |
| รูปที่ 3.3 | ต้นแบบชิ้นงาน ติดก้านแหวน ชัดผิวชิ้นงานให้มีความสมบูรณ์ | 36 |
| รูปที่ 3.4 | แม่พิมพ์ยาง | 36 |
| รูปที่ 3.5 | การฉีดเทียน | 37 |
| รูปที่ 3.6 | แสดงการติดต้นแว็กซ์ | 37 |
| รูปที่ 3.7 | เทปูนลงเข้าทรงกระบอก | 38 |
| รูปที่ 3.8 | แสดงเตาอบเข้าปูนและตั้งเซตอุณหภูมิอบเข้าปูน | 38 |
| รูปที่ 3.9 | แสดงการเซตอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อทั้ง 5 อุณหภูมิ | 39 |
| รูปที่ 3.10 | ล้างชิ้นงานด้วยกรดกัดแก้ว | 40 |
| รูปที่ 3.11 | ชิ้นงานสำเร็จ | 40 |
| รูปที่ 3.12 | ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 500°C | 41 |
| รูปที่ 3.13 | ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 550°C | 47 |
| | | 49 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 3.14 | ตั้งเซ็ตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 600°C | 45 |
| รูปที่ 3.15 | ตั้งเซ็ตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 650°C | 47 |
| รูปที่ 3.16 | ตั้งเซ็ตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 700°C | 49 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

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

ได้มีการประชุมร่วมกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ได้ข้อสรุปว่า ปัญหาสำคัญ (Major Problem) เกี่ยวกับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ได้แก่

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

2. ปัญหาด้านวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากในขบวนการผลิตเครื่องประดับจะต้องมีการเชื่อมประสานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นในส่วนของ การเชื่อมกระเปาะสำหรับฝังพลอยเข้ากับตัวเรือนของจี้ ต่างหู หรือแม้แต่กำแหวน และนอกจากนี้ยังรวมถึงการเชื่อมประสานเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จโดยการเชื่อมปิดรอยตำหนิหรือตามด และหรือรอยตำหนิจากการหดตัวของชิ้นงานจากขบวนการหล่อขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานเหล่านี้จะต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมต่ำกว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับ แต่จะต้องมีปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าผสมอยู่ตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้สำหรับการแบ่งชนิดของโลหะมีค่าเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และ

นอกจากนี้สีของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนให้มากที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงความแตกต่างระหว่างสีของวัสดุตัวเรือนและวัสดุเชื่อมประสาน

3. ปัญหาด้านการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ เนื่องจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ยังมีผลงานการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ค่อนข้างน้อย ไม่สามารถทำการศึกษาวิจัยได้ครอบคลุมสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ประกอบการที่เป็น SMEs. เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซ LPG และออกซิเจนที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อเหยียงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา (Torch หรือ Burner) แบบสัมผัสบรรยากาศเปิดปกติ ตัวแปรของอุณหภูมิน้ำโลหะและแบบหล่อที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของบรรยากาศที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ และอิทธิพลของขนาดทางเดินน้ำโลหะที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ เป็นต้น

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

5. ปัญหาทางด้านวิกฤติเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลา 2-3 ปีที่ผ่านมาและต่อเนื่องจนถึงทุกวันนี้ และราคาของโลหะมีค่าต่างๆ ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ส่งผลให้พฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจสินค้าเครื่องประดับที่มีราคาถูก แต่ยังคงต้องการเครื่องประดับที่ผลิตจากโลหะมีค่าต่างๆ เช่นเดิมโดยมีการลดปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าลง และนอกจากนี้กลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่มหันมาให้ความสนใจเครื่องประดับที่ผลิตจากสแตนเลสและทองเหลืองมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุที่ใช้ในการผลิตเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภค

ปัญหาของภาคอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยของโครงการวิจัยนี้ จะทำการศึกษาพัฒนาเพิ่มมูลค่าของโลหะเงินเจือสีชมพู 54% เงินบริสุทธิ์ซึ่งเป็นวัสดุหลัก โดยทำการศึกษาวเคราะห์อิทธิพลของเงินบริสุทธิ์ (Ag) ธาตุเจือทอง (Au) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคความแตกต่างของคาร์บอไนต์ และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปโลหะเงินเจือสีชมพู 54% เพื่อสร้างองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยี

ให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ เป็นนวัตกรรมใหม่ของวัสดุทางเลือกที่มีให้กับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

ประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 20 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยกระบวนการทางกลของการเกิดโลหะเงินเจือสีชมพู
2. ศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือสีชมพู

54%

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและดำเนินการวิจัยโลหะเงินเจือสีชมพู ที่มีปริมาณของโลหะเงินบริสุทธิ์ (Ag) 54.00 % และมีธาตุเจือทอง (Au) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) รวมกันไม่เกิน 46 %

2. ศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือสีชมพู

54%

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้นวัตกรรมโลหะเงินเจือสีชมพู สีใหม่ ๆ ให้แก่ภาคอุตสาหกรรม
2. ลดการนำเข้า silver alloy สีชมพูจากต่างประเทศ
3. ได้ทราบข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินในส่วนที่ต่างจากค่ามาตรฐาน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะเงิน

2.1.1 คุณสมบัติโลหะเงิน

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

ก. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะเงิน เป็นโลหะสีขาวมันวาว อ่อนนิ่ม ก่อนโลหะเงินสามารถตีแผ่หรือรีดเป็นแผ่นบางๆ ได้บางถึง 0.00025 มม. โดยทั่วไปโลหะเงินไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 190°C ผิวของโลหะเงิน ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน ๆ จะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากมีซัลเฟอร์ (Sulfur) อยู่ในอากาศมาก โลหะเงินบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ 960.8°C จุดเดือดที่อุณหภูมิ 2210°C ซึ่งจะช่วยให้กลายเป็นไอสีขาวเงิน ในขณะที่โลหะเงินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโลหะเงินสามารถดูดกลืน(Absorb) ออกซิเจนได้ประมาณ 20 เท่า คุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพของโลหะเงินสามารถ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส

| 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 10.49 g/cc ที่อุณหภูมิ 20°C ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต การขึ้นรูปและการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ อาทิเช่น การหล่อขึ้นรูป การรีด การตัดและการกดลากขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การอบเป็น เนื้อเดียว การอบอ่อน และการอบเพิ่มความแข็ง ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ

| 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 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM

| สารเจือปน | ปริมาณสารเจือปน(%) | ปริมาณสูงสุด ASTM (%) |
|-------------|--------------------|-----------------------|
| Silver | - | 99.95 (min) |
| Copper | 0.05 | 0.08 |
| Lead | 0.004 | 0.025 |
| <i>Iron</i> | 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 กันพบว่า ความต้านทานแรงดึง อัตราการยืดตัวและความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97 % ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน

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

ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรท (Argentic Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูนาร์คอสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต

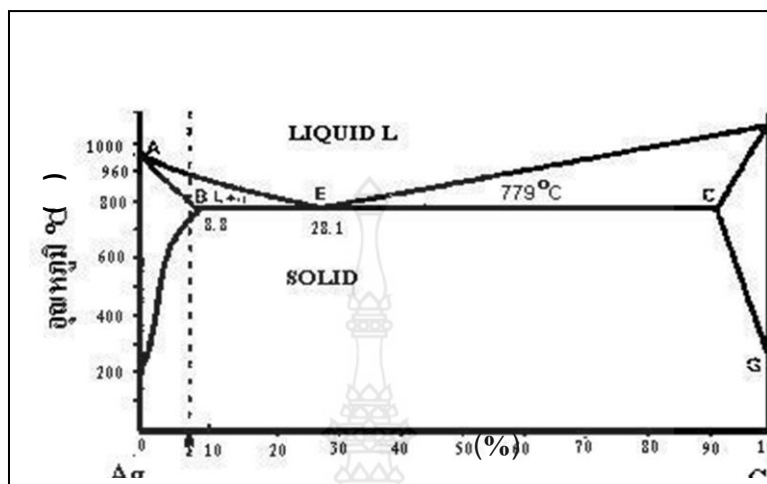
(Argentic Sulphate) กบปให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide) กรดซัลฟูริกเจือจางไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเงินได้ในลักษณะของซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulphate)

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

การตกตะกอนของเงิน กรดไฮโดรคลอริกและคลอไรด์ทำให้เงินคลอไรด์ตกตะกอนเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งถ้าให้ความร้อนและคนให้ทั่ว สารละลายจะมีลักษณะเป็นขุยและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกับแสง ตะกอนจะมีสีเทาอมน้ำเงินและค่อยๆ เป็นสีม่วง จนในที่สุดจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ

2.1.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ใช้สำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน มีคุณสมบัติทางกลอ่อนนุ่ม ความสามารถในการคงรูปต่ำไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งาน จึงต้องมีการเจือธาตุเจือลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติด้านการหล่อขึ้นรูปและเพิ่มความต้านทานการหมอง ซึ่งธาตุเจือที่เจือเข้าไปจะต้องไม่ทำให้คุณค่าและความสวยงามของโลหะเงินลดลง ธาตุเจือหลักที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ทองแดง เพราะทองแดง มีคุณสมบัติที่สามารถละลายรวมกับเงินได้ในลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ดังรูปที่ 2.1 และนอกจากนี้ ทองแดงยังมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงิน จากการตกตะกอน (Precipitate) ของทองแดงด้วยกระบวนการ Precipitation Strengthening



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะสารละลายของแข็ง

ในสภาวะสารละลายของแข็งของโลหะเงินเจือทองแดง (Solid Solution of Copper in Silver Alloy) และโลหะทองแดงเจือเงิน (Silver in Copper Alloy) ซึ่งมีจุดยูเทคติกส์ที่ 28.1 เปอร์เซ็นต์ทองแดง ความสามารถในการละลายทองแดงในเงินสูงสุดที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ทองแดง โดยความสามารถของการละลายทองแดงในเงินจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ สำหรับในกรณีของโลหะเงินเจือทองแดงที่มีปริมาณของทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกันที่สภาวะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution (α), Secondary Copper-rich

Solid Solution (β) ที่เกิดจากทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วย ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 745°C ขึ้นไปโครงสร้างจะเป็น Primary Silver-rich Solid Solution (α) เพียงเฟสเดียว แต่ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 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)

2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน

สินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็นผลผลิตที่เกิดจากงานช่างฝีมือทางด้านศิลปหัตถกรรมที่แสดงถึง วัฒนธรรมของชนชาติไทยโดยเฉพาะ จึงเป็นสินค้าที่รู้จักกันแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับของชาวต่างประเทศทั่วโลก นับได้ว่าเป็นการเผยแพร่งานศิลปหัตถกรรม วิจิตรกรรมและวัฒนธรรมไทยให้ชาวโลกได้รู้จักประเทศไทย เพื่อเป็นการรักษาชื่อเสียงของประเทศ ในการส่งออกสินค้าเครื่องเงินที่ผลิตจากโลหะเงินสเตอร์ลิงให้มีคุณภาพดีมีมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เครื่องเงิน มอก.21-2515 ซึ่งได้มีการนำมาใช้รับรองคุณภาพสินค้าเครื่องเงินจนถึงปัจจุบัน และถือเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงินที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ว่าด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับชนิดและคุณลักษณะที่ต้องการของเครื่องเงินรวมทั้งวิธีทดสอบเครื่องเงินและยาถมเพื่อหาปริมาณโลหะเงินบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ก. เครื่องเงิน หมายถึงวัสดุที่ทำด้วยโลหะเงินหรือประกอบขึ้นจากโลหะเงินเป็นส่วนสำคัญ
- ข. โลหะเงินมาตรฐาน หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะชนิดอื่นปนไม่เกินร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก
- ค. โลหะเงินบริสุทธิ์ หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะอื่นปนไม่เกินร้อยละ 0.01 ของน้ำหนัก
- ง. ยาถม หมายถึงสารเคมีที่มีโลหะเงินบริสุทธิ์เป็นส่วนผสมไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 ของน้ำหนักสำหรับใช้ในการลงยาถม
- จ. ยาสี หมายถึงสารเคมีสีสำหรับใช้ในการลงยาสี

2.1.4 ลักษณะทั่วไปของเงินเจือประเภทต่างๆ

Ag950 มีลักษณะเช่นเดียวกับเงินบริสุทธิ์ และด้านการเกิดออกซิเดชัน หลังการอบเหนียวจะเกิดออกไซด์ ที่ผิวนอกเกือบจะถึงผิวใน และจะไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับชั้นของออกไซด์ จุดหลอมเหลวที่สูงจะเหมาะกับการชุบผิว อย่างไรก็ตาม โลหะจะมีความแข็งเท่ากับเงินบริสุทธิ์และสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ และขึ้นรูปได้ดี และยังสามารถทำให้บางได้ถึง 75 % ในระหว่างการอบเหนียวและต่อเนื่องกัน เพราะฉะนั้นวัสดุนี้เหมาะกับการขึ้นรูป (Ag950) และสามารถดัดเป็นลวดได้ดี

ส่วนความแข็งจะเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 600°C และจำเป็นต้องเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการ หลอมเหลวและอบเหนียว ดังนั้นความสามารถในการทนการยืดและหดจะลดลง ลักษณะด้อยของ Ag950 คือการเสียรูปร่างง่าย [4] เมื่อเพิ่มความแข็งจาก 50HB จนเกินกว่า 100 HB ด้วยการชุบแข็ง เป็นไปได้ว่าเกือบจะไม่มีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมากนัก

Ag925 โดยทั่วไปจะเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากถึงคุณภาพเหมือนกับ Ag950 มีลักษณะเหมือนกับเงินบริสุทธิ์นิยมจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง

โลหะผสมชนิดนี้ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวได้ดีเท่ากับ Ag950 อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันจะให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการ

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

Ag835 ปกติจะใช้ในการทำเครื่องประดับ แต่ลักษณะสีของ Ag835 จะไม่ขาว สะอาดเหมือนกับเงินบริสุทธิ์มากนัก การใช้งานสามารถรู้สึกถึงความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น

Ag800 โลหะผสมชนิดนี้เหมาะกับการนำไปเป็นอุปกรณ์บนโต๊ะอาหาร เช่น ช้อน มีด ฯลฯ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี และมีความแข็งสูง และมีราคาค่อนข้างไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของเงินที่น้อยกว่า แต่โลหะชนิดนี้จะมีลักษณะออกเป็นสีเหลืองอ่อนๆ เนื่องจากเกิดออกไซด์ อย่างไรก็ตามจะนำมาทำการชุบผิวด้วยเงิน คือโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์ของเงินสูงกว่า และจำเป็นต้องทำการอบเหนียวอีกครั้งพร้อมกับการขัดให้เงาในทางกลับกัน เมื่อเปอร์เซ็นต์ทองแดงสูงมากขึ้น จะทำให้เกิดเป็นพิษ เมื่อสัมผัสกับกรดอาหาร ตัวอย่างเช่น สนิมเขียวที่ทองแดง Copper Acetate ในน้ำส้มเป็นต้น ถ้าโลหะผสมมีการกัดมาก ๆ หรือมีการขึ้นรูป จำเป็นต้องมีการอบเหนียว อย่างไรก็ตาม Ag800 สามารถที่จะหลอมและหล่อ ได้ง่ายกว่าโลหะผสมที่มีเปอร์เซ็นต์เงินในปริมาณที่มากกว่าจุดหลอมเหลวจะอยู่ที่ 800°C ซึ่งโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 900°C ในการหลอมละลายโลหะผสมนี้สามารถเพิ่มความแข็งได้จาก 40 – 100 HB โดยการชุบแข็งที่ 725°C ปล่อยทิ้งไว้ 17 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 280°C

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ

| โลหะเงิน เจือ | จุดหลอม ($^{\circ}\text{C}$) | ความแข็ง (HB) | ควา2.2มด้าน แรงดึง(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 |

2.1.5 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ธาตุมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้

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

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

ดีบุก (Sn) ปริมาณดีบุกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง เงินบริสุทธิ์ สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19 % อัลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า อัลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้เนื้ออัลลอยนิ่มและดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 9% จะทำให้เกิด Cu_4Sn ซึ่งจะทำให้เปราะและในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น SnO_2

อลูมิเนียม (Al) 4 – 5% จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ และการใช้งานของอัลลอย แต่ถ้ามีอลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็น Ag_3Al และจะทำให้อัลลอยเปราะ ในระหว่างการหลอมเหลวหรือการอบเหนียวจะเกิด อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเกิดตะกอนบนขอบเกรน ซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุเปราะในระหว่างการใช้งาน

สังกะสี (Zn) ประมาณ 20% สามารถจะละลายได้ในสถานะของแข็ง แต่ในทางปฏิบัติสามารถผสมได้ประมาณ 14 % อัลลอยที่ได้ สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และมีคุณสมบัติเป็น มันเงา จึงสามารถขัดเป็นเงาได้ง่าย และช่วยลดการรวมตัวของเงินกับออกซิเจนและทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดีและมีอัตราการยึดตัวสูงขึ้น

ซิลิกอน(Si) เกือบจะไม่ละลายในเงิน ซิลิกอนจะทำให้อัลลอยแข็งและเปราะ ซึ่งจะมีตะกอนบนขอบเกรน และเกือบที่จะทำให้อัลลอยใช้งานได้ แต่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้ โดยการใส่หินเขียว หนุมาน (Quartz) ลงในเบ้าหลอม

ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ AgP_2 หรือ Cu_3P ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชัน เกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับ ทองแดง – ฟอสฟอรัส ถ้าการดูดเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์

2.2 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

2.2.1 สมบัติของทองคำ

สมบัติของทองคำที่สำคัญประกอบด้วย

1. สมบัติทางกายภาพ ทองคำเป็นโลหะสีเหลืองมันวาว เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับต้น 3 รองจากเงินและทองแดง สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ถึง 97% จึงมักมีการนำเอาทองคำมาเป็นวัสดุป้องกันรังสี ซึ่งสมบัติทางกายภาพของทองคำบริสุทธิ์ที่สำคัญๆ แสดงดังตารางที่ 1
2. สมบัติทางกล ทองคำเป็นโลหะที่มีความเหนียวนำสูงสามารถดึงเป็นเส้นหรือตีเป็นแผ่นได้ ขนาดบางที่สุดถึง 1/5,000,000 นิ้ว สามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการมีการรับภาระทางกลไม่สูงมากนัก เช่น ใช้ในงานทันตกรรมทำเป็นฟันปลอม หรือใช้ในงานอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับทำเป็น สร้อยแหวน กำไล ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ทองคำบริสุทธิ์นั้น มีความอ่อนสูง เมื่อนำมาทำเป็นรูปพรรณและไม่สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้ จึงส่งผลให้ทองคำเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ให้ดีขึ้นและกลายเป็นทองคำเจือชนิดต่างๆที่สำคัญสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านแรงดึงและความแข็งที่สภาพต่างๆ
3. สมบัติด้านการผลิต สมบัติด้านการผลิตที่สำคัญของทองประกอบด้วย

ก. ความสามารถในการขึ้นรูป (Ability Forming) ทองคำเหมาะสำหรับการขึ้นรูปทางกลทุกรูปแบบ เช่น การตีขึ้นรูป การรีดเป็นแผ่นและการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ข. ความสามารถทางด้านการเชื่อมประสาน (Weld Ability) การบัดกรีด้วยหัวเทอร์ชิ่งกับโลหะประสานที่มีธาตุเงินผสมไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้ได้กับเปลวไฟทุกชนิด กรณีการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะซีทิลีน (Oxy-acetylene) ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำยาประสานและใช้กับเปลวไฟทุกชนิดนอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance Welding) ได้

ค. อุณหภูมิการอบอ่อนที่ 300 °C

ง. อุณหภูมิการขึ้นรูปร้อนต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

จ. อุณหภูมิเทหล่อที่ 1100 ถึง 1300 °C

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของทองคำ

| | |
|--|-----------------------|
| 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 (°c) | 0.0034 |
| ค่าศักย์ไฟฟ้า (Electrode Potential)(v) | +1.498 |

หมายเหตุ IACS= International Annealed Copper Standard

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกลของทองคำบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป

| 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 |

2.2.2 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ

1. **ค่าความบริสุทธิ์ (Fineness)** หมายถึง ปริมาณของเนื้อทองคำที่มีอยู่ในทองรูปพรรณหรือทองคำเจือ จะเทียบต่อ 1000 ส่วน หรืออาจใช้หน่วยวัดความบริสุทธิ์ที่เป็นระบบที่ใช้บอกปริมาณตามมาตรฐานที่เรียกว่า “กะรัต (Karit,K)” ซึ่งการวัดความบริสุทธิ์ทั้งสองแบบเป็นการเปรียบเทียบปริมาณทองคำที่มีในทองคำเจือหรือทองคำรูปพรรณ โดยการวัดความบริสุทธิ์มีสูตรสำหรับการหาค่า ความบริสุทธิ์ คือ

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

โดยที่ค่า xxx คือ ปริมาณร้อยละของทองเปรียบเทียบกับ 1000 ส่วน

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

3. **Hall-Markink** หมายถึง หน่วยวัดที่ใช้แสดงปริมาณทองคำ แสดงเป็นตัวเลขทศนิยม โดยกำหนดให้ทองคำบริสุทธิ์ 100 % มีค่าเท่ากับ1.000 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Fineness 1000

4. **บาท** หมายถึง หน่วยวัดตวงน้ำหนักทองคำในประเทศไทย โดยทองคำหนัก 1 บาท มีค่า เท่ากับ 15.244 กรัม

2.2.3 มาตรฐานและชนิดของทองคำกะรัต

ทองคำกะรัตเป็นทองคำที่ได้รับความนิยมสูงกว่าทองคำบริสุทธิ์เนื่องจากความแข็งแรงทนทานสูงกว่า นอกจากนี้ยังสามารถเลียนแบบของทองคำบริสุทธิ์ได้ด้วยการแปรเปลี่ยนปริมาณส่วนผสมต่าง จึงทำให้ทองคำกะรัตเข้ามามีบทบาทแทนที่ทองคำบริสุทธิ์ในเครื่องประดับ และกำหนดปริมาณส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในทองคำกะรัตยังไม่มีมาตรฐานกำหนดที่แน่นอนตายตัว แต่จะกำหนดที่ปริมาณทองคำบริสุทธิ์เป็นหลัก ซึ่งค่าความบริสุทธิ์ทองทองคำกะรัตสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิดหลักๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในทองคำกะรัตต่างๆ

| 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 |

2.2.4 โลหะวิทยาของทองคำเจือ หรือทองคำกะรัต

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

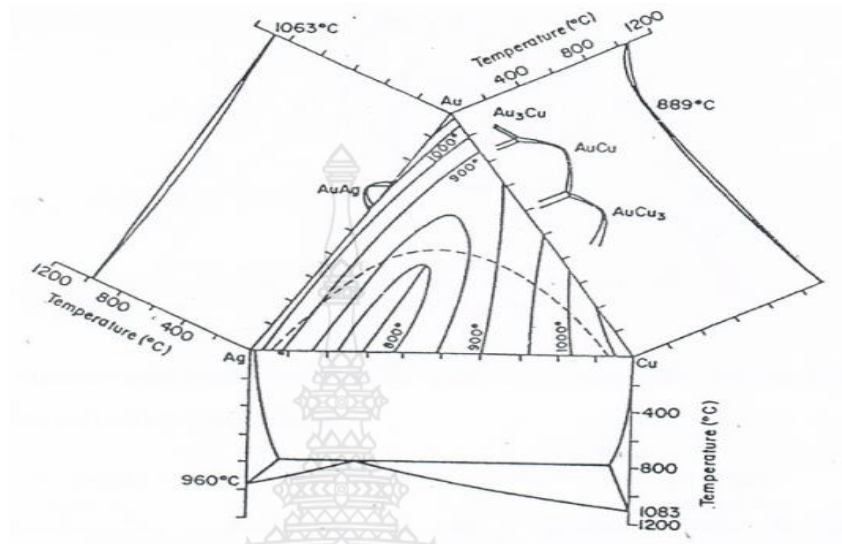
2.2.5 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง

จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติของโลหะผสมระบบ ทอง-เงิน-ทองแดง ทางด้านโลหะวิทยาโดย Pearson W.S. ทำให้ทราบถึงขอบเขตการละลายของแต่ละธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพสมดุลเฟสในระบบ 3 ธาตุได้ ดังรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4

จากภาพที่ 1 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะทองคำเจือในระบบ 2 ธาตุระหว่างทองคำ-เงิน บริเวณที่เป็นเฟสของแข็งเฟสเดียวเกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงถึงอุณหภูมิประมาณ 200°C ในช่วงส่วนส่วนผสมที่มีธาตุเงินระหว่าง 30 ถึง 40 wt% หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ 200°C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่สอง คือ AuAg เนื่องจากขอบเขตการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

ในระบบของทองคำ-ทองแดง แสดงบริเวณของเฟสเดียวที่เกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400°C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200°C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่ 2

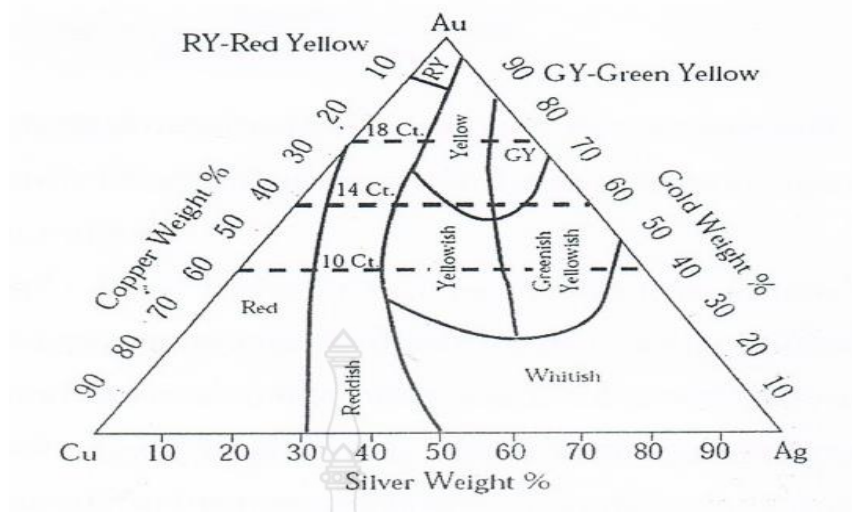
ในช่วงผสมที่แตกต่างกัน เป็น AuCu₃, AuCu และ Au₃Cu ซึ่งมีส่วนที่สำคัญที่ทำให้ทองคำเจือมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ในระบบของเงิน-ทองแดง แสดงปฏิกิริยายูเทคติกที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงโดยมีอุณหภูมิยูเทคติกที่ 799 °C ในช่วงที่มีทองแดงผสมอยู่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 2.2



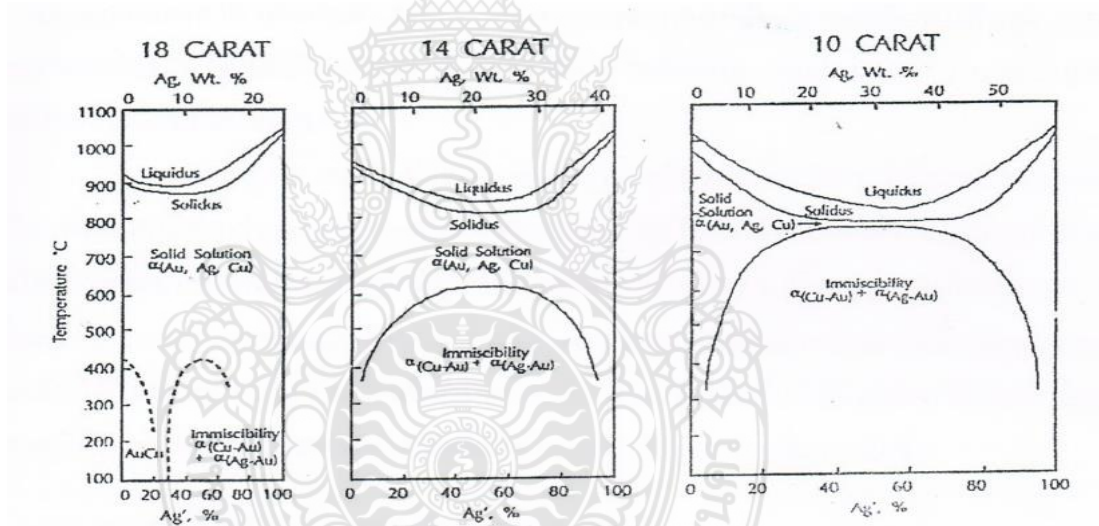
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน -ทองแดง



รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนของแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ - เงิน-ทองแดง



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองคำเงินทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเงิน



รูปที่ 2.5 ภาคตัดในแนวตั้งที่ 18 14 และ 10 กะรัต บนแผนภาพสมดุล ทองคำเงินทองแดง

จากรูปที่ 2.5 แสดงอัตราส่วนผสมทางเคมีของทองคำเงินทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเงิน ที่อัตราส่วนผสมต่างๆกัน ในตำแหน่ง 18 14 และ 10 กะรัตตามลำดับ และจากภาคตัดดังกล่าวทำให้ได้ภาพตัดแนวตั้งเสมือน 2 ชาติ (Quasi-Binary Vertical Section) ขึ้นมา 3 รูปที่ 2.5 แต่อย่างไรก็ตาม แทนที่จะเขียนแผนภาพจากค่าประมาณเงินหรือทองแดง เพื่อบอกปริมาณส่วนผสมทางเคมีในภาคตัดดังกล่าวแต่เพียงอย่างเดียวอาจจะไม่สะดวกเท่าใดนัก ในการเปรียบเทียบทองคำเงินที่กะรัตไม่เท่ากัน ดังนั้น Pearson W.S. จึงได้คิดค่าความเข้มข้นของธาตุเงินทองแดงในรูปของการแปรผันตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนค่าความเข้มข้นของ

ธาตุเงินในรูปแบบแผนตามอัตราส่วนผสมขึ้นมา โดยแทนที่ค่าความเข้มข้นของธาตุด้วยสัญลักษณ์ Ag' ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

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

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

ก. ชนิดที่ 1 ค่า Ag' ในช่วง 0-10% และจากช่วง 90-100% ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนผสมช่วงนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวจะเกิดเป็นเฟสในรูปแบบสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Homogenous Solid Solution) ซึ่งมีสมบัติทางกลอ่อน เมื่อผ่านการอบอ่อนไม่สามารถทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้

ข. ชนิดที่ 2 ค่า Ag' ในช่วง 10-25 % หรือช่วง 75-90% ทองคำเจือกลุ่มนี้ จะเป็นสารละลายของเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวมาจนถึงช่วงที่เรียกว่า ช่วงการเกิดความไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ (Immiscibility Gap) แต่ถ้าปล่อยให้ทองคำเจือเย็นลงตั้งลงมาอย่างช้า จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เฟสที่ได้ คือ เฟสอัลฟา ($\alpha = Cu-Au$) ตกตะกอนในทองคำเจือที่มีทองแดงสูง (Copper Rich Alloys) และจะได้ เฟสอัลฟา $2(a_2: Ag - Au)^n$ ตกตะกอนอยู่ในทองคำเจือเงินสูง (Silver-rich Alloy) ทองคำเจือชนิดนี้จะมีสภาพอ่อนปานกลางในสภาพที่ผ่านการอบอ่อน แต่สามารถปรับเพิ่มความแข็งได้โดยวิธีการบ่มเพิ่มความแข็ง

ค. ชนิดที่ 3 ค่า Ag' ในช่วงที่ 25-75 % ทองคำเจือชนิดนี้จะมีช่วงที่เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวและสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดช่วงไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้แต่ถ้าให้เย็นตัวแบบสมดุลลงมาถึงอุณหภูมิห้อง เฟสของแข็งเนื้อเดียวนี้อาจละลายตัวไปเป็นเฟส α Cu-Au) และเฟส $(a_2: Ag - Au)^n$

ทองคำเจือชนิดนี้จะเพิ่มความแข็งสูงในสภาพอบอ่อน ดังนั้นการอบอ่อนจึงลดความแข็งจากนี้ยังสามารถทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้โดยกรรมวิธีการบ่มเพิ่มความแข็ง

2.2.6 ทองคำเจือที่อึ่งระบบทอง-เงิน-ทองแดง-สังกะสี

ความสัมพันธ์ระหว่างสีและส่วนของทองคำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 3 ช่วงที่เป็นสีเหลืองจะเกิดใกล้มุมของทองคำ สีขาวเงินจะเกิดขึ้นมุมของเงินและสีแดงจะเกิดที่มุมของทองแดง สีแดงเป็นสีที่เด่นกว่าสีอื่น เพราะจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเจือ ดังจะเห็นได้ว่าทองคำเจือไม่มีสีแดงเฉพาะตรงมุมของทองแดงเท่านั้น แต่ยังมีไปถึงบริเวณมุมของทองคำด้วยการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงบริเวณที่

มีสีแดงหรือสีอมแดงให้กลายเป็นสีอมเหลืองสามารถทำได้โดยการเติมสังกะสีลงไป โดยทั่วไปในการทางปฏิบัติ การเติมสังกะสีเข้าไปอาจเติมไปได้จนถึง 15 wt% ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดปริมาณของช่วงการเกิด ความไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้มันแผนภาพสมดุลเฟส 3 ธาตุ โดยการลดความกว้างของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดช่วงดังกล่าวและลดความสูงของช่วงการเกิดไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ให้เคลื่อนลงมาเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงในทองคำเจือกะรัตต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้น การเติมสังกะสีจะส่งผลทำให้แนวโน้มของทำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี มีความแข็งแรงน้อยกว่าทองคำเจือระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง ทั้งในสถานะที่ผ่านการอบอ่อน และในสถานะอบเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitate Hardening)

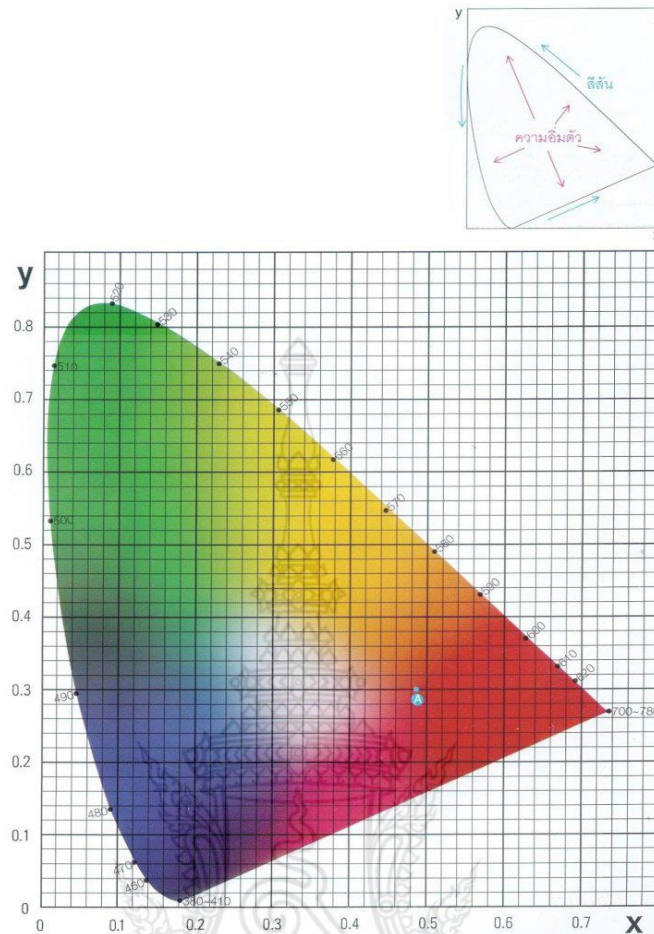
2.3 เทคนิคและวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB

เทคนิค และวิธีการวัดทดสอบระดับสี ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสี ระบบของการวัดสีและการสื่อความหมายของสี เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสื่อสารสีที่มองเห็น

1. การมองเห็นสีและการวัดสี

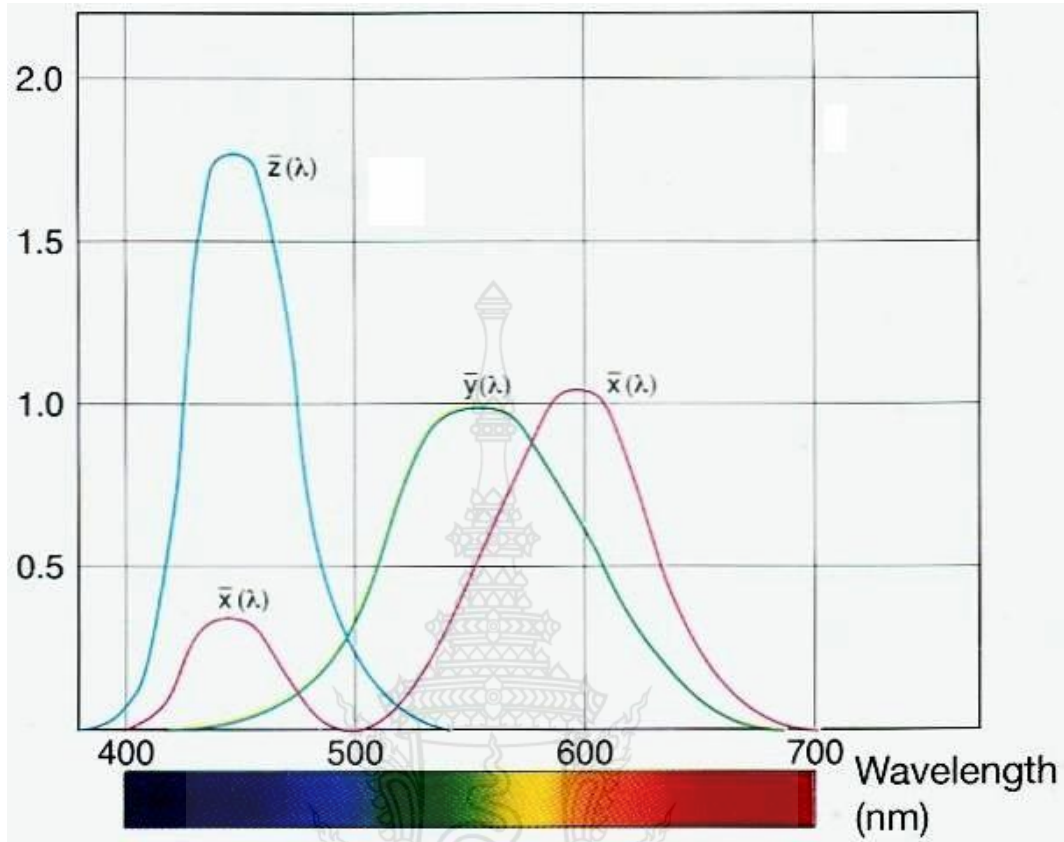
ในอดีตที่ผ่านมาสีเป็นสิ่งที่สื่อสารให้มีความเข้าใจได้ยาก เนื่องจากสีหรือสีสัณฐานนั้นมีความหลากหลาย การที่จะบอกคุณภาพของสีนั้นแตกต่างจากการบอกความยาวและน้ำหนัก เพราะไม่มีหน่วยบอกค่าสี ทำให้เป็นเรื่องที่วุ่นวายในการที่จะให้คำตอบหรืออธิบายให้ผู้อื่นได้เข้าใจอย่างชัดเจนเกี่ยวกับระดับสี เช่น การบอกความแตกต่างของสีฟ้า น้ำทะเล กับสีฟ้าท้องฟ้า ซึ่งคนแต่ละคนจะมีจินตนาการในสีทั้งสองที่แตกต่างกัน เพราะการรับรู้เรื่องสีและประสบการณ์ของแต่ละคนมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในปี ค.ศ. 1931 The Commission International Del' Éclair age (CIE) ซึ่งเป็นองค์กรระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของสีและแสง ได้พัฒนาระบบที่ทำให้เห็นความแตกต่างของสีมีระยะที่สัมพันธ์ใกล้เคียงกับความแตกต่างที่มองเห็นด้วยตามนุษย์มากขึ้น โดยกำหนด

เป็นค่าปริภูมิสี (Color Space) ขึ้นมา และถูกนำมาในการสื่อสารเกี่ยวกับสีและระบบของสีที่ใช้กันทั่วโลกในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2.6



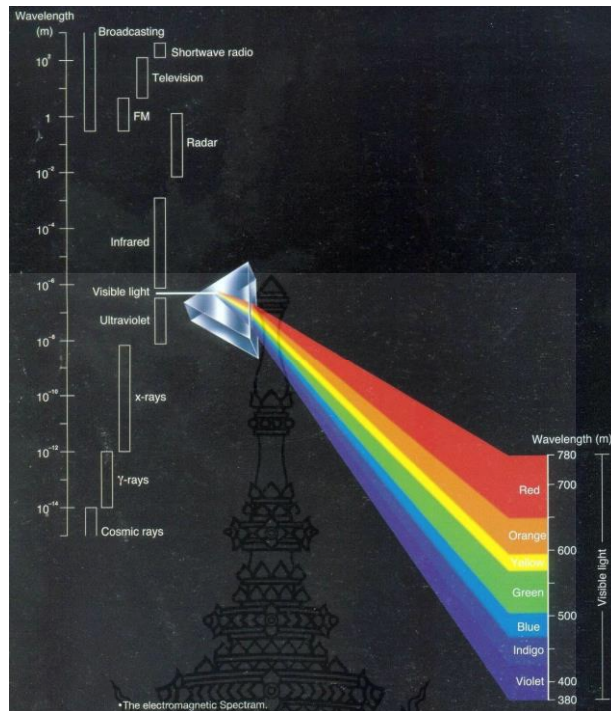
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมสี x, y ของ CIE ในปี 1931

ปริภูมิสี (Color Space) เป็นขอบเขตแสดงความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้เครื่องหมายหรือตัวเลข ที่ได้รับการพัฒนาจากแนวคิดพื้นฐานจากทฤษฎี 3 องค์ประกอบในการมองเห็น คือ ความมีสีล้วน (Hue หรือ H) ความสว่าง (Value หรือ V) และความอึมตัวหรือโคมา (Chroma หรือ C) โดยปกติแล้วตาของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ไวแสงสามสี คือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ซึ่งสีทั้งหมดที่มนุษย์มองเห็นเกิดจากการผสมผสานของสามสีดังกล่าวปริภูมิสีที่ CIE พัฒนาขึ้นเป็นกราฟสองมิติที่ไม่รวมค่าความสว่างเข้ามาด้วย เรียกว่า ปริภูมิสี Yxy (Yxy Color Space) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทั้งนี้ให้ Y แทนค่าความสว่าง ส่วน x และ y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสีที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันความไวแสงของเซลล์ไวแสงทั้งสามสีของตามนุษย์ (Color-matching function) ดังกล่าวข้างต้น (ซึ่งประกอบด้วยสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน) คือ $\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ และ $\bar{z}(\lambda)$ ที่อยู่ในรูปของสเปกตรัมการกระจายแสงหรือความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แล้วแสดงค่าออกมาในรูปของปริภูมิสีระบบต่างๆ เช่น ปริภูมิสีระบบ L*a*b ปริภูมิสีระบบ L*C*h และ ปริภูมิสีระบบ Hunter Lab



รูปที่ 2.7 ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function)

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดปริภูมิสีระบบต่างๆ ขอทำความเข้าใจเกี่ยวกับการมองเห็นสีของมนุษย์ ซึ่งผู้คนส่วนใหญ่ทราบกันดีว่า ถ้าให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านแท่งแก้วปริซึม แสงจะหักเหออกมาคล้ายสีรุ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการกระจายแสงของสี หรือที่เรียกว่าสเปกตรัม การที่มนุษย์สามารถมองเห็นสเปกตรัมได้นั้น เป็นเพราะช่วงคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นเรตินาในตามนุษย์ ทำให้เห็นเป็นสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงินและสีม่วง โดยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความยาวคลื่นของแสงนั้น แสงในบริเวณที่มีความยาวคลื่นยาวที่สุด คือ สีแดง และแสงในบริเวณที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุด คือ สีม่วง แสงในช่วงความถี่ที่มนุษย์มองเห็นได้เรียกว่า Visible Light Region ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความยาวคลื่นที่ยาวถัดขึ้นไปจะเข้าสู่ย่านคลื่นอินฟราเรด และถ้าเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่าที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ก็จะเข้าสู่ย่านคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งคลื่นทั้งสองชนิดนี้ มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับหน่วยที่ใช้วัดความยาวคลื่นแสงนี้นิยมใช้เป็นหน่วยนาโนเมตร (Nanometer: μm) หรือบางครั้งอาจใช้หน่วยไมโครเมตร (Micrometer: μm)



รูปที่ 2.8 ภาพสีรุ้งของรุ้งกินน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ทะลุผ่านหยดน้ำ

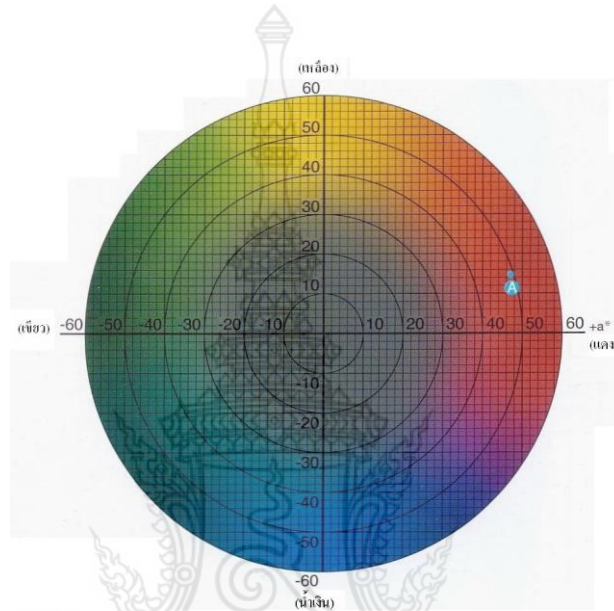
ซึ่งทำหน้าที่เป็นปริซึม

2. ระบบของปริภูมิสี (Color Space System)

ปริภูมิสีเป็นค่าที่ใช้แสดงขอบเขตความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงโดยการใช้อุปกรณ์หรือตัวเลขแสดงค่าสี ระบบปริภูมิสีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b ปริภูมิสีระบบ L^*C^*h และปริภูมิสีระบบ Hunter Lab ซึ่งรายละเอียดของค่าปริภูมิสีในแต่ละระบบมีดังนี้

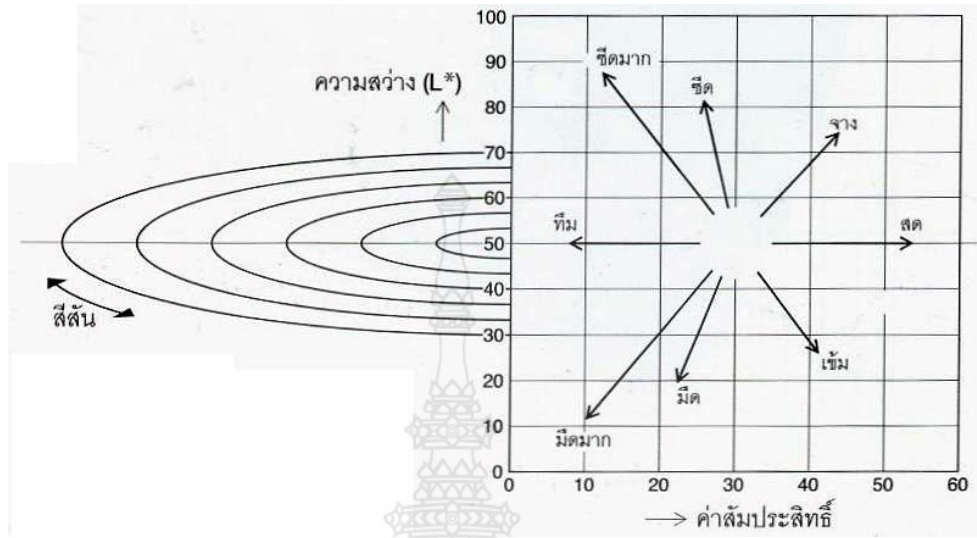
ก. ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b (L^*a^*b Color Space) หรือบางครั้งเรียกว่า CIELAB เป็นระบบที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้วัดค่าสีและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในหลายๆ วงการ โดยปริภูมิสีเป็นประเภทที่มีสเกลสมมาตร ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย CIE ในปี ค.ศ. 1976 เพื่อแก้ปัญหาการแปลค่าสีที่เกิดขึ้นในระบบ xyy เพราะพบว่าระยะห่างระหว่าง x กับ y บนไดอะแกรมสีจะไม่สอดคล้องกับความแตกต่างของสีที่เกิดจากการมองเห็นจริง ในระบบปริภูมิสี L^*a^*b นี้ ค่า L^* หมายถึง ความสว่าง ส่วนค่า a^* และค่า b^* หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สี ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งไดอะแกรมดังกล่าว ค่า a^* และค่า b^* จะบอกถึงทิศทางของสี เช่น $+a^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีแดง $-a^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเขียว $+b^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของน้ำเงิน พื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้

(achromatic) เมื่อค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความอิ่มตัวของสีก็จะเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่างๆ ของปริภูมิสี $L^*a^*b^*$ อย่างชัดเจน จากรูปที่ 2.9 เป็นภาพตัดตามขวาง โดยค่าความสว่าง (L) มีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวัดสีวัตถุชนิดหนึ่งโดยใช้ปริภูมิสีระบบ $L^*a^*b^*$ ได้ค่า $L^* = 43.31$ ค่า $a^* = +47.63$ และค่า $b^* = +14.12$ เมื่อพล็อตค่า a^* และค่า b^* ลงบนแกน a^* และ b^* จุด A เป็นจุดที่แสดงสีของวัตถุ



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมสีปริภูมิสี a^* , b^*

A



B



รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง

(B) ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b (L^*a^*b Color Space)

ข. ปริภูมิสีระบบ L^*C^*h (L^*C^*h Color Space) ปริภูมิสีระบบ L^*C^*h ใช้ไดอะแกรมสีแบบเดียวกับระบบ L^*a^*b แต่รูปร่างต่างกันที่เป็นรูปกรวยแหลมแทนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในระบบนี้ค่า

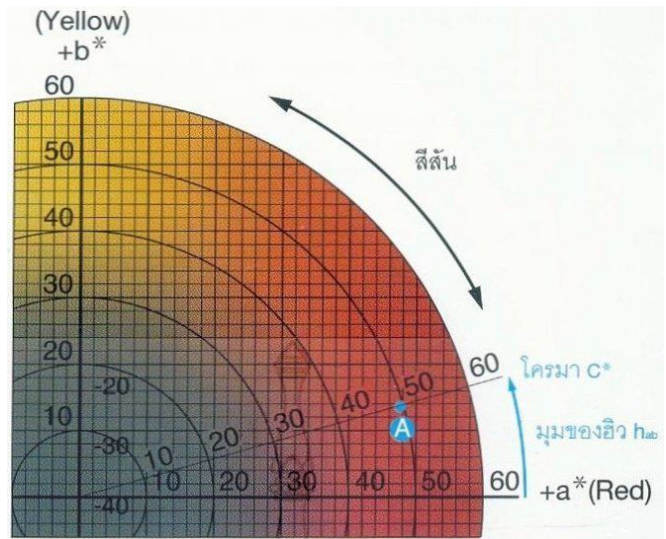
L^* หมายถึง ความสว่าง เช่นเดียวกับค่า L^* ในระบบ L^*a^*b โดยค่า

C^* หมายถึง ค่าโคมมา (Chroma) และ

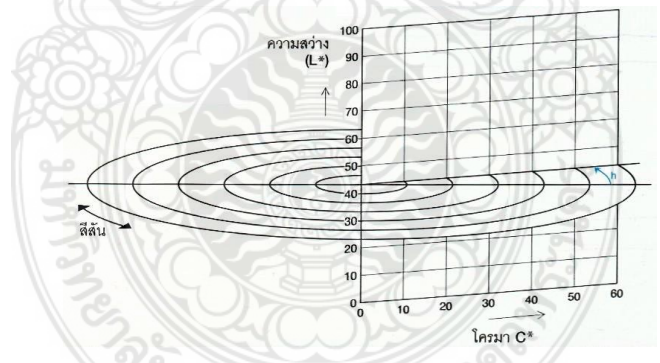
h หมายถึง มุมของฮิว (Hue Angle) ค่า C^* จะมีค่าเป็น 0 ที่จุดศูนย์กลางและจะมีสีเข้มตัวมากขึ้น เมื่อออกห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น ส่วนค่ามุมฮิว ที่แทนค่าด้วย h จะเริ่มนับค่าบนแกนด้าน $+a^*$ โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 0 องศาบนแกนด้าน $+a^*$ จะเป็น (สีแดง) เมื่อเป็นมุม 90 องศา จะเป็นแกน $+b^*$ (สีเหลือง) ที่มุม 180 องศา จะเป็นแกน $-a^*$ (สีเขียว) และเมื่อเป็นมุม 270 องศา จะเป็นแกน $-b^*$ (สีน้ำเงิน) ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวัดสีของวัตถุ ด้วยขอบเขตปริภูมิสีระบบ L^*C^*h ได้ค่า $L^* = 43.31$ ค่า $C^* = 49.68$ และค่า $h^* = 16.5$ เมื่อพล็อตจุดบนกราฟในรูปที่ 2.12 ก็จะได้จุด A ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.13

$$\text{ค่า } C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$\text{Hue angle } h_{ab} = \tan^{-1}(b^* / a^*)$$



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์สี a^* , b^* ที่ใช้แสดงค่าปริภูมิสีระบบ L^*C^*h



รูปที่ 2.12 ค่าโครมาและความสว่าง

3. ความแตกต่างของสี

เนื่องจากตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้ในช่วงความถี่ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น ดังนั้นแสงจึงไม่ใช่สี แสงเป็นเพียงรังสีที่มากกระตุ้นเรตินาของตาและทำให้เกิดการมองเห็น จากนั้นจึงถ่ายทอดข้อมูลต่อไปยังสมอง สิ่งนี้คือแนวคิดเรื่องการเกิดสี โดยสมองจะทำการตอบสนองต่อข้อมูลที่ส่งต่อมาจากตา ซึ่งบางครั้งสายตามนุษย์อาจมองเห็นสีสองสีเป็นสีเดียวกัน และไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีได้ แต่ถ้าเป็นเครื่องวัดสีสามารถบอกความแตกต่างของสีที่พบได้ โดยเฉพาะในกรณีของการวัดสีที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การวัดสีด้วยเครื่องวัดสียังสามารถบอกความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ เพื่อให้การสื่อความหมายของสีสามารถเข้าใจได้ง่าย โดยความแตกต่างของสีจะแสดงเป็นค่าเพียงค่าเดียวเรียกว่า เดลต้าอี (ΔE^*_{ab}) ดังค่าที่แสดงในรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 ตามลำดับ ซึ่งจะบอกเฉพาะปริมาณความแตกต่างของสีเท่านั้น แต่ไม่ได้บอกทิศทางความแตกต่างของสี ซึ่งค่า เดลต้าอี (ΔE^*_{ab}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(\Delta E^*_{ab}) = \sqrt{(\Delta L^*_{ab})^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ตัวอย่างเช่น การหาความแตกต่างของสีของวัตถุ 2 ชิ้น ด้วยปริภูมิสีระบบ $L^*a^*b^*$

วัตถุชิ้นที่ 1 วัดสีได้ $L^* = 43.31, a^* = +47.83, b^* = +14.12$

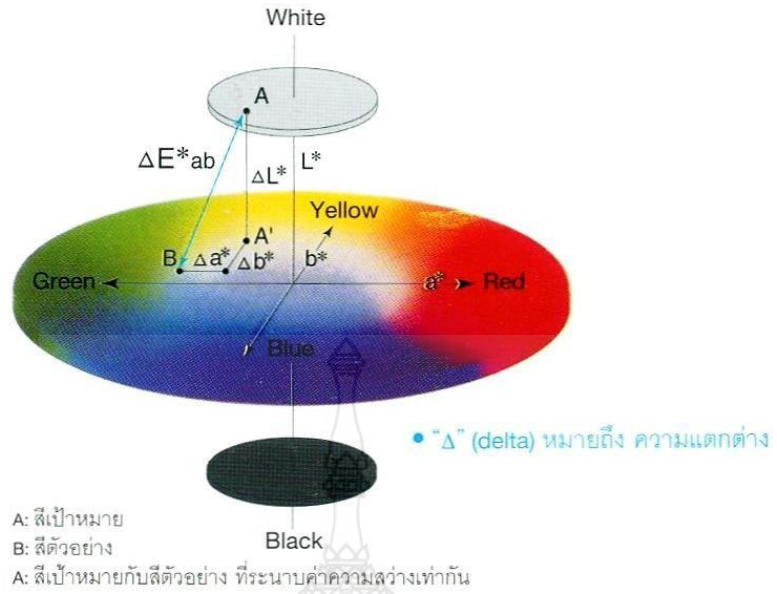
วัตถุชิ้นที่ 2 วัดสีได้ $L^* = 47.34, a^* = +44.78, b^* = +15.16$

จะได้ค่า $\Delta L^* = +4.03, \Delta a^* = -3.05, \Delta b^* = +1.04$

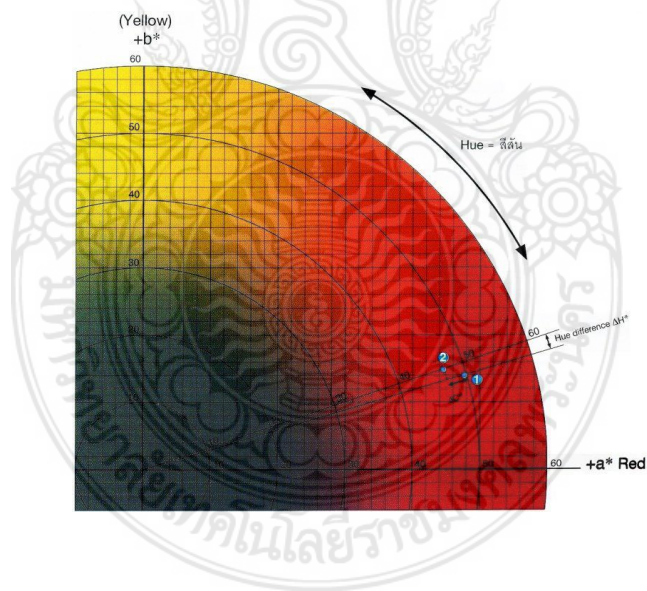
สีของวัตถุ 2 ชิ้น เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการจะได้ $\Delta E^*_{ab} = 5.16$

และในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดความแตกต่างของสีด้วยปริภูมิสีระบบ L^*C^*h

ค่า ΔL^* เป็นค่าเดียวกับปริภูมิสีระบบ $L^*a^*b^*$ จะได้ $\Delta C^* = -2.59$ ซึ่งหมายความว่าวัตถุชิ้นที่ 2 มีสีสดน้อยกว่าวัตถุชิ้นที่ 1



รูปที่ 2.13 ค่าความแตกต่างสีในปริภูมิสีระบบ L*a*b



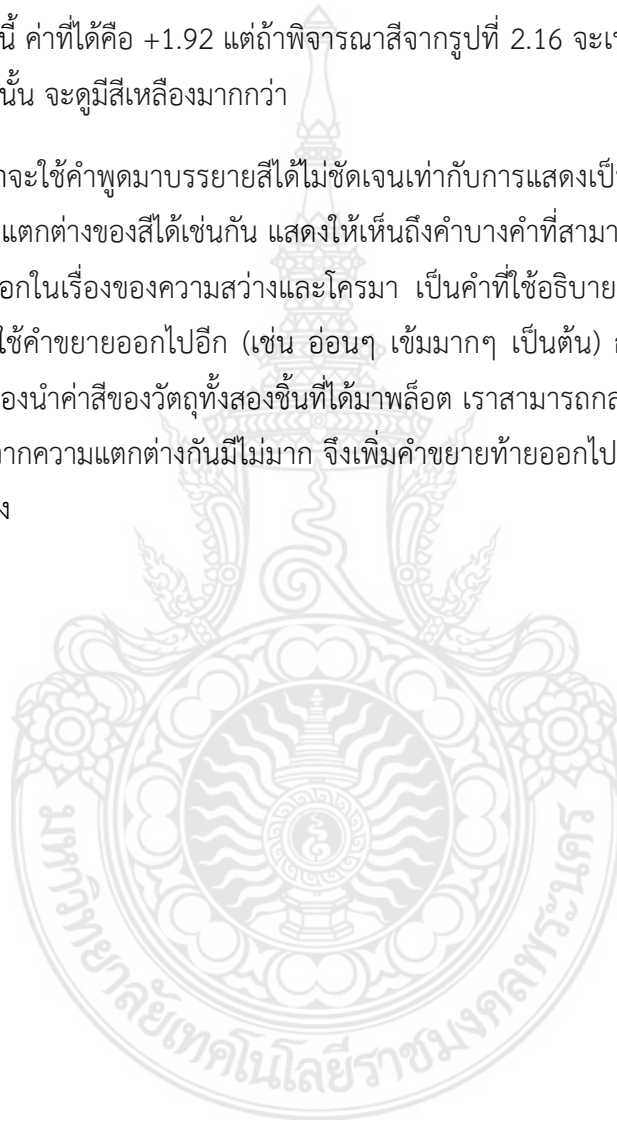
รูปที่ 2.14 ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี a*, b* ในปริภูมิสีระบบ L*C*h

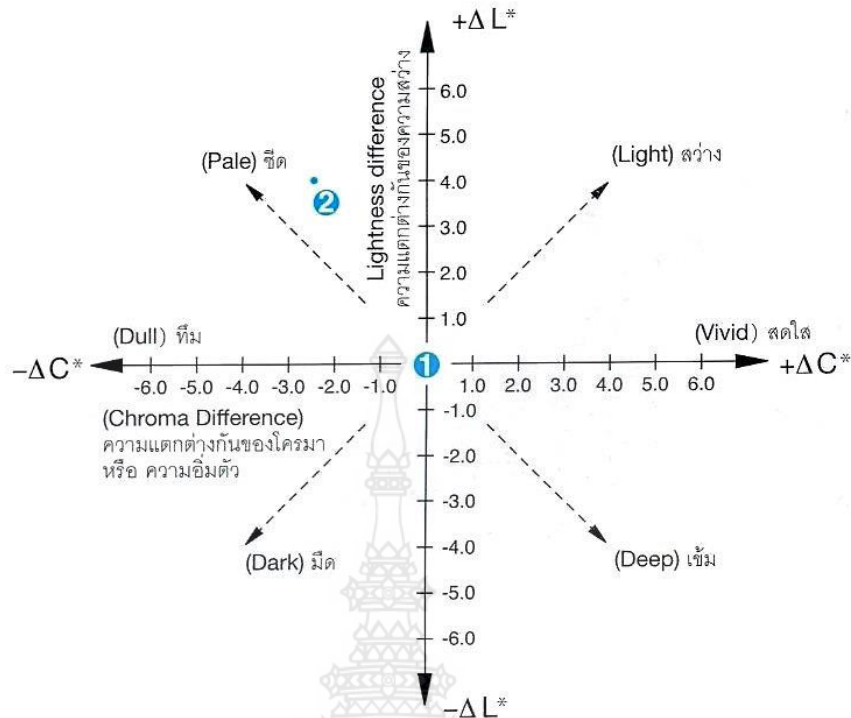
สำหรับในส่วนของค่าความมีสีสัมที่แตกต่างกันของวัตถุ 2 ชิ้น คือ ΔH^* ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^* ab)^2 - (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ในกรณีนี้ ค่าที่ได้คือ +1.92 แต่ถ้าพิจารณาสีจากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าวัตถุชิ้นที่ 2 จะอยู่ใกล้กับแกน +b มากกว่า ดังนั้น จะดูมีสีเหลืองมากกว่า

ถึงแม้ว่าจะใช้คำพูดมาบรรยายสีได้ไม่ชัดเจนเท่ากับการแสดงเป็นตัวเลขก็ตาม แต่ก็สามารถใช้คำพูดอธิบายค่าความแตกต่างของสีได้เช่นกัน แสดงให้เห็นถึงค่าบางค่าที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายความแตกต่างของสี เช่นบอกในเรื่องของความสว่างและโครมา เป็นคำที่ใช้อธิบาย ซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงทิศทางความแตกต่างของสี แต่ไม่ใช่คำขยายออกไปอีก (เช่น อ่อนๆ เข้มมากๆ เป็นต้น) ก็จะไม่สามารถระบุระดับความแตกต่างของสีได้ ถ้าลองนำค่าสีของวัตถุทั้งสองชิ้นที่ได้มาพล็อต เราสามารถกล่าวได้ว่าวัตถุชิ้นที่ 2 มีสีซีดกว่าวัตถุชิ้นที่ 1 แต่เนื่องจากความแตกต่างกันมีไม่มาก จึงเพิ่มคำขยายทำยออกไปว่า สีซีดกว่า เล็กน้อย เพื่อระบุถึงระดับความแตกต่าง





รูปที่ 2.15 คำที่ใช้อธิบายถึงค่าโครมาหรือความอิ่มตัวของสีและความสว่าง (Chroma and Lightness)

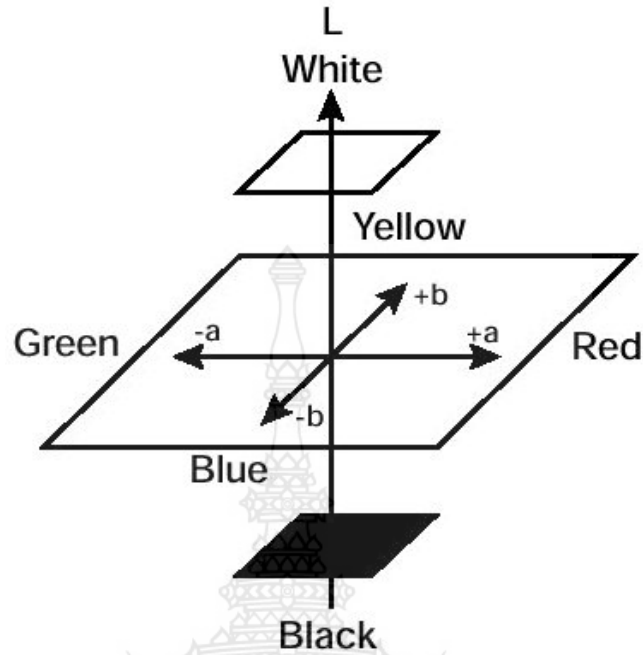
4. การวัดระดับสีของทองคำเจือ

จากระบบอ้างอิงการวัดสีของ CIELAB เป็นระบบมาตรฐานที่ใช้วัดระดับสีของวัตถุ โดยวัดการกระจายสีหรือที่เรียกว่า “สเปกตรัมการกระจายแสง” ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความยาวคลื่น (Wavelength) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นสเปกตรัมการกระจายแสงหรือความยาวคลื่นที่ได้จะ

ถูกแยกสเปกตรัมแล้วนำมาคำนวณหาค่าสีในปริภูมิสีระบบต่างๆ และแสดงค่าผลการวัดออกมาเป็นตัวเลข เช่น การวัดสีในระบบ CIELAB หรือระบบ Tristimulus หรือระบบ LCh Color Space ซึ่งต่อมา G.raykhtsaum และ D.P.Agarwal ได้แสดงการวัดระดับสีของทองคำเจือด้วยการใช้พิกัดคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นระบบอ้างอิงปริภูมิสีของ The International Committee on Illumination (CIELAB) โดยกำหนดพิกัดแกนสีขึ้นมา 3 แกน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทั้ง 3 แกนแทนค่าด้วยตัวอักษร L, a และ b โดยแต่ละแกนมีรายละเอียดของแต่ละตัวอักษรดังนี้

- ตัวอักษร L แสดงค่าความสว่างของทองคำเจือ โดย L0 คือ สีดำ และ L100 คือ สีขาว
- ตัวอักษร a แสดงสีแดงถึงสีเขียว โดย a100 คือ สีแดงเข้ม และ a-100 คือ สีเขียว

- ตัวอักษร b แสดงสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน โดย $b100$ คือสีเหลือง และ $b-100$ คือสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.16 พิกัดการวัดสี

5. มาตรฐานสีทองคำกะรัต

มาตรฐานรับรองระดับสีทองคำกะรัต ประกอบด้วยมาตรฐาน NIHS-03-50 มาตรฐาน CETEHOR-07 และมาตรฐาน DIN 8238 ที่ได้อ้างอิงระบบการวัดค่าระดับสีตามระบบ CIELAB และเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปและใช้เป็นมาตรฐานยุโรป ที่เรียกว่ามาตรฐาน DIN EN 28654 ตลอดจนมีการนำมาใช้เป็นมาตรฐานสากล ที่เรียกว่ามาตรฐาน ISO 8654 นั้น ได้แบ่งค่าระดับสีทองคำกะรัต ออกเป็น 8N, 0N, 1N, 2N, 3N, 4N และ 5N ซึ่งรายละเอียดของค่าระดับสีตามมาตรฐาน DIN 8238 ประกอบด้วยค่าสีมาตรฐานและพิกัดความเผื่อค่าต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิสัยความถี่ตามมาตรฐาน DIN 8238

| สัญลักษณ์ | สี | | ค่าสีมาตรฐาน | | | | | |
|-----------|-------------|--|--------------|------------------|-----|------------------|-----|------------------|
| | สี | ตรงกับมาตรฐาน NIHS-03-50 และ CETEHOR-07-07 | L | | a | | b | |
| | | | | พิสัย ความถี่ | | พิสัย ความถี่ | | พิสัย ความถี่ |
| 8N | ขาว | - | 1.2 | ±0.2 | 0.9 | ±0.1 | 1.6 | ±0.3 |
| 0N | เขียวเหลือง | - | 24.8 | | 1.6 | | 1.2 | |
| 1N | เหลืองอ่อน | / | 1.7 | ±0.1 | 1.7 | ±0.1 | 1.2 | ±0.15 |
| 2N | เหลืองสด | / | 1.8 | | 1.8 | | 1.3 | |
| 3N | เหลือง | / | 2.0 | | 1.8 | | 1.3 | |
| 4N | ชมพู | / | 2.4 | | 1.6 | | 1.4 | |
| 5N | แดง | / | 2.6 | | 1.5 | | 1.4 | |



บทที่ 3

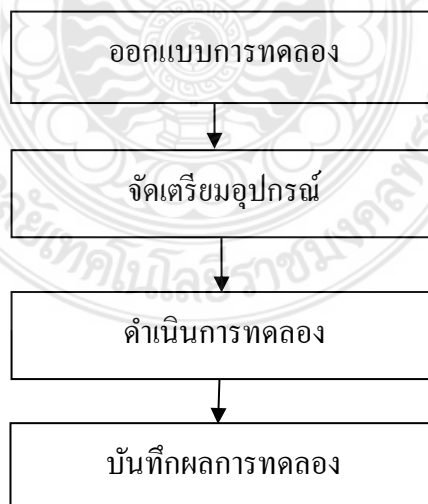
วิธีการดำเนินการ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จากการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะกำหนดลำดับกระบวนการในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินงาน ตลอดจนอุปกรณ์ของการทดลองสู่การดำเนินงาน ศึกษาและดำเนินการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือสีชมพู ที่มีปริมาณของโลหะเงินบริสุทธิ์ (Ag) 54.00 % และมีธาตุเจือทอง (Au) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) รวมกันไม่เกิน 46 % โดยกำหนดส่วนผสมหลักในการทดลองหาค่าสีด้วยวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB (L^*a^*b Color Space)

การออกแบบการทดลองหาอุณหภูมิอบเข้าปูนการหล่อขึ้นงานเครื่องประดับโลหะเงินเจือสีชมพู โดยกำหนดอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่มาจากอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อทั่วไปของโลหะ ที่นิยมนำมาหล่อเครื่องประดับ เช่น เงิน 650°C ทองเหลือง 550°C พร้อมทั้งทำการเผื่ออุณหภูมิ อบเข้าปูนหล่อสามารถแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ อุณหภูมิที่ 500°C 550°C 600°C 650°C และ 700°C ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองแต่ละระดับจะทดลองทั้งหมด 5 ครั้งครั้งละ 5 เบ้า จำนวนขึ้น 10 ชิ้นต่อ 1 เบ้า จะได้ชิ้นงานในการทดลองระดับละ 50 ชิ้น รวม 5 ระดับจะได้ชิ้นงานจำนวนทั้งหมด 250 ชิ้นในการทดลองจะใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนดเวลาในการอบเข้า

3.2 แผนการดำเนินการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการ

3.3 ออกแบบการทดลองค่าระดับสีของส่วนผสมโลหะเงินเจือสีชมพู

กำหนดส่วนผสมหลักในการทดลองหาค่าสีด้วยวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB (L^*a^*b Color Space) ที่มีปริมาณของโลหะเงินบริสุทธิ์ (Ag) 54.00 % และมีธาตุเจือทอง (Au) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) รวมกันไม่เกิน 46 %

การทดลองที่1. Ag54%+Cu43.0%+Zn2.0%+Au1.0%

การทดลองที่2. Ag54%+Cu43.5%+Zn1.5%+Au1.0%

การทดลองที่3. Ag54%+Cu44.0%+Zn1.0%+Au1.0%

การทดลองที่4. Ag54%+Cu44.5%+Zn0.5%+Au1.0%

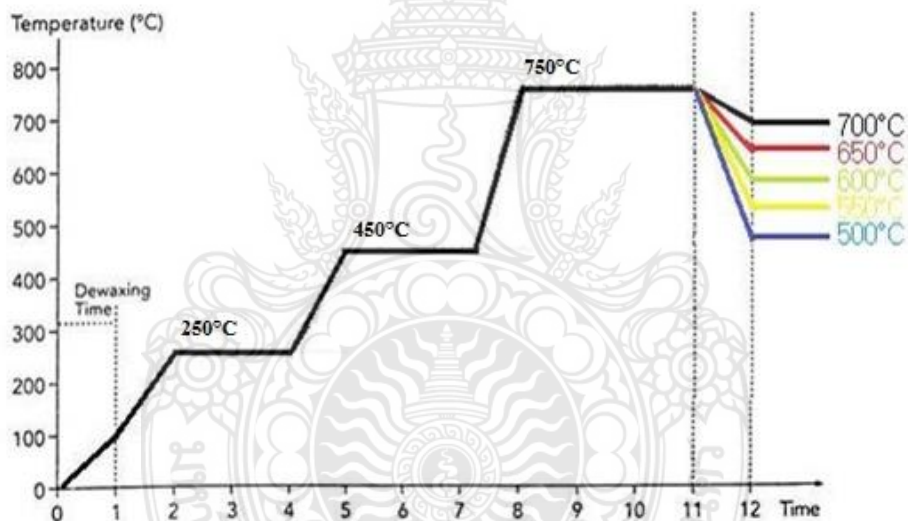
ตารางที่3.1 วัดค่าระดับสีโลหะเงินเจือสีชมพูตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB

| ลำดับที่ | ปริมาณของส่วนผสม | ชิ้นงานทดสอบ | CIELAB | | |
|-----------|------------------------------|--|--------|------|-------|
| | | | L* | a* | b* |
| ทดลองที่1 | Ag54%+Cu43.0%+Zn2.0%+Au1.0% |  | 76.29 | 3.43 | 14.86 |
| ทดลองที่2 | Ag54%+Cu43.5%+Zn1.5%+Au1.0% |  | 78.01 | 4.68 | 16.72 |
| ทดลองที่3 | Ag54%+Cu44.0%+Zn1.0%+Au1.0% |  | 79.39 | 4.40 | 16.00 |
| ทดลองที่4 | 4Ag54%+Cu44.5%+Zn0.5%+Au1.0% |  | 77.42 | 4.77 | 16.57 |

จากผลการทดลองประสิทธิภาพแสดงให้เห็นว่า ผลที่วัดออกมานั้นสีสีชมพู ไม่มีความสม่ำเสมอและแน่นอน แต่ชิ้นงานทั้งหมดอยู่ในขอบเขตของสีชมพู สรุปได้ว่าการทดลองหาส่วนผสมระหว่างโลหะเงิน Ag54%+Cu44.0%+Zn1.0%+Au1.0% มีค่าที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงจะได้สีชมพู ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

3.4 ออกแบบการทดลองการหล่อโลหะเงินเจือสีชมพู

โดยพิจารณาเลือกวัสดุโลหะเงินเจือสีชมพูจากการทดลองที่ 3.3 ส่วนผสมโลหะเงินเจือสีชมพู ($\text{Ag}54\%+\text{Cu}44.0\%+\text{Zn}1.0\%+\text{Au}1.0\%$) เพื่อเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการทดลองนำไปสู่การออกแบบการทดลองหาอุณหภูมิอบเข้าปูนการหล่อขึ้นงานเครื่องประดับสำหรับ โลหะเงินเจือสีชมพู โดยกำหนดอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่มาจากอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อทั่วไปของโลหะ ที่นิยมนำมาหล่อเครื่องประดับ เช่น เงิน 650°C ทองเหลือง 550°C พร้อมทั้งทำการเพื่ออุณหภูมิ อบเข้าปูนหล่อสามารถแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ อุณหภูมิที่ 500°C 550°C 600°C 650°C และ 700°C ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองแต่ละระดับจะทดลองทั้งหมด 5 ครั้งครั้งละ 5 เบ้า จำนวนขึ้น 10 ชิ้นต่อ 1 เบ้า จะได้ชิ้นงานในการทดลองระดับละ 50 ชิ้น รวม 5 ระดับจะได้ชิ้นงานจำนวนทั้งหมด 250 ชิ้นในการทดลองจะใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนดเวลาในการอบเข้าขั้นตอนนำชิ้นงานที่ทดสอบไปทำการอบเข้าปูนและการหล่อตามที่กำหนดเพื่อหาค่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมด้วยการกำหนดอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังแผนรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 อุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อ

3.4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ต้นแบบการทดลอง

การเตรียมการนั้นสิ่งที่สำคัญคือ การเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ จะเป็นส่วนช่วยให้เวลาดำเนินการมีความคล่องตัว และลดปัญหาความล่าช้า ซึ่งถือว่ามีสำคัญเป็นอย่างมาก ในการจัดเตรียมอุปกรณ์ที่จะนำมาทดลองประกอบไปด้วยการเตรียมต้นแบบโลหะ

แหวนต้นแบบชิ้นงาน ขนาดกว้าง 21 มม. สูง 22 มม. หนา 4.5 มม. ความโตในแหวน 22 มม. ความหนาท้องแหวน 2 มม.



รูปที่ 3.3 ต้นแบบชิ้นงาน ติดก้านแหวน ชัดผิวชิ้นงานให้มีความสมบูรณ์

นำแม่พิมพ์ยางออกจากบล็อกอลูมิเนียม ซึ่งให้ระบายความร้อนด้วยอุณหภูมิห้อง เพื่อให้ยางคายความร้อนและหดตัวอย่างช้าๆทำการตัดขอบยางที่เกินออกและผ่าจากจุดกึ่งกลางแม่พิมพ์ยาง เพื่อนำชิ้นงานต้นแบบออกจากบล็อกยาง



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ยาง

ทำการอุ่นเครื่องฉีดเทียนที่อุณหภูมิ 90-120°C เป็นเวลา 45 นาทีและเติมเทียนสำหรับฉีด เปิดเครื่องปั๊มลม ตั้งลมเข้าหม้อฉีด ที่ 1-2 บาร์ แล้วแต่ขนาดและความละเอียดของชิ้นงานนำปลี้อย่างมาทำการฉีดเทียน จำนวน 25 ชิ้น



รูปที่ 3.5 การฉีดเทียน

นำฐานยางมาทำความสะอาดแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของฐานยาง ทำการติดชิ้นงานที่ฉีดเทียนให้เป็นเฉียงขึ้นประมาณ 45 องศาและยาวออกมาไม่เกินขอบฐานยางด้านในอย่างน้อย 1 เซนติเมตร จำนวนต้นละ 10 วง อุณหภูมิละ 5 ต้น 5 อุณหภูมิ รวม 25 ต้นทำการชั่งน้ำหนักต้นเทียนรวมฐานยางแล้วนำมาลบกับน้ำหนักฐานยางที่ได้ทำการชั่งไว้ตอนต้น จะได้น้ำหนักต้นเทียน และนำน้ำหนักต้นเทียนมาหาค่าถ่วงจำเพาะเพื่อหาค่าของน้ำหนักของชิ้นงานจริง



รูปที่ 3.22 ติดต้นเทียน ชั่งน้ำหนัก

รูปที่ 3.6 แสดงการติดต้นแว็กซ์

นำปูนมาเทใส่กระบอกลีโอบปูนและทำการดูอากาศซ้ำอีกทีเพื่อให้ฟองอากาศออกจนหมด เป็นเวลา 1 นาที และทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจนปูนแข็งตัว ประมาณ 15-30 นาทีหลังจากทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจนปูนแข็งตัว ประมาณ 15-30 นาทีแล้วนำฐานยางออกจากกระบอกลีโอบปูน



รูปที่ 3.7 เทปูนลงเบ้าทรงกระบอกลีโอบ



รูปที่ 3.8 แสดงเตาอบเบ้าปูนและตั้งเซตอุณหภูมิอบเบ้าปูน

หลังจากที่ปูนแห้งแล้วให้นำไปเข้าเตาอบเบ้าปูนทำการอุ่นเตาอบเบ้าปูน เป็นเวลา 20 นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดทั้ง 5 อุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและระยะเวลาการอบเข้าปูนปกติช่วงอุณหภูมิ Dewaxing อยู่ช่วงอุณหภูมิ 0 – 250 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิคงที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงในการเผาแช่ เพื่อ Dewaxing อีกครั้ง เพิ่มอุณหภูมิ 250 – 450 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ไล่ความชื้นออกจากปูน ในอุณหภูมิคงที่ 450 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในการเผาแช่ เพื่อไล่ความชื้นออกจากปูนซ้ำอีกครั้ง เพิ่มอุณหภูมิ 450 - 750 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่ออบเพิ่มความแข็งแรงของปูน และใช้อุณหภูมิคงที่ 750 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ในการเผาแช่อบเพิ่มความแข็งแรงของปูนและทำการลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆตามแบบการทดลองดังตัวอย่างรูปที่ 3.8 โดยใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมงในการเผาแช่เข้าปูน



รูปที่ 3.9 แสดงการเซ็ตอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อทั้ง 5 อุณหภูมิ

นำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเครื่องฉีดแรงดันน้ำ ฉีดเอาปูนตามซอกต่างๆออกจากชิ้นงานทำความสะอาดผิวงาน นำชิ้นงานมาแช่กรดไฮโดรฟลูออริก(กรดกัดแก้ว)เพื่อกัดซิลิกา ที่เป็นส่วนผสมของปูนหล่อเครื่องประดับออกและแช่กรดซัลฟิวริก(กรดกำมะถัน) เพื่อทำความสะอาดชิ้นงานซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 3.10 ล้างชิ้นงานด้วยกรดกัดแก้ว



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานสำเร็จ

ทำการตรวจสอบชิ้นงานหาคำห็นเป็นครีป ตามด ผิวไม่เรียบ หล่อไม่เต็ม และทำการเก็บข้อมูลเชิงสถิติ

3.4.2 เกณฑ์การประเมินชิ้นงาน

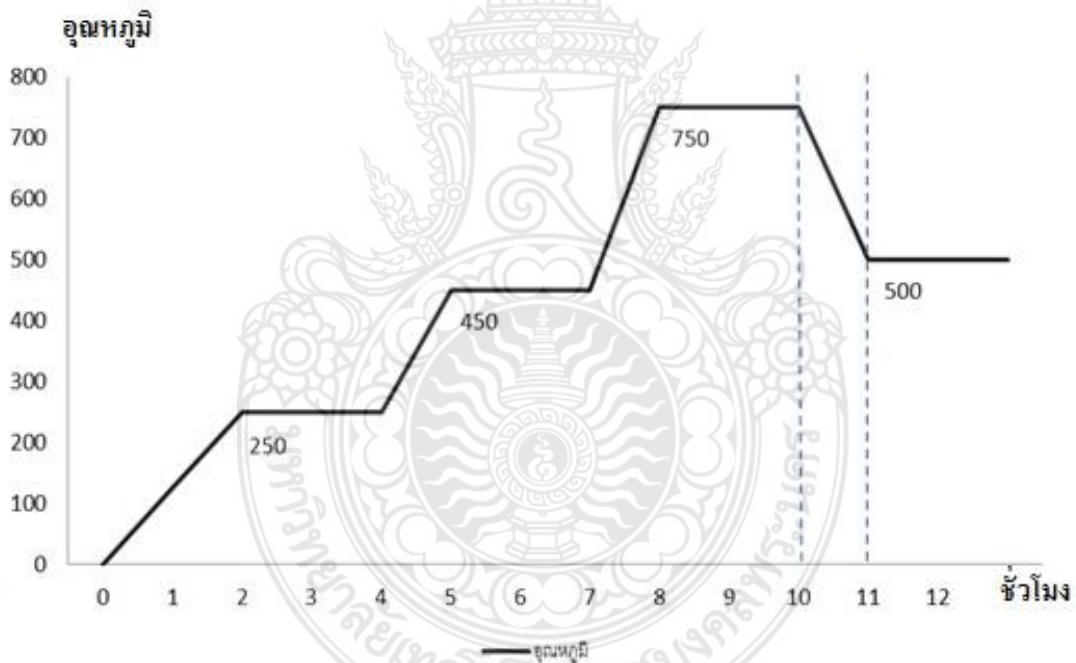
การตรวจสอบคุณภาพผิวงานหลังจากการหล่อ โดยใช้วิธีตรวจสอบด้วยการพิจารณาจากสภาพชิ้นงานหลังการหล่อปัญหาที่พบบ่อยคือ ชิ้นงานเป็นครีป ผิวงานไม่เรียบ ตามด ผิวชิ้นงานไม่เต็ม น้ำหนักของชิ้นงาน ชิ้นงานมีตำหนิต้องแต่ 1 จุดขึ้นไปถือเป็นงานเสียโดยใช้แว่นขยายชนิดสวมหัวเป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบคุณภาพผิวและใช้แถบสีในการเปรียบเทียบผลการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเกณฑ์การประเมินชิ้นงาน

| เกณฑ์การตัดสินชิ้นงานอยู่ที่ผลของการประเมิน | สัญลักษณ์ถือว่าเป็นงานเสีย |
|---|----------------------------|
| 1. ชิ้นงานเป็นครีบ | ● (Red) |
| 2. ผิวไม่เรียบ | ● (Blue) |
| 3. ตามด | ● (Yellow) |
| 4. งานหล่อไม่เต็ม | ● (Pink) |




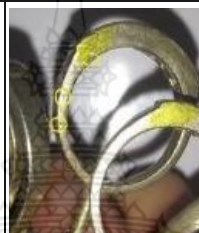

3.4.3 บันทึกผลการทดลอง

จากการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสมในอุณหภูมิที่ 500°C โดยการตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังรูปที่ 3.11

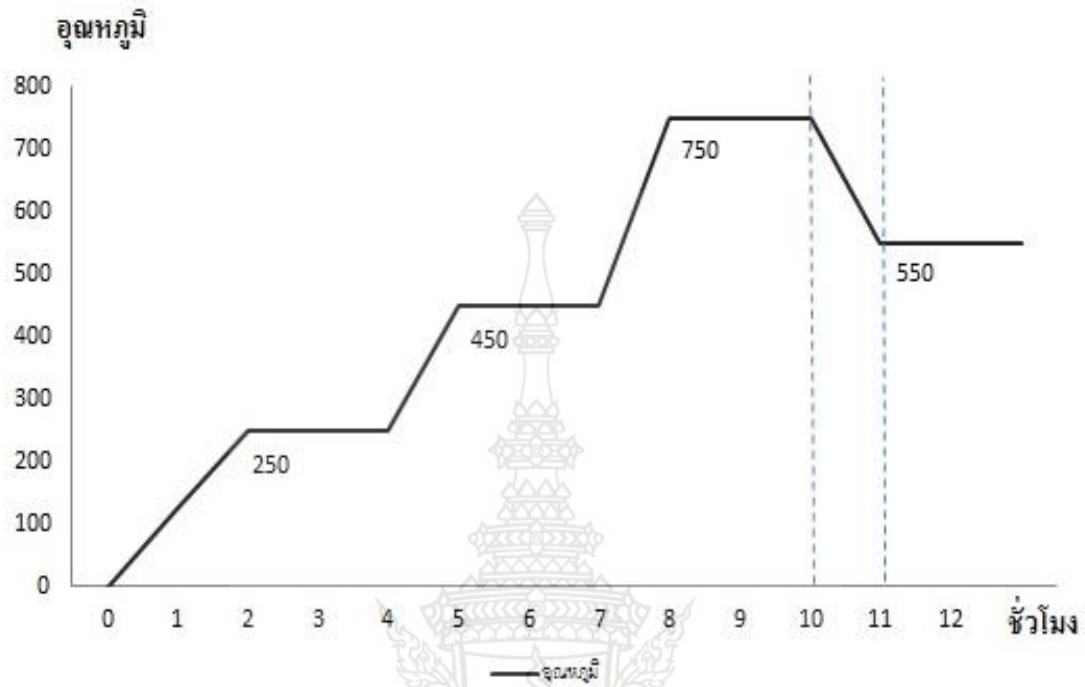


รูปที่ 3.12 ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 500°C

ตารางที่ 3.3 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 500°C

| เข้าที่ | เป็นครีบ  | ผิวไม่เรียบ  | ตามด  | งานหล่อไม่เต็ม  | งานเสีย | งานดี |
|---------|---|--|---|---|---------|-------|
| 1 |  |  |  | | 7 | 3 |
| | 7 | 2 | 1 | 0 | | |
| 2 |  |  |  | | 10 | 0 |
| | 10 | 2 | 6 | 0 | | |
| 3 |  |  |  | | 6 | 4 |
| | 6 | 5 | 4 | 0 | | |
| 4 |  |  |  | | 8 | 2 |
| | 8 | 3 | 3 | 0 | | |
| 5 |  |  |  | | 7 | 3 |
| | 6 | 2 | 7 | 0 | | |







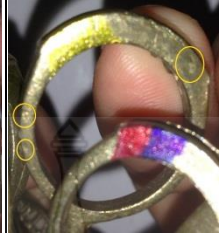








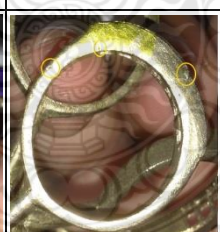
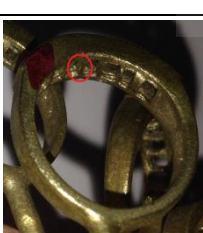


จากการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสมในอุณหภูมิที่ 550°C โดยการตั้ง
เซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังรูปที่ 3.12



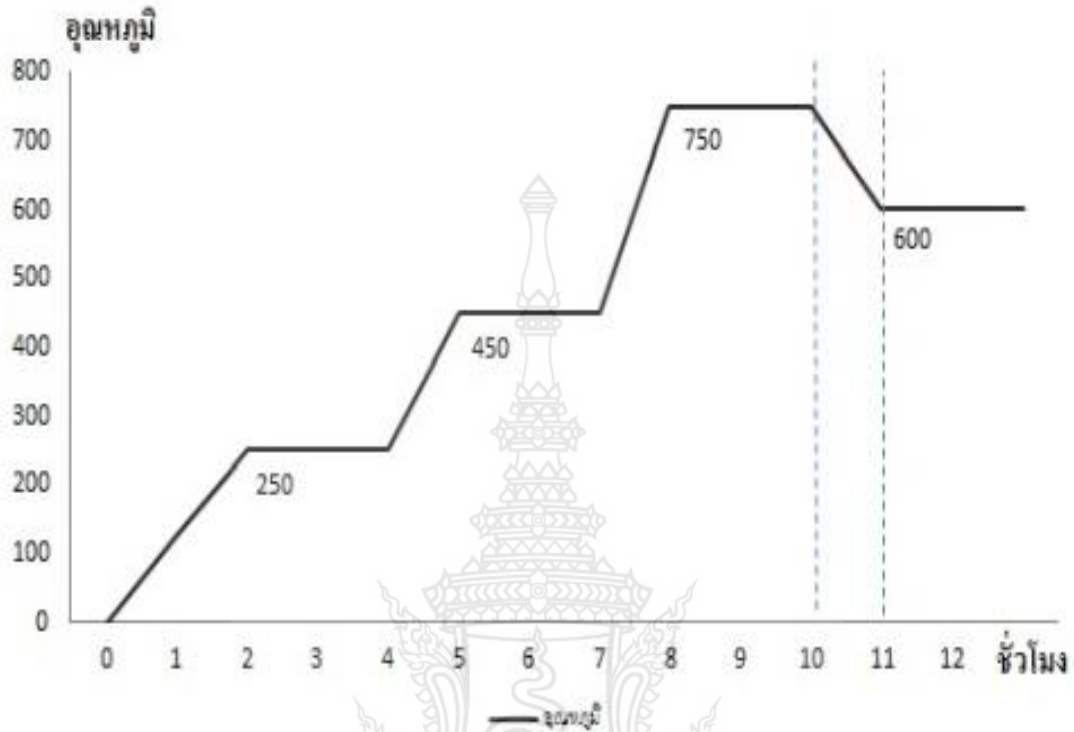
รูปที่ 3.13 ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 550°C



ตารางที่ 3.4 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 550°C











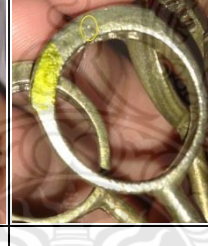
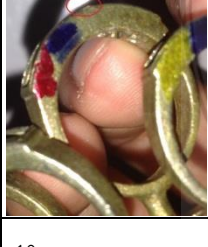
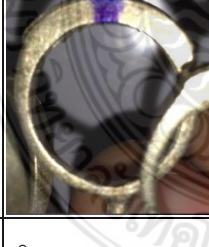
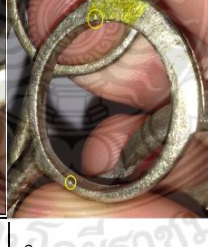

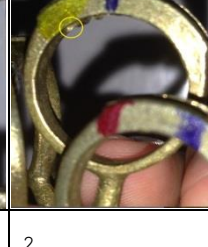
| เข้าที่ | เป็นครีบ  | ผิวไม่เรียบ  | ตามด  | งานหล่อไม่เต็ม  | งานเสีย | งานดี |
|---------|---|--|---|---|---------|-------|
| 1 |  |  |  | | | |
| | 8 | 3 | 1 | 0 | 8 | 2 |
| 2 |  |  |  | | | |
| | 10 | 1 | 1 | 0 | 10 | 0 |
| 3 |  |  |  | | 7 | 3 |
| | 7 | 2 | 2 | 0 | | |
| 4 |  |  |  | | 6 | 4 |
| | 6 | 3 | 2 | 0 | | |
| 5 |  |  |  | | 7 | 3 |
| | 7 | 3 | 3 | | | |

จากการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสมในอุณหภูมิที่ 600°C โดยการตั้ง
เซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังรูปที่ 3.13

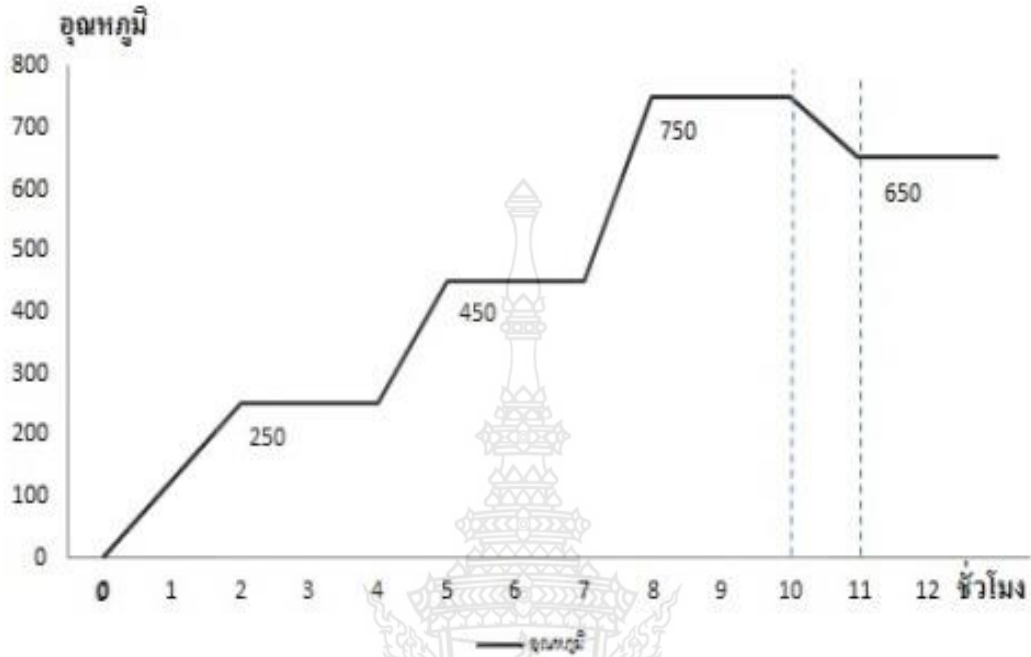


รูปที่ 3.14 ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 600°C

ตารางที่ 3.5 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 600°C






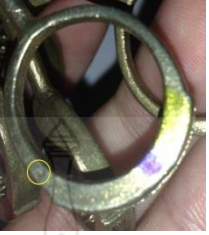











| เข้าที่ | เป็นครีบ  | ผิวไม่เรียบ  | ตามด  | งานหล่อไม่เต็ม  | งานเสีย | งานดี |
|---------|---|--|---|---|---------|-------|
| 1 |  |  |  | | 3 | 7 |
| 2 | | | 3 | 0 | | |
| 2 |  |  |  | | 4 | 6 |
| 2 | | | 4 | 0 | | |
| 3 |  |  |  | | | |
| 5 | | 2 | 3 | 0 | 5 | 5 |
| 4 |  |  |  | | 10 | 4 |
| 10 | | 2 | 2 | 0 | | |
| 5 |  |  |  | | 8 | 2 |
| 8 | | 1 | 2 | 0 | | |

จากการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสมในอุณหภูมิที่ 650°C โดยการตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังรูปที่ 3.14

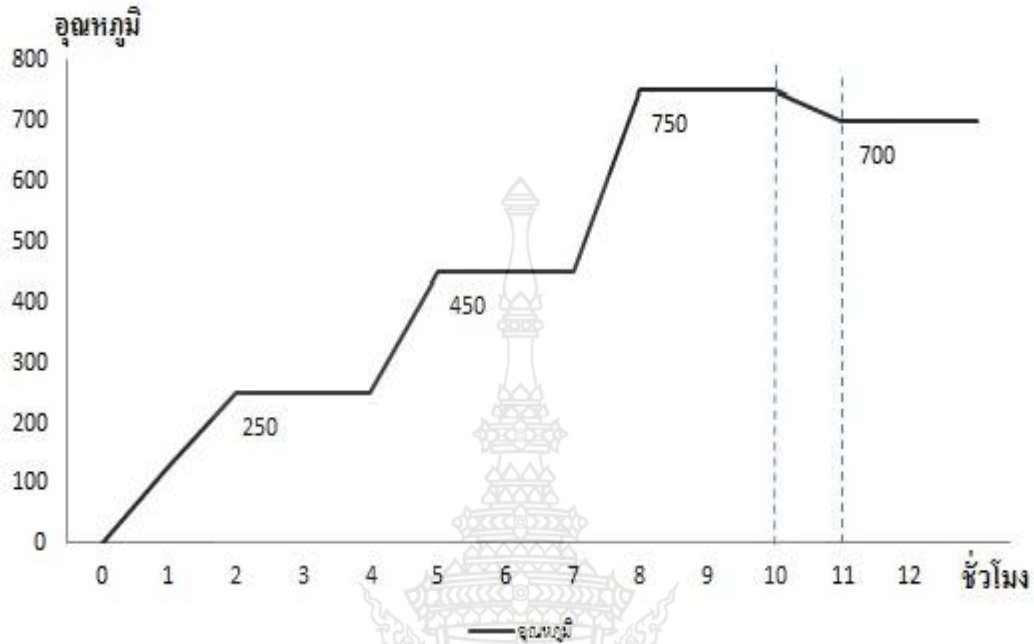


รูปที่ 3.15 ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 650°C

ตารางที่ 3.6 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 650°C









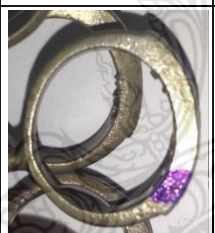
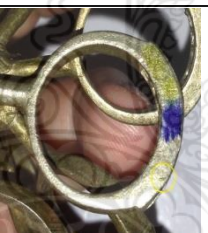


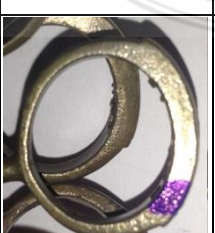

| เข้าที่ | เป็นครีบ  | ผิวไม่เรียบ  | ตามด  | งานหล่อไม่เต็ม  | งานเสีย | งานดี |
|---------|---|--|---|---|---------|-------|
| 1 | |  |  | | 4 | 6 |
| | 0 | 4 | 3 | 0 | | |
| 2 | |  |  | | 5 | 5 |
| | 0 | 5 | 3 | 0 | | |
| 3 |  |  |  | | 5 | 5 |
| | 5 | 4 | 2 | 0 | | |
| 4 |  |  |  | | 5 | 5 |
| | 5 | 5 | 2 | 0 | | |
| 5 |  |  |  | | 3 | 7 |
| | 3 | 3 | 3 | 0 | | |

จากการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสมในอุณหภูมิที่ 700°C โดยการตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อดังแผนภูมิที่ 3.15



รูปที่ 3.16 ตั้งเซตอุณหภูมิเครื่องอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 700°C

ตารางที่ 3.7 บันทึกการทดลองอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 700°C

| เข้าที่ | เป็นครีบ  | ผิวไม่เรียบ  | ตามด  | งานหล่อไม่เต็ม  | งานเสีย | งานดี |
|---------|--|---|--|--|---------|-------|
| 1 | |  |  | | 3 | 7 |
| | 0 | 3 | 1 | 0 | | |
| 2 | |  |  | | 2 | 8 |
| | 0 | 2 | 2 | 0 | | |
| 3 | |  |  | | 2 | 8 |
| | 0 | 2 | 2 | 0 | | |
| 4 | |  |  | | 3 | 7 |
| | 0 | 2 | 3 | 0 | | |
| 5 | |  |  | | 3 | 7 |
| | 0 | 3 | 1 | 0 | | |

3.5 สรุป

บทนี้กล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการดำเนินการทดลองการหาอุณหภูมิอบแห้งหล่อโลหะเงินเจือสีชมพู ที่เหมาะสมสำหรับการหล่อเครื่องประดับ โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิการทดลองออกเป็น 5 ช่วงโดยวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิอบแห้งปูน 500 องศาเซลเซียสจนถึงช่วงอุณหภูมิอบแห้งปูน 700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ผิวของชิ้นงานมีความละเอียดมากขึ้นตาม โดยพบว่าชิ้นงานที่มีตำหนิ พบมากที่สุดคือช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 550 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเป็นครีบทที่ผิวงาน และตามด เกิดจากการหดตัวของโลหะและอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับจุดหลอมเหลวของโลหะเงินเจือสีชมพู



บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

4.1 บทนำ

จากตารางบันทึกข้อมูลการทดลองนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบชิ้นงานในอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ต่างกันของโลหะเงินเจือสีชมพู เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้หล่อเครื่องประดับโลหะเงินเจือสีชมพู

4.2 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี – ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 500°C

| อุณหภูมิ | เบ้าที่ | จำนวนชิ้นงาน | งานดี | งานเสีย |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|---------|
| 500° | เบ้าที่ 1 | 10 | 3 | 7 |
| | เบ้าที่ 2 | 10 | 0 | 10 |
| | เบ้าที่ 3 | 10 | 4 | 6 |
| | เบ้าที่ 4 | 10 | 4 | 6 |
| | เบ้าที่ 5 | 10 | 2 | 8 |
| เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน | | | 26% | 74% |

จากตารางที่ 4.1 จากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 13 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 26% ชิ้นงานเสีย 37 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 74%

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี – ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 550°C

| อุณหภูมิ | เข้าที่ | จำนวนชิ้นงาน | งานดี | งานเสีย |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|---------|
| 550° | เข้าที่ 1 | 10 | 2 | 8 |
| | เข้าที่ 2 | 10 | 0 | 10 |
| | เข้าที่ 3 | 10 | 3 | 7 |
| | เข้าที่ 4 | 10 | 4 | 6 |
| | เข้าที่ 5 | 10 | 3 | 7 |
| เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน | | | 24% | 76% |

จากตารางที่ 4.2 จากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ 550 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 12 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 24% ชิ้นงานเสีย 38 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 76%

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี – ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 600°C

| อุณหภูมิ | เข้าที่ | จำนวนชิ้นงาน | งานดี | งานเสีย |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|---------|
| 600° | เข้าที่ 1 | 10 | 7 | 3 |
| | เข้าที่ 2 | 10 | 6 | 4 |
| | เข้าที่ 3 | 10 | 5 | 5 |
| | เข้าที่ 4 | 10 | 0 | 10 |
| | เข้าที่ 5 | 10 | 2 | 8 |
| เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน | | | 40% | 60% |

จากตารางที่ 4.3 จากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 20 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 40% ชิ้นงานเสีย 30 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 60%

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี – ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 650°C

| อุณหภูมิ | เข้าที่ | จำนวนชิ้นงาน | งานดี | งานเสีย |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|---------|
| 650° | เข้าที่ 1 | 10 | 6 | 4 |
| | เข้าที่ 2 | 10 | 5 | 5 |
| | เข้าที่ 3 | 10 | 5 | 5 |
| | เข้าที่ 4 | 10 | 5 | 5 |
| | เข้าที่ 5 | 10 | 7 | 3 |
| เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน | | | 56% | 44% |

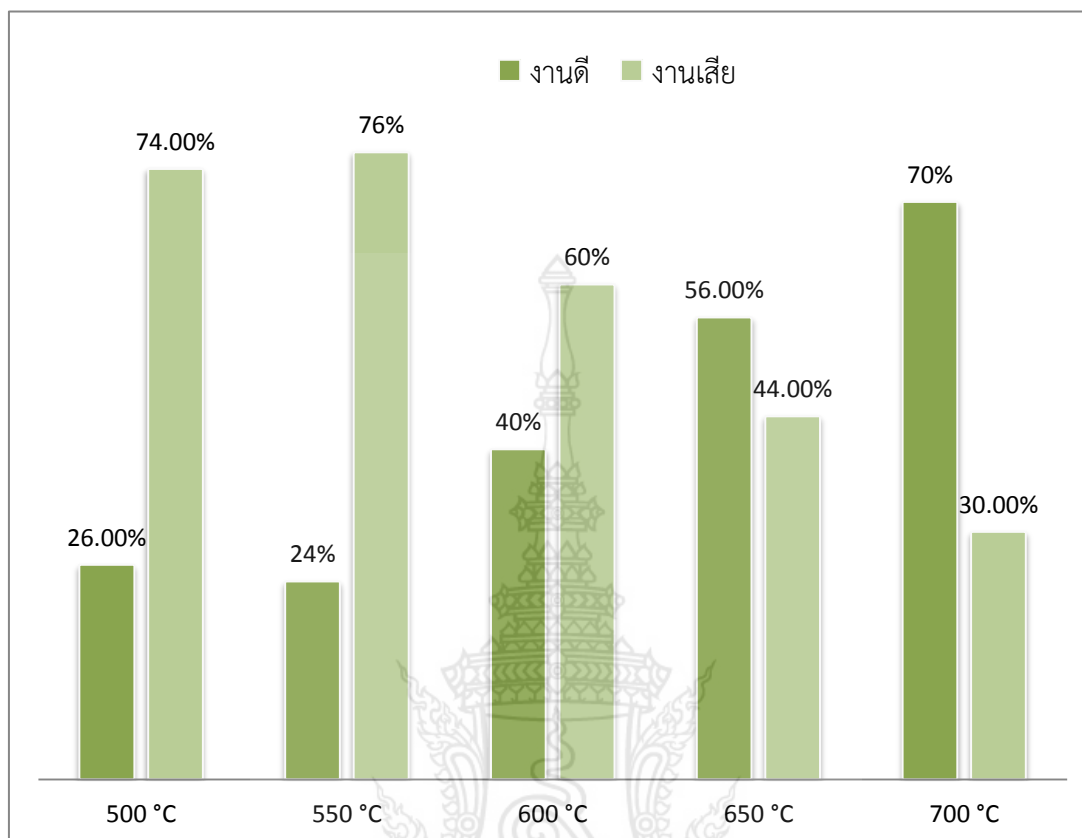
จากตารางที่ 4.4 จากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ 650 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 28 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 56% ชิ้นงานเสีย 22 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 44%

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดี – ชิ้นงานเสียที่อุณหภูมิเข้าปูนหล่อ 700°C

| อุณหภูมิ | เข้าที่ | จำนวนชิ้นงาน | งานดี | งานเสีย |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|---------|
| 700° | เข้าที่ 1 | 10 | 6 | 4 |
| | เข้าที่ 2 | 10 | 6 | 4 |
| | เข้าที่ 3 | 10 | 8 | 2 |
| | เข้าที่ 4 | 10 | 7 | 3 |
| | เข้าที่ 5 | 10 | 8 | 2 |
| เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน | | | 70% | 30% |

จากตารางที่ 4.5 จากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 35 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 70% ชิ้นงานเสีย 15 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 30%

4.2.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบคุณภาพผิวของชิ้นงาน



| | | |
|---------------------------|---------------|-----------------|
| อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส | ชิ้นงานดี 26% | ชิ้นงานเสีย 74% |
| อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส | ชิ้นงานดี 24% | ชิ้นงานเสีย 76% |
| อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส | ชิ้นงานดี 40% | ชิ้นงานเสีย 60% |
| อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส | ชิ้นงานดี 56% | ชิ้นงานเสีย 44% |
| อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส | ชิ้นงานดี 70% | ชิ้นงานเสีย 30% |

จากการวิเคราะห์ชิ้นงานโลหะเงินเจือสีชมพูทั้งหมด 250 ชิ้น มีชิ้นงานที่หล่อแล้วมีคุณภาพสมบูรณ์จำนวน 108 ชิ้น และมีชิ้นงานเสียจำนวน 142 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์งานดี 43.20% งานเสีย 56.80% จากชิ้นงานทั้งหมด

4.2.2 ผลเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากการตรวจสอบคุณภาพผิว

ตารางที่ 4.6 การหาของเสียทางเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากกระบวนการผลิตโลหะเงินเจือสีชมพู

| กรู๊ปย่อยที่ | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | Σx | \bar{x} | R |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------------|------------------|-----------------|
| 1 | 7 | 2 | 1 | 0 | 10 | 2.5 | 6 |
| 2 | 10 | 2 | 6 | 0 | 18 | 4.5 | 8 |
| 3 | 6 | 5 | 4 | 0 | 15 | 3.75 | 2 |
| 4 | 8 | 3 | 3 | 0 | 14 | 3.5 | 5 |
| 5 | 6 | 2 | 7 | 0 | 15 | 3.75 | 5 |
| 6 | 8 | 7 | 4 | 0 | 19 | 4.75 | 4 |
| 7 | 10 | 1 | 1 | 0 | 12 | 3 | 9 |
| 8 | 7 | 2 | 2 | 0 | 11 | 2.75 | 5 |
| 9 | 6 | 3 | 2 | 0 | 11 | 2.75 | 4 |
| 10 | 7 | 3 | 3 | 0 | 13 | 3.25 | 4 |
| 11 | 2 | 2 | 3 | 0 | 7 | 1.75 | 5 |
| 12 | 2 | 2 | 4 | 0 | 8 | 2 | 2 |
| 13 | 5 | 2 | 3 | 0 | 10 | 2.5 | 3 |
| 14 | 10 | 2 | 2 | 0 | 14 | 3.5 | 8 |
| 15 | 8 | 1 | 2 | 0 | 11 | 2.75 | 6 |
| 16 | 0 | 4 | 3 | 0 | 7 | 1.75 | 1 |
| 17 | 0 | 5 | 3 | 0 | 8 | 2 | 2 |
| 18 | 5 | 4 | 2 | 0 | 11 | 2.75 | 3 |
| 19 | 5 | 5 | 2 | 0 | 12 | 3 | 3 |
| 20 | 3 | 3 | 3 | 0 | 9 | 2.25 | 0 |
| 21 | 0 | 3 | 1 | 0 | 4 | 1 | 2 |
| 22 | 0 | 2 | 2 | 0 | 4 | 1 | 0 |
| 23 | 0 | 2 | 2 | 0 | 4 | 1 | 0 |
| 24 | 0 | 2 | 3 | 0 | 5 | 1.25 | 1 |
| 25 | 0 | 3 | 1 | 0 | 4 | 1 | 2 |
| | | | | | Total | 64 | 90 |
| | | | | | ค่าเฉลี่ย | $\bar{x} = 2.56$ | $\bar{R} = 3.6$ |

- จำนวนตัวอย่างกรู๊ปย่อย 25 ชุด ($k = 25$) ชุดละ 10 ชิ้น ($n = 10$)

- หาค่าเฉลี่ยของกรู๊ปย่อย

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{K}$$

$$\bar{x} = \frac{2.5 + 4.5 + \dots + 1}{25}$$

$$\bar{x} = \frac{64}{25}$$

$$\bar{x} = 2.56$$

- หาค่าเฉลี่ยของพิสัย R

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{25}}{25}$$

$$\bar{R} = \frac{6 + 8 + \dots + 2}{25}$$

$$\bar{R} = \frac{90}{25}$$

$$\bar{R} = 3.6$$

คำนวณค่าเพื่อสร้างเส้นแสดงขอบควบคุมเขตควบคุม (Control Lines)

- เส้นขอบเขตควบคุมค่าสูง (UCL) - เส้นขอบเขตควบคุมค่าต่ำ (LCL)

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$= 2.49 + (0.729)(3.6)$$

$$= 5.114$$

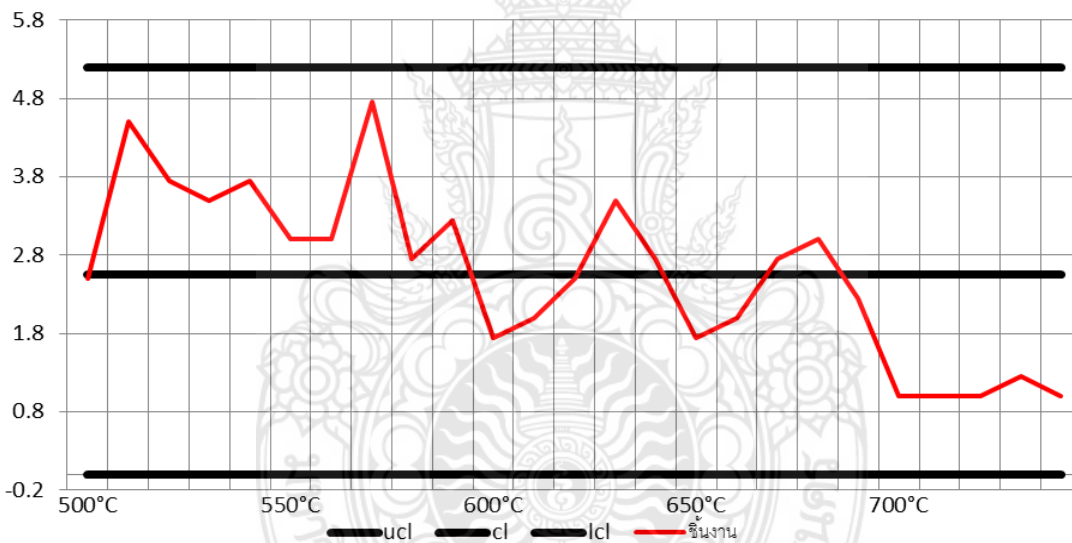
$$LUL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

$$= 2.49 - (0.729)(3.6)$$

$$= -0.134 \text{ ค่าติดลบหาค่าไม่ได้}$$

*ค่า A_2 หาได้จากตารางเฟคเตอร์

ตารางที่ 4.7 แผนภูมิแสดงการหาของเสียทางสถิติเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากกระบวนการผลิตของ
อุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพู



4.3 สรุปผล

ผลการทดลองเพื่อค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบคุณภาพผิวและผลเชิงคุณภาพเพื่อหาของเสียจากการตรวจสอบคุณภาพผิว ให้ผลจากการทดลองมีความสัมพันธ์กันคือจากการทดลองการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่ามีชิ้นงานดี 35 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 70% ชิ้นงานเสีย 15 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 30%

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาคุณสมบัติโดยทั่วไปของโลหะเงินเจือสีชมพูการหาส่วนผสมด้วยการยิง สเปคโตรตรวจสอบส่วนผสมโลหะจนถึงการหาจุดหลอมเหลวจากการหลอมโลหะเงินเจือสีชมพูระบบเปิดและทำการตรวจสอบอุณหภูมิด้วยปืนวัดอุณหภูมิ ไปจนถึงการตั้งค่าอุณหภูมิการอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพูจากอุณหภูมิของการอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับทั่วไปและทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลและบันทึกผลการทดลองจนพบปัญหาในการทำงานจึงได้ทำการแสดงผลของการทดลอง และทำการศึกษาข้อมูลของปัญหาและแสดงรูปของปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานและหาวิธีแก้ไขปัญหา ทำการสรุปผลการทดลองด้วยการเก็บข้อมูลจากช่วงอุณหภูมิ อบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพูที่เหมาะสม

5.1.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับสำหรับโลหะเงินเจือสีชมพูเพื่อทดลองหาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเข้าปูนหล่อที่เหมาะสม พบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นงานดี 26% ขึ้นงานเสีย 74% อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสขึ้นงานดี 26% ขึ้นงานเสีย 74% อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสขึ้นงานดี 40% ขึ้นงานเสีย 60% มีผิวงานใกล้เคียงกันพบว่าขึ้นงานเสียเป็นครีบเป็นส่วนมาก มีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดครีบบนชิ้นงาน การใช้ปูนหล่อที่แรงยึดตัวต่ำ อีกทั้งการใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไปหรือการให้ความร้อนเปลี่ยนอย่างฉับพลันทำให้เกิดการขยายตัวและการหดตัวไม่เท่ากัน จึงก่อให้เกิดรอยแตกร้าวจากแรงดันน้ำโลหะเข้าไปขยายตัว ในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ขึ้นงานดี 56% ขึ้นงานเสีย 44% อุณหภูมินี้พบว่าขึ้นงานเสียเกิดจากผิวงานไม่เรียบมากที่สุด สาเหตุเกิดจากอัตราการเย็นตัวในแต่ละส่วนของงานหล่อไม่เท่ากัน และในอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่สุดในการหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพู เนื่องจากผลการทดลองพบว่ามีการขึ้นงานน้อยที่สุด พบว่ามีขึ้นงานดี 70% ขึ้นงานเสีย 30%

5.1.2 สรุปตามวัตถุประสงค์

จากการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจนถึงขั้นตอนการทำงาน และทำการทดลองพบว่าในอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อเครื่องประดับที่ 700 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากที่สุดขึ้นงานที่พบเกิดจุดบกพร่องน้อย ในการหล่อเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือสีชมพูสามารถนำมาเป็นวัสดุทำเครื่องประดับและหล่อเครื่องประดับได้จริงเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลังจากทำการทดลองพบปัญหาอีกทั้งวิธีแก้ไขข้อบกพร่องในการหาอุณหภูมิอบเข้าปูนหล่อโลหะเงินเจือสีชมพู

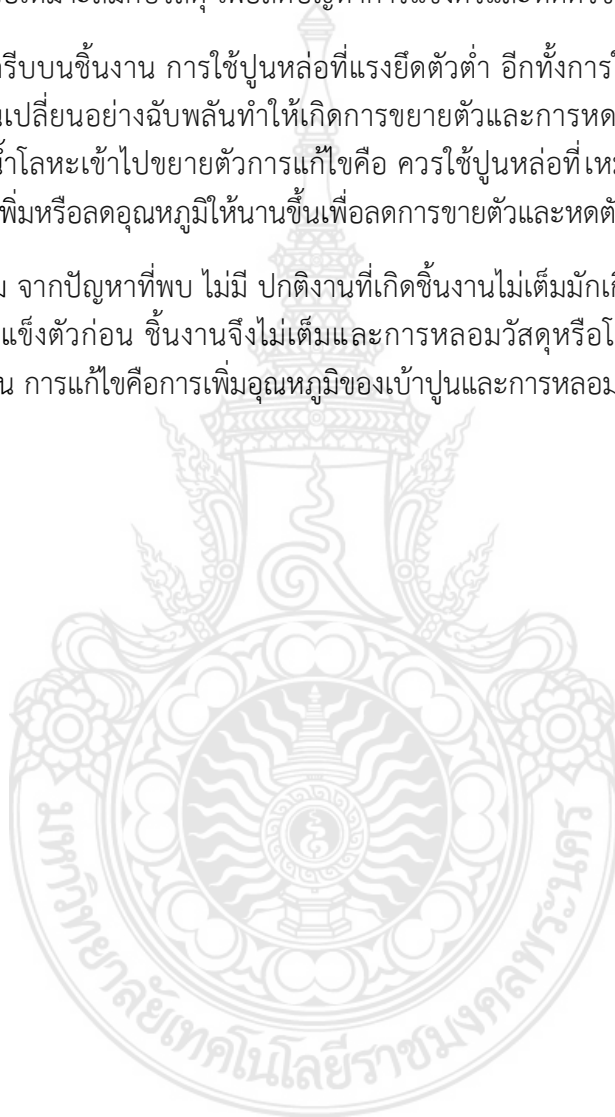
5.3 สรุปปัญหาและข้อเสนอแนวทางแก้ไข

1. ตามต ส่วนมากมาจากฟองอากาศที่เกิดจากการผสมปูนแล้วทำการสูญญากาศออกไม่หมด และทำให้ฟองอากาศติดตามชิ้นงานและหล่อขึ้นรูปก็จะเกิดตามมา การแก้ไขปัญหาคือการเพิ่มเวลาดูดสูญญากาศออกและทำการเขย่าเบาๆเพื่อให้ฟองอากาศขยับหรือลอยออกจากชิ้นงานก่อนปูนแข็งตัว

2. ผิวไม่เรียบที่พบ เกิดจากอุณหภูมิระหว่างปูนมีความต่างกับน้ำโลหะเกินไปทำให้เกิดการแข็งตัวและหดตัวไม่พร้อมกัน ทำให้ผิวงานไม่เรียบ การแก้ไขคือการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับขนาดและรูปแบบของชิ้นงานหรือเหมาะสมกับวัสดุ เพื่อลดปัญหาการแข็งตัวและหดตัวของโลหะในกระบวนการหล่อ

3. เกิดครีบก้นบนชิ้นงาน การใช้ปูนหล่อที่แรงยึดตัวต่ำ อีกทั้งการใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไป หรือการให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันทำให้เกิดการขยายตัวและการหดตัวไม่เท่ากัน จึงก่อให้เกิดรอยแตกร้าวจากแรงดันน้ำโลหะเข้าไปขยายตัวการแก้ไขคือ ควรใช้ปูนหล่อที่เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการหล่อ และกำหนดเวลาการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้นานขึ้นเพื่อลดการขยายตัวและหดตัวของเนื้อปูน

4. งานไม่เต็ม จากปัญหาที่พบ ไม่มี ปกติงานที่เกิดขึ้นงานไม่เต็มมักเกิดจากอุณหภูมิของเบ้าปูนเย็นเกินไปทำให้น้ำโลหะแข็งตัวก่อน ชิ้นงานจึงไม่เต็มและการหลอมวัสดุหรือโลหะละลายไม่ดีพอจึงเกิดการแข็งตัวของโลหะเร็วขึ้น การแก้ไขคือการเพิ่มอุณหภูมิของเบ้าปูนและการหลอมโลหะให้ได้ที่เพื่อลดการแข็งตัวของน้ำโลหะ



บรรณานุกรม

- [1] ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,การใช้งานทองและทองผสม,การสัมมนาโครงการวิจัยคุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ, 2541,76 หน้า
- [2] ฉัตรชัย สมสิริ, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, โครงการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) 2542.
- [3] อรัญ หาญสืบสาย, การสื่อสารเรื่องสีอย่างแม่นยำ และการควบคุมสีจากการรับรู้ไปสู่อุปกรณ์วัดสี. Trinity Publishing Co.,Ltd., Thailand
- [4] American Society of Material, Precious Metal, Volume. 5 , New York, ASM International, 1992:679-683 pp.



ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล นายประเสริฐ ชุมปัญญา
Mr. Prasert Chumpanya
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 4701 00238 46 8
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์: 0-2836-3000 ต่อ 4141 โทรศัพท์มือถือ: 08-5162-0582
โทรสาร: 0-2586-0809

E-mail: Prasert_chum@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
คอ.บ. อุตสาหกรรม-เครื่องมือกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างวุฒิการศึกษา)

- งานวัสดุวิศวกรรม
- งานวัสดุศาสตร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิชาภายในประเทศ โดยระบุสถานะในการทำวิจัย

1. ผู้อำนวยการวิจัย : ไม่มี
2. หัวหน้าโครงการวิจัย : ไม่มี
3. งานวิจัยที่ทำแล้วเสร็จ :
 1. การขึ้นรูปร้อนด้วยระบบสุญญากาศพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์
ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2554.
 2. การประยุกต์ใช้การออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนด้วย
ระบบความร้อนแบบสุญญากาศ ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลพระนคร 2554.
 3. การวิจัยและพัฒนาโลหะเงินเจือสีชมพูเพื่อผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยการหล่อระบบเหวี่ยง
ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2558.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล นายจักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง
Mr. Jakkrit Yimchang

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1301 00488 03 3

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์: 0-2836-3000 ต่อ 4187 โทรศัพท์มือถือ: 08-5914-6381

โทรสาร: 0-2586-0809

[E-Mail : jky_1942@hotmail.com](mailto:jky_1942@hotmail.com)

5. ประวัติการศึกษา

วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คอง.บ. อุตสาหการ-เครื่องมือกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างวุฒิการศึกษา)

- งานหล่อเครื่องประดับ
- งานหล่อเครื่องประดับชั้นสูง
- งานแม่พิมพ์ยาง
- งานทำต้นแบบแว็กซ์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิชาภายในประเทศ โดยระบุสถานะในการทำวิจัย

1 ผู้อำนวยกรวิจัย : ไม่มี

2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ไม่มี

3 งานวิจัยที่ทำแล้วเสร็จ :

1. การวิจัยและพัฒนาการหล่ออลูมิเนียมเพื่อผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยการหล่อระบบเหวี่ยง
ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2557.

2. การวิจัยและพัฒนาโลหะเงินเจือสีชมพูเพื่อผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยการหล่อระบบเหวี่ยง
ทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2558.