



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ
โลหะทองขาวเจือตำ 8wt% Ag Au Cu Zn Sn สำหรับผลิตชิ้นส่วน
ประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ

A Study and Analysis Heat Treatment Process Develop the
Composition of Low White Gold Alloys 8wt% Ag Au Cu Zn Sn
for Jewelry Setting Manufacturing

กริธา ลิ่งห์สมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2561 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ โดยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ผลการทดลองพบว่าจากการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองขาวเจือดำ 8k มีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอม ผลทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบพบว่าค่าความร้อนจากสูตรการเจือ $33.33\%Au+50.67\%Ag+10\%Cu+5\%Zn+1\%Sn$, $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%$ และ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+8\%Zn+0\%Pd$ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 458.9 – 326.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สรุปผลเห็นว่าสูตรการเจือ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ เป็นสูตรการเจือซึ่งให้ค่าความร้อนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวต่ำที่สุด เท่ากับ 326.3 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่ดีที่สุดของการทดลองนี้ เหมาะสำหรับการใช้ในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับอันเนื่องมาจากสามารถหลอมละลายเพื่อการหล่อขึ้นรูป การหลอมละลายเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร และขึ้นรูปด้วยมือ ปริมาณของธาตุสังกะสี (Zn) อาจเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันตรงจากสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นสูงสุดในลำดับการเจือสุดท้าย ปริมาณที่ 7 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : เครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k, กระบวนการขึ้นรูป, วัสดุตัวเรือนเครื่องประดับ, จุดหลอมละลาย

Abstract

This Research is to Study the Development of 6k White Gold Low Alloys Metal for Jewelry Production The Optimum Conditions for Casting Jewelry and Jewelry were Investigated.

The Results of the Experiments Show that the Chemical Composition of the 8k White Gold Low Alloys is Slightly Different when Compared with XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) Pre-and Post-Melting Quantities The Heat of the Test Specimen was found to be 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn, 33.33%Au+50.67%Ag+8% Cu+7%Zn+1%Sn and 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn It is Found that the Heat from the Beginning to the Level of Change before the Liquid is used the Average Temperature of 458.9 – 326.3 Degrees Celsius, Respectively, 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn It is the Formula that Gives the Lowest Value of Liquid State Change from 326.3 Degrees Celsius to the Best Value of this Experiment. Suitable for use in the Manufacture of Jewelry due to its Melting Ability for Molding. Melting for Molding and Formed by Hand. The Amount of Zinc(Zn) may be an Important Factor in the Variation, which is Directly Proportional to the Maximum Increase in the Final order of 7 Percent.

Keywords: 8k White Gold Low Alloy Metal Jewelry, Forming Process, Jewelry Housing Material, Melting Point

กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

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	5
1.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีทองคำ	8
2.2 โลหะวิทยาของทองคำเจือหรือทองคำกะรัต	11
2.3 อิทธิพลธาตุของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของทองคำ	15
2.4 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงิน สเตอร์ลิง	27
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงาน	39
3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ	40
3.3 ขั้นตอนการติดตั้งเตียนสำหรับการหล่อ	45
3.4 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ	46
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	50
3.6 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมทางความร้อน	51
3.7 สรุป	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k	55
4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนจากชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k	56
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	62
ประวัติย่อผู้วิจัย	63

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	ภาคตัดในแนวตั้งที่ 18 14 และ 10 กะรัต 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
3.1	แผนภาพแสดงการดำเนินงาน	39
3.2	แสดงลักษณะโลหะทองคำที่ใช้การทดลอง	40
3.3	แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง	41
3.4	แสดงลักษณะโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง	42
3.5	แสดงลักษณะสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง	43
3.6	แสดงลักษณะดีบุกที่ใช้ในการทดลอง	44
3.7	แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8K	45
3.8	แสดงการติดต้นเทียนสำหรับทำชิ้นงานทดสอบ	46
3.9	แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์	47
3.10	แสดงการอบปูน	47
3.11	แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ	48

3.12	การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ	49
3.13	ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป	50
3.14	เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ	51
3.15	การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 1	52
3.16	การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 2	53
3.17	การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 3	54
4.1	กราฟแสดงอุณหภูมิจุดหลอมละลายของโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ระยะเวลาและแผนการดำเนินโครงการวิจัย	4
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
3.1	อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k	44
4.1	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลองของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k	55
4.2	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k	56

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 และกำไลข้อเท้าเด็ก คนไทยจะรู้จักในชื่อ นาค นิยมนำมาหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและชิ้นส่วนตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อทำการฝังอัญมณีเพิ่มบนตัวเรือนเครื่องประดับ และการขัดแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จรูป ทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มมากขึ้น ทองขาว 8k ที่ผู้วิจัยมีความต้องการทำการวิจัยและพัฒนานั้น มุ่งหวังที่จะพัฒนางานในด้านวัสดุทดแทน 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 ลื่นสปริง และบานพับ ที่ใช้กับสร้อยข้อมือ สร้อยคอยังรวมไปถึง ข้อต่อบานพับของกำไล หรือบานพับของขาต่างหู และสปริงก้านต่างหู โดยการประกอบมีส่วนที่ต้องเชื่อมประสานด้วยเปลวไฟจากหัวเชื่อม และการเชื่อมประสานด้วยเลเซอร์หรือย้ำจุดต่อด้วยหมุด ซึ่งขั้นตอนการเชื่อมประสานทั้ง 3 วิธี บางวิธีเป็นการเชื่อมด้วยไฟ อาจทำให้คุณลักษณะความแข็งแรงและทำให้ตัวโลหะคลายความแข็งแรงลง และไม่สามารถตีดกลับเหมือนก่อนโดนไฟ จึงต้องหาส่วนผสมที่ คงรูปและความแข็งแรงอยู่ได้หลังโดนไฟ หรือจะต้องใช้วัสดุตัวประสานในการเชื่อมประสานที่วิ่งเร็วใช้ความร้อนต่ำละลายเร็ว และไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวหรือความแข็งแรงของสปริง และสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงหรือคืนรูปได้ ในเรื่องของสีผิวจะต้องมีระดับสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือน แต่จะต้องมีจุดหลอมละลายสูงกว่าวัสดุตัวเรือน และนอกจากนี้ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ผู้ประกอบการผลิตเครื่องประดับของไทยไม่มีองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโลหะวิทยาและธาตุเจือที่ให้

สมบัติต่างๆ ที่มีคุณภาพที่ดีที่สุดในแง่ของความสามารถในการติดตัว ที่ใกล้เคียงกับวัสดุอื่นเช่น นิกเกิล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับวัสดุตัวเรือนเครื่องประดับแต่ละชนิด

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

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมต่อทองขาวเจือดำ 8k

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 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 ศึกษาวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8wt% Ag Au Cu Zn Sn

1.3.3 ศึกษาวิเคราะห์และตรวจสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมี XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers)

1.3.4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีขององค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1.1 วัสดุ

วัสดุต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัยในโครงการนี้ประกอบด้วย

- 1) โลหะทองโดยโลหะทองที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นโลหะทองความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ด
- 2) โลหะเงินโดยโลหะเงินที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นโลหะเงินความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ด
- 3) ทองแดงโดยทองแดงที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.9% มีลักษณะเป็นเม็ดที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไปตามร้านขายเครื่องมือช่างและวัสดุสำหรับการผลิตเครื่องประดับ
- 4) สังกะสีเป็นธาตุบริสุทธิ์ 99.99% ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด
- 5) ดีบุกบริสุทธิ์ 99.99% ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด

1.4.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์สำหรับการหล่อหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นสนบนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าหลอมโลหะ ปูนสำหรับทำแบบหล่อ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง และเทียนสำหรับฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียน
- 2) วัสดุสำหรับการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วย กระจกทราย ผ่าขัด ผงเพชรขนาดต่างๆ และสารเคมี

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

- 1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการหลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งประกอบไปด้วย หลอมผสมเทเม็ดโลหะ เครื่องหล่อแบบเหวี่ยงและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ(เครื่องฉีดเทียน เครื่องผสมปูน เครื่องอบนึ่งไอน้ำและเตาอบปูนแบบหล่อ)
- 2) เครื่องมือวิเคราะห์และตรวจสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาปริมาณส่วนผสมทางเคมี XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers)

ทอง 99.99% ที่ 33.33wt% และที่ อัตราส่วนผสม Ag Au Cu Zn Sn													
6. หล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ													
7. วิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบ													
8. ตรวจสอบคุณภาพงานหล่อของชิ้นงาน (ลักษณะบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นหลังการหล่อขึ้นรูปขึ้นงาน)													
9. สรุปผลการทดลองโครงการวิจัย และจัดทำรายงาน และส่งรายงานฉบับสมบูรณ์ พร้อมถ่ายถอดองค์ความรู้													

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

กระบวนการผลิตเครื่องประดับประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตหลักๆ คือ การหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับและชิ้นส่วน การเชื่อมประสานประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ การฝังอัญมณีบนตัวเรือนเครื่องประดับ และการขัดแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จรูป ซึ่งกระบวนการหล่อเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในขั้นตอนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k ที่มีผลต่อสถานะการหลอมละลายที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อให้ได้คุณสมบัติชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในแต่ละด้านต่อไป

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

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

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

17.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในรูปแบบขององค์ความรู้สำหรับการ เผยแพร่ในวารสารและการนำไปใช้ประโยชน์ ประกอบด้วย

1. โลหะใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับทองคำ และชิ้นส่วนประกอบตัวเรือนเครื่องประดับ ลดการนำเข้าวัสดุเหล่านี้จากต่างประเทศ รวมไปถึงจนถึงการขจัด สิทธิบัตร/ ลิขสิทธิ์/ เครื่องหมายการค้า
2. ได้ทราบข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือโลหะเงิน ทอง ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อสภาวะการหลอมละลายของโลหะทองขาวเจือต่ำเจือต่ำ 8k
3. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือต่ำ 8wt% Ag Au Cu Zn Sn
4. ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปสู่การพัฒนาในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ที่รัฐบาลประกาศสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ
5. สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัย ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

17.2 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ทั้งภาครัฐ และภาคเอกชน (ในด้านกระบวนการผลิตและเชิงพาณิชย์)

1. กลุ่มผู้ประกอบการภาคการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ชมรมช่างเครื่องประดับไทย สมาคมผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับแห่งประเทศไทย สมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับไทย
2. สถาบันการศึกษาและหน่วยงานของรัฐที่ดำเนินการจัดการเรียนการสอนทางด้านอัญมณีและเครื่องประดับ และส่งเสริมการประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา กาญจนบุรีมหาวิทยาลัยช่างทองหลวง 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 และทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนซึ่งมีมูลค่าถูกกว่าโลหะทองคำ และมีคุณภาพสูงกว่าโลหะเงิน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับประเทศไทยนั้นใช้มาตรฐานความบริสุทธิ์ของทองคำที่ 96.5 เปอร์เซ็นต์ หากจะเทียบเป็นกะรัตแล้ว จะได้ประมาณ 23.16k ซึ่งจะได้สีทองที่เหลืองเข้ม และมีความแข็งของเนื้อทองพอเหมาะสำหรับการนำมาทำเครื่องประดับประเภทที่ไม่ฝังอัญมณีที่มักเรียกว่างานทอง หรือ งานร้านทอง นั้นเอง หรือ ถ้าหากจะฝังบ้าง ก็ฝังเพียงไม่กี่เม็ดและฝังแบบที่ลือคออัญมณีแน่นหนาเท่านั้น ส่วนเครื่องประดับประเภทงานร้านเพชร หรือ งานจิวเวลรี่ มักนิยมความบริสุทธิ์ของทองคำอยู่ที่ 18k 14k 10k 9k และ 8k เพราะจะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อทองไม่มากนัก จึงทำให้เครื่องประดับมีความแข็งเพียงพอที่จะยึดเกาะอัญมณีเม็ดเล็กๆ ได้นั่นเอง ส่วนการใช้ทอง 24k หรือ ทอง 99.99% ในการทำเครื่องประดับนั้น ไม่นิยมนำมาทำเครื่องประดับมากนัก เนื่องจากทองคำบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ มีความอ่อนตัวมาก จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ จำเป็นต้องผสมโลหะอื่นๆ ลงไปเพื่อปรับสมบัติทางกายภาพของทองคำให้แข็งขึ้น คงทนต่อการสึกหรอ โลหะที่นิยมนำมาผสมกับทองคำได้แก่ เงิน ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งอัตราส่วนจะสัมพันธ์ตามความต้องการของผู้ใช้งาน กล่าวคือ ผู้ผลิตทอง รูปพรรณแต่ละรายจะมีสูตรของตนเอง ในการผสมโลหะอื่นเข้ากับทอง บางรายอาจผสมทองแดงเป็นสัดส่วนที่มากหน่อยเพราะต้องการให้สีของทองออกมามีสี อมแดง หรือ บางรายอาจชอบให้ทองของตนสีออกเหลืองขาวก็ผสมเงินในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ซึ่งทั้งหมดนั้นจะได้รับความบริสุทธิ์ของทอง 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 ($\mu\Omega\text{mm}$)	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 กรณีการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะซีทิลีน (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) ซึ่งประกอบด้วย เงิน ทองแดงและ สังกะสี ทางด้านโลหะวิทยาที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับของทองคำเจือ ซึ่งการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือรอง (Major Alloying Element) ต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหะวิทยาและผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและระดับสีของทองคำที่ผสมธาตุเจือหลัก ดังนั้นในการศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาจึงมีการ

กล่าวอ้างถึงเฉพาะอิทธิพลของธาตุเจ้าหลัก เงิน ทองแดง และสังกะสี เท่านั้น ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อ
ย่อยต่อไป

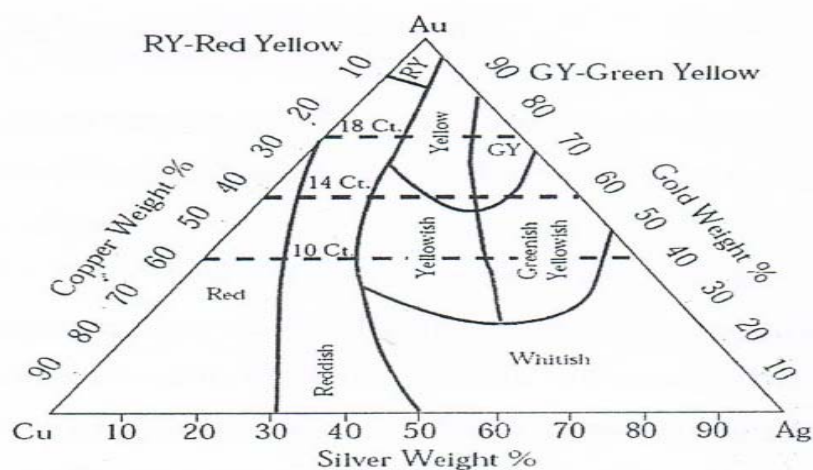
2.2.1 ทองคำเจือที่อิงระบบทอง-เงิน-ทองแดง

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

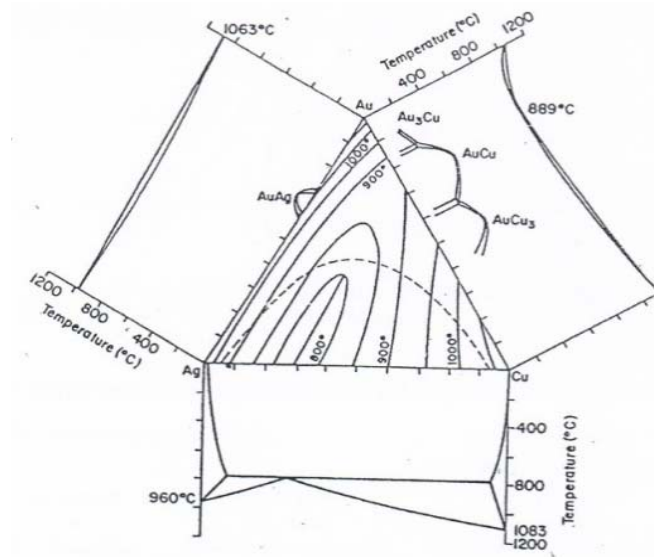
จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะทองคำเจือในระบบ 2 ธาตุระหว่างทองคำ-เงิน
บริเวณที่เป็นเฟสของแข็งเฟสเดียวเกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ
200°C ในช่วงส่วนส่วนผสมที่มีธาตุเงินระหว่าง 30 ถึง 40 wt% หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ
200°C จะเกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่สอง คือ AuAg เนื่องจากขอบเขตการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่อ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

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

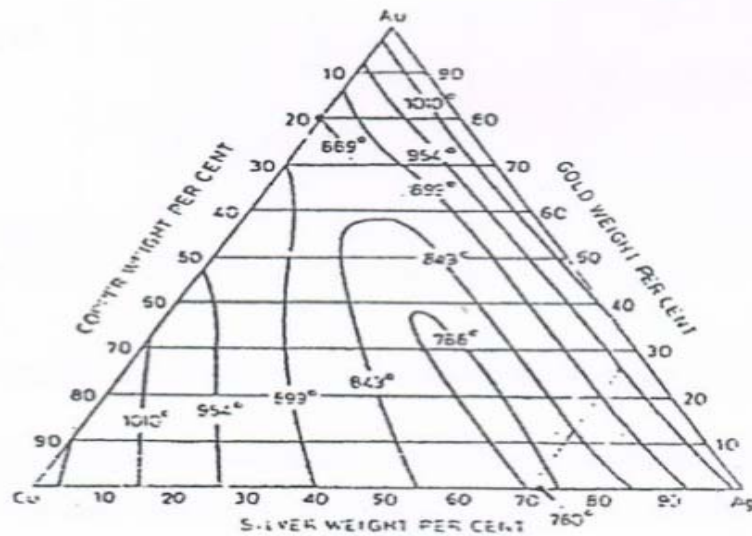
ในระบบของเงิน-ทองแดง แสดงปฏิกิริยายูเทคติกที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงโดยมีอุณหภูมิ
ยูเคติก ที่ 799°C ในช่วงที่มีทองแดงผสมอยู่ 8.8



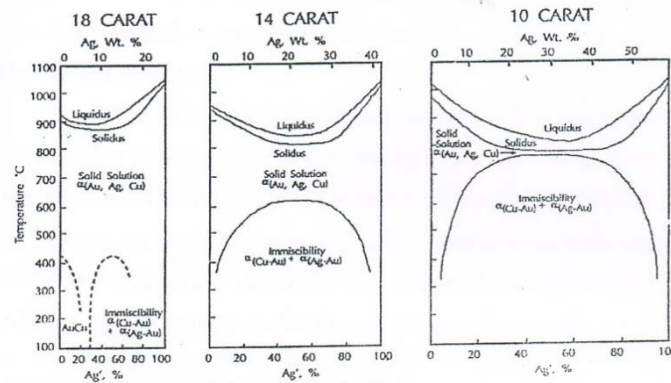
รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองทองคำเจือในระบบ 3 ธาตุ ทองคำ-เงิน-ทองแดง [1]



รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดในแนวระนาบของแผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-เงิน-ทองแดง [1]



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำ [4]



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

จากรูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนผสมทางเคมีของทองคำเงินในระบบ 3 ธาตุ (Ternary Phase Diagram) ทองคำ-เงิน-ทองแดง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทองคำเงิน ที่อัตราส่วนผสมต่างๆกันในตำแหน่ง 18 14 และ 10 กระรัตตามลำดับ

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

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

จากสูตรแสดงว่าระบบทองคำเงิน ทองคำ-เงิน-ทองแดง และทองคำเงิน-ทองแดง-สังกะสี สามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ ด้วยตัวแปรเพียง 2 ตัว จำนวนกระรัต (%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 จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เฟสที่ได้ คือ เฟสอัลฟา ($\alpha = \text{Cu-Au}$) ตกตะกอนในทองคำเจือที่มีทองแดงสูง (Copper Rich Alloys) และจะได้ เฟสอัลฟา 2 ($\alpha_2: \text{Ag - Au}$)ⁿ ตกตะกอนอยู่ในทองคำเจือเงินสูง (Silver Rich Alloy) ทองคำเจือชนิดนี้จะมีความอ่อนปานกลางในสภาพที่ผ่านการอบอ่อน แต่สามารถปรับเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวิธีการบ่มเพิ่มความแข็งแรง

ค. ชนิดที่ 3 ค่า Ag' ในช่วงที่ 25-75% ทองคำเจือชนิดนี้จะมีช่วงที่เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวและสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดช่วงไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ แต่ถ้าให้เย็นตัวแบบสมดุลลงมาถึงอุณหภูมิห้อง เฟสของแข็งเนื้อเดียวนั้นสารละลายตัวไปเป็นเฟส α (Cu-Au) และเฟส ($\alpha_2: \text{Ag - Au}$)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 การเติมสังกะสีจะส่งผลทำให้แนวโน้มของทำเจือระบบ ทองคำ-เงิน-ทองแดง-สังกะสี มีความแข็งแรงน้อยกว่าทองคำเจือระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง ทั้งในสภาวะที่ผ่านการอบอ่อนและในสภาวะอบเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (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
บัลค์โมดูลัส (K : GPa)	103.6	137.8
โมดูลัสเฉือน (G : GPa)	30.3	48.3
อัตราส่วนของพัชองส์ (γ)	0.367	0.434
ความเหนียว (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

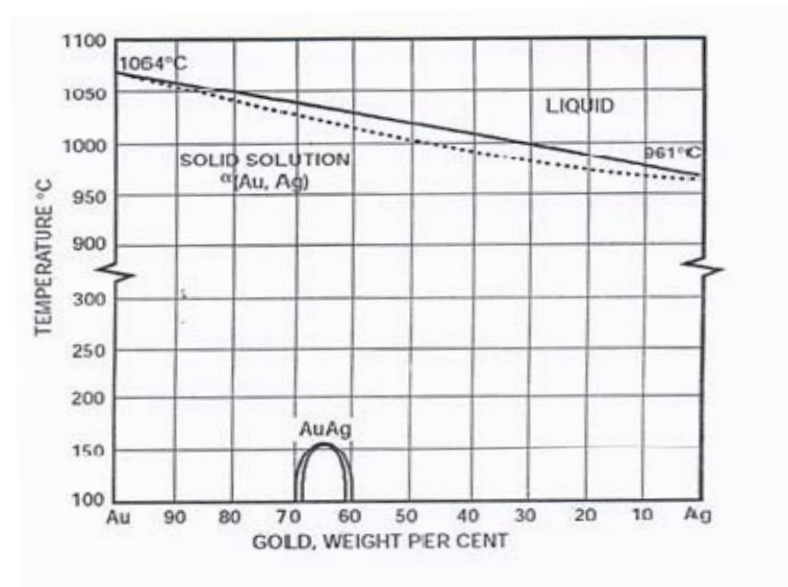
ตารางที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุเจือ สีและสมบัติที่เกิดขึ้นของทองคำ

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

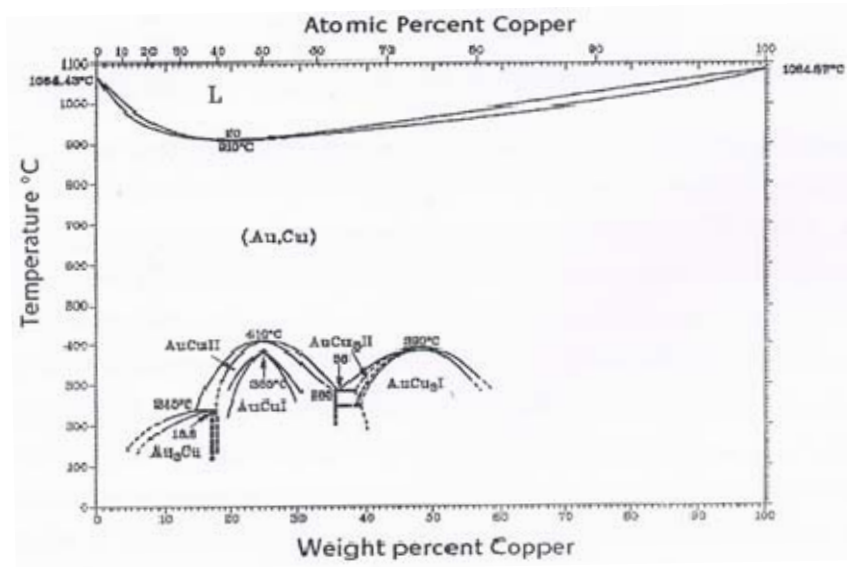
ดีบุก	ขาว	ประโยชน์ในการเคลือบสีของทองคำเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
-------	-----	--

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. อิทธิพลของทองแดงต่อทองเจือ 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

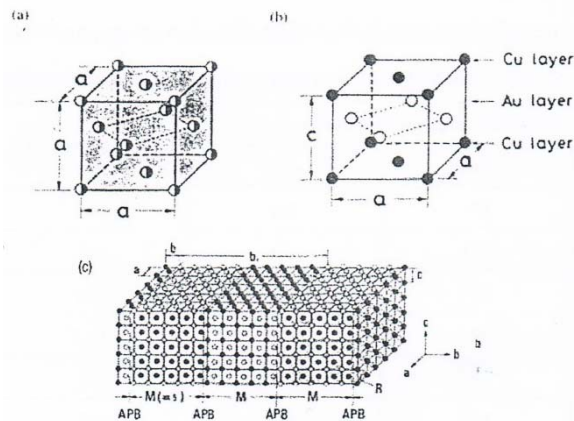


รูปที่ 2.5 แผนแสดงสมดุลเฟสของทองคำ-เงิน [5]



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

ผลึกแบบFace-Center Cubic Face-Center Cubic การบิดตัวของแลตทิซทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ที่ลำบาก ส่งผลให้ทองคำเจือเกิดการเปลี่ยนรูปได้ลำบากเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้สารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจึงมีความแข็งแรงกว่า แข็งแรงกว่า และมีความเหนียวน้อยกว่าสารละลายของแข็งแบบไร้ระเบียบ การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งแบบเป็นระเบียบจะเกิดที่การเย็นตัวอย่างช้า จากอุณหภูมิอบอุ่น สามารถทำการอบชุบที่ 410°C แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 150-300°C ทำให้เกิดปฏิกิริยาการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Oedered Reaction การจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบมีอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมทองคำ : ทองแดงอย่างง่าย ๆ คือ 1:1 1:3 และ 3:1 โดยเรียกชื่อเฟสเป็นปริมาณทองคำ 50.8 wt% เป็นทองคำที่อยู่ในช่วง 9 และ 14 ะรัต ส่วนทองคำเฟสเป็นทองคำเจือที่มีส่วนผสมทองคำ 83 wt% อย่างไรก็ตามเฟสทั้งสองนี้ไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการเป็นสารละลายของแข็งที่เป็นระเบียบมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ AuCu เนื่องจากเฟส AuCu เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยมีความแตกต่างของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ AuCu₁ ที่มีโครงสร้างเป็น Face-Center Tetrafonal ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 385°C และ AuCu₃ เป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิก Orthorhombic ที่อุณหภูมิ 385°C - 410°C

ในกรณีของทองคำเจือ 18 ะรัตที่พิจารณาของทองแดงที่แตกต่างกันยังมีผลให้สมบัติของกลและสีของเนื้อโลหะมีความต่างกัน โดยที่ความแข็งทองคำเจือจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ ผลของการลดก็มีส่วนเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกของ Work Herdening ดังในตารางที่ 2.6

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

สีของทองคำเจือ	ปริมาณทองแดง%	ความแข็งแรงแบบ บริเนลหลังจากผ่าน การลดขนาดต่างกัน 15%	ความแข็งแรงแบบ บริเนลหลังจากผ่าน การลดขนาดต่างกัน 30%	ความแข็งแรงแบบ 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 AuCu₃ ซึ่งเป็นเฟสที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (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 มาสามารถเพิ่มความแข็งได้จากการปรับส่วนผสมเมื่อ โลหะผสมอยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid Solution)

- สมบัติทางกล เช่น ค่าความแข็ง จะเปลี่ยนอะตอมในเนื้อโลหะผสมเกิดการเรียงตัวอย่างเป็น ระเบียบ

- 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)

ธาตุเจือรองเป็นธาตุที่ผสมลงไป ในทองคำเจือในปริมาณน้อย 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]

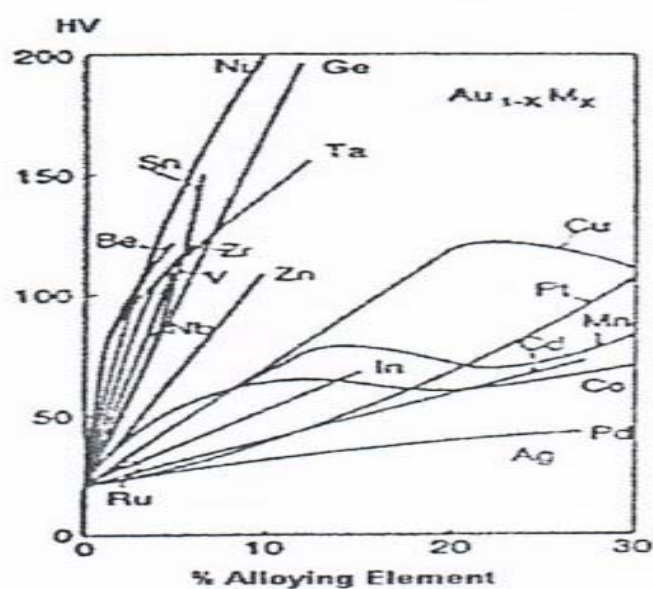
ธาตุ	ทำให้ เกรนละเอียด	ทำให้ เกรนหยาบ	ปรับปรุงสม บัติการหล่อ	ทำให้เปราะ	เพิ่ม ความแข็ง	ลดออกซิเจน
อิริเดียม	A	-	-	I	-	-
รูทีเนียม	A	-	-	-	-	-
ซิลิกอน	-	I	A	I	-	A
โคบอลต์	A	-	-	-	A	-
สังกะสี	-	-	A	-	-	A
ตะกั่ว	A-	-	-	I	-	-
แบเรียม	-	-	-	-	-	-
ไททาเนียม	A	-	-	-	A	-
แคลเซียม	-	-	-	-	A	-
แกลเลียม	A	-	-	I	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 ทำให้ได้ทองสีทองใกล้เคียงกับการให้ธาตุ निकิล	0.3-0.5 wt% ทำให้เกรนโตและหยาบ 25.0% ทำให้ทองคำมีสีเทาดำ
โครเมียม	-	0.36-0.5% ทำให้เกรนโตและหยาบ
สังกะสี	>0.2wt% ลดการเกิดออกซิเดชันของทองแดง 1-2wt% ปรับปรุงผิวให้เงางาม เติมปริมาณเท่ากับเงิน และทองแดงช่วยการแตกขณะที่ทำการรีด	-

ตะกั่ว	เพิ่มความแข็ง	เกินกว่า 0.01 wt% เกิดการแตกหักแบบเปราะ
โบรอน	ให้ผลเหมือนซิลิกอน ที่ปริมาณที่ใช้เท่ากัน	-
นิกเกิล	เพิ่มความแข็ง และสีของทองคำจะอ่อนลง ใช้ผสมทำทองคำขาว	สีจะอ่อนลงอย่างรวดเร็ว มีผลต่อผิวหนังทำให้เกิดอาการแพ้
ฟอสฟอรัส	ลดการเกิดออกซิเดชันดีที่สุดในที่สุด	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]

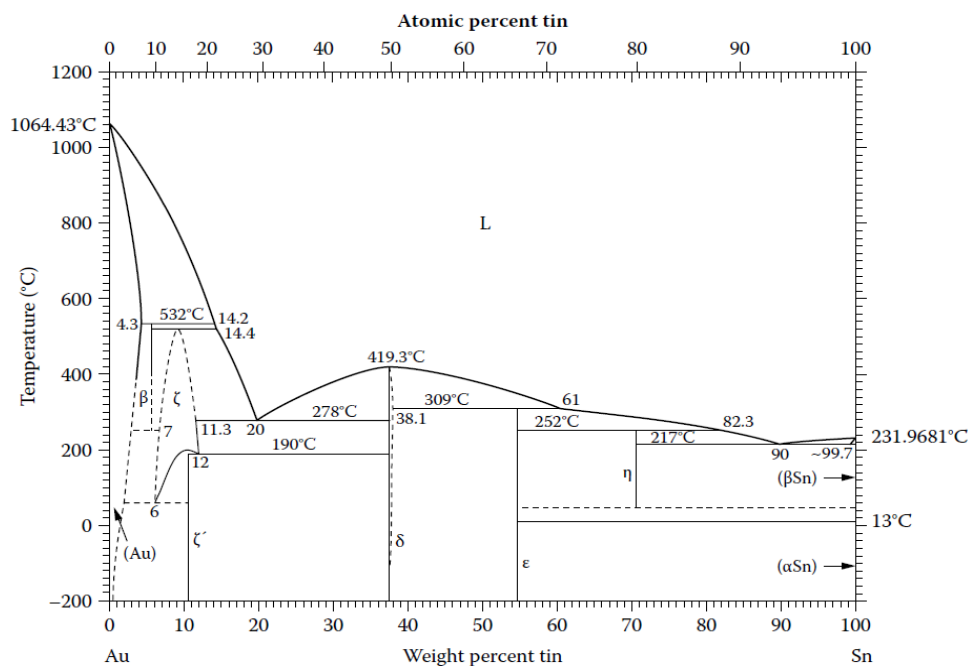
ชนิดธาตุเจือและปริมาณของการเจือ	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 0	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 40	ความแข็ง HV 10 อัตราการแปรรูป (%) 80
Ag20	40	95	114
Ag30	42	93	115
Ag25Cu5	92	160	188
Ag20Cu10	120	190	240
Ag26Ni3	83	134	166
Ag25Pt5	58	106	130
Co5	92	126	154
Ni5	120	162	188
Pt10	78	102	118

ตารางที่ 2.10 ค่าความแข็งของทองคำเจือที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของธาตุเจือต่างๆ [7]

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

2.3.3 ทองคำ-ดีบุก (Gold-Tin)

โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนยูเทคติก Au-20Sn มีจุดหลอมละลายที่ 280°C เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งและมีความเปราะพอสมควร โดยสมบัติทางกลที่ได้นี้ได้มาจากเฟสที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะของทองคำและดีบุกที่มีชื่อเรียกว่า AuSn (δ) และ Au₅Sn (ζ) ซึ่งเฟส ζ เป็นเฟสที่มีความแข็งสูง แต่โดยธรรมชาติของเฟส ζ จะมีความเสถียรตลอดช่วงกว้างของส่วนผสมทางเคมี ดังแผนภาพสมดุลที่แสดงในรูปที่ 1 ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความเหนียว (ประมาณ 2wt% ที่อุณหภูมิห้อง) แต่ก็ยังสามารถทำการรีดร้อนเป็นแผ่นฟอยล์ (Foil) และขึ้นรูปเบื้องต้น (Preforms) ได้โดยการใช้เทคโนโลยีการหล่อที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่สามารถผลิตแผ่นฟอยล์ที่เหนียวและบางได้ความหนาประมาณ 75 μm และได้โครงสร้างจุลภาคที่ไม่เป็นระเบียบ แต่อย่างไรก็ตามสภาวะนี้ค่อนข้างจะไม่เสถียรและจะต้องทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหลังจากการขึ้นรูปแผ่นฟอยล์ภายในช่วงเวลา 30 นาที แผ่นฟอยล์ที่ได้นี้จะมีสมบัติทางกลที่ไม่แตกต่างจากแผ่นฟอยล์ที่ผลิตจากวิธีการธรรมดาทั่วไป แต่โครงสร้างผลึกที่ได้นี้สามารถคงสภาพเดิมได้ประมาณ 1 ปี ถ้าทำการจุ่มชุบและเก็บรักษาภายใต้ไนโตรเจนเหลว (-196°C) สำหรับในกรณีของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 1 เดือน โลหะผสมชนิดนี้สามารถที่จะนำมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น Strip ที่ยังคงมีความเหนียว แต่หลังจากขึ้นรูปเป็นแผ่น Strip แล้วจะต้องรีบนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C ทันที เพื่อให้คงสภาพความเหนียว และนอกจากนี้โลหะผสมชนิดนี้ยังสามารถที่จะนำไปผลิตเป็นโลหะผงได้ด้วยกระบวนการ Gas Atomization ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย และสามารถคงสภาพเป็นผงได้นานในสารอินทรีย์ปานกลาง (สารอินทรีย์ที่มีส่วนผสมของฟลักซ์) โดยไม่มีการเสื่อมสภาพ ด้วยเหตุนี้โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนชนิดนี้จึงมักถูกนำไปใช้ในรูปของครีมหรือแป้งเปียกสำหรับการต่อประสานชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับเคมีเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.9



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

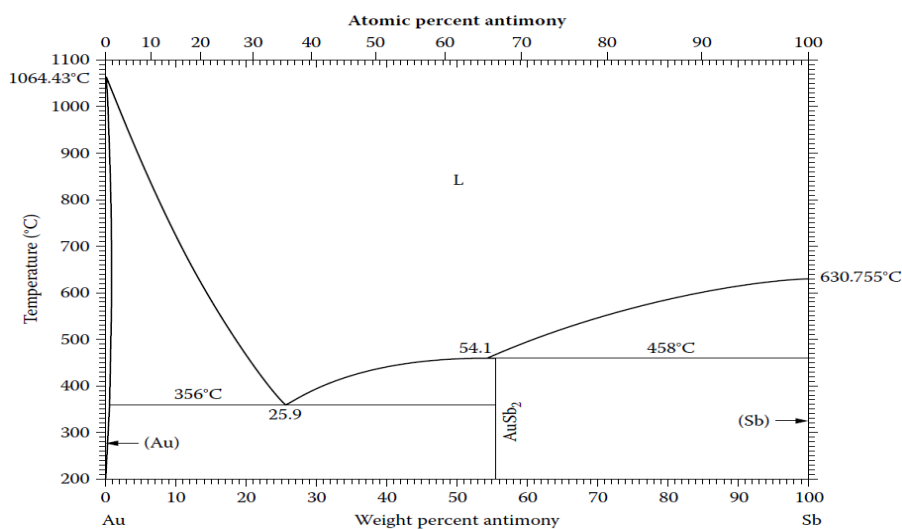
ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ไปใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานนั้น จะใช้วิธีการปกคลุมพื้นผิวรอยต่อด้วยชั้นผิวเคลือบของทองคำที่มีความหนาที่พอเหมาะ โดยการเคลือบทองคำทับบนชั้นพื้นผิวดีบุกที่บางกว่า โดยมีอัตราส่วนความหนาของทองคำต่อดีบุกเท่ากับ 2:1 แต่ถ้าเป็นการเคลือบผิวด้วยวิธี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

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

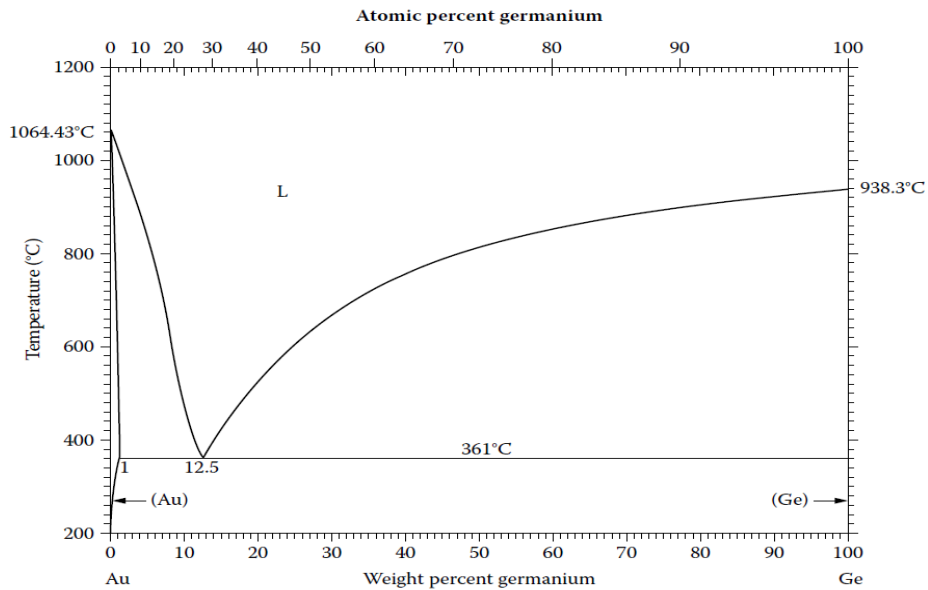
โลหะตัวประสานบัดกรีอ่อนยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้สำหรับการบัดกรีต่อประสานชิ้นส่วนทองคำที่มีความหนาหลายๆ แต่ก็มีสิ่งที่ทำให้ให้เป็นอุปสรรคสำหรับการดำเนินการจากสมบัติของการสลายตัวของทองคำที่มีจุดหลอมละลายสูงขึ้นและไหลตัวได้ค่อนข้างยากส่งผลให้การเปียกเกิดขึ้นได้ยาก โลหะผสมที่เป็นส่วนผสมที่ก่อให้เกิดอุปสรรคสำหรับการไหลตัวประกอบด้วย ทองแดง นิกเกิล โครเมียมและไนโครม (Nichrome) ตัวอย่างของโลหะที่ช่วยให้เกิดการไหลตัวได้ดีสำหรับโลหะผสม Au-20Sn คือ พัลลาเดียมซึ่งพัลลาเดียมช่วยให้โลหะผสม Au-20Sn ไหลตัวได้ดีโดยการละลายผสมในโลหะตัวประสานทองคำ-ดีบุก ในช่วงขอบเขตการละลายที่ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าบริเวณรอยบัดกรีต่อประสานนี้ถูกนำไปบ่มในสภาวะของแข็ง จะเกิดการก่อตัวของช่องว่าง Kirkendall ที่บริเวณเฟสที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสระหว่างพัลลาเดียมที่ไม่ละลาย (ตกค้าง) กับสารประกอบเชิงโลหะ Pd₃Sn₂ ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และส่งผลให้รอยต่อประสานอ่อนแอ ความสามารถในการละลายของพัลลาเดียมในโลหะตัวประสานบัดกรีอ่อน Au-20Sn ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิสำหรับการ

บัดกรีโดยทั่วไปจะมีวัฏจักรของขบวนการที่สั้นและช่วยให้ชั้นบางๆ ของแพลทินัม (200nm) เกิดการเปื่อยกอย่างรวดเร็วจนและเป็นชั้นอุปสรรคสำหรับการต่อประสานที่เสถียร

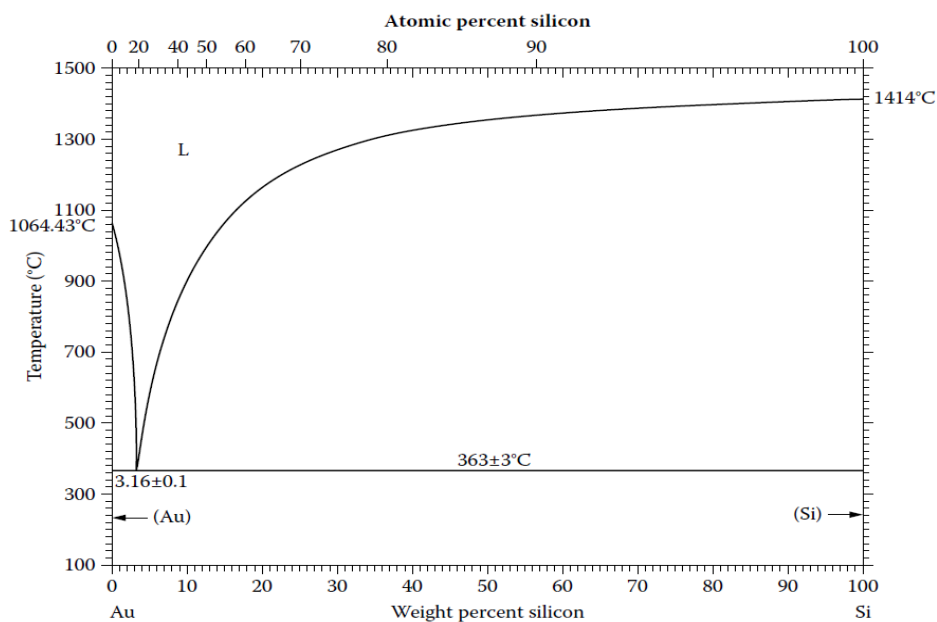
การผสมหรือเติมโลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าโลหะผสมที่เป็นตัวประสานยูเทคติกทองคำ-ดีบุก ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการต่อประสานฟิล์มโลหะที่หนา ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการเติมเงินและทองแดงในโลหะผสมทองคำ-ดีบุกเพื่อแทนที่ทองคำ ซึ่งอัตราการผสมที่เหมาะสมและช่วงอุณหภูมิหลอมละลายไม่มีการเปิดเผย แต่มีข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการบัดกรีต่อประสานที่อุณหภูมิ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



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



รูปที่ 2.11 แผนภาพสมดุลของค่า-เจอร์มาเนียม (ที่มา : ASM International Handbooks) [8]



รูปที่ 2.12 แผนภาพสมดุลของค่า-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 [10]

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 [10]

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 [10]

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

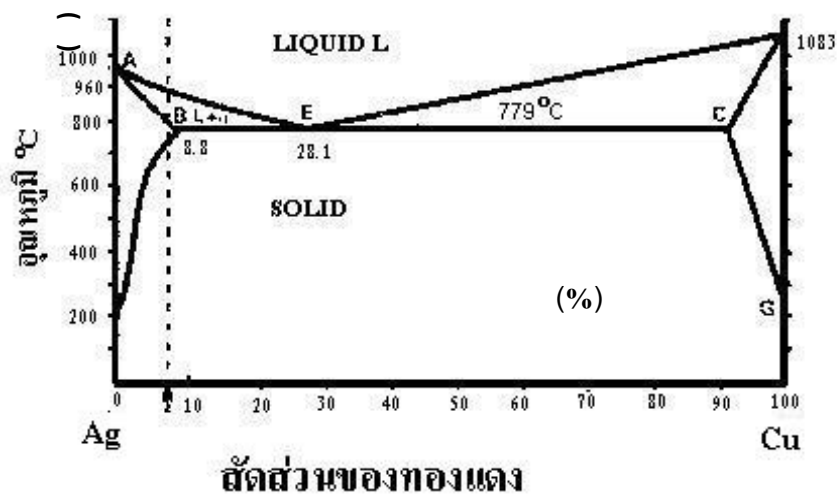
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรท (Argentive Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูนาร์คอสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต (Argentive Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (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 [10]

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 เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกันที่สภาวะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution (α), Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ที่เกิดจากทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วยที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 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 [10]

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% อัลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า อัลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้

เนื้ออัลลอยนึ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 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 โดยการใส่หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ลงในบ้ำหลอม

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

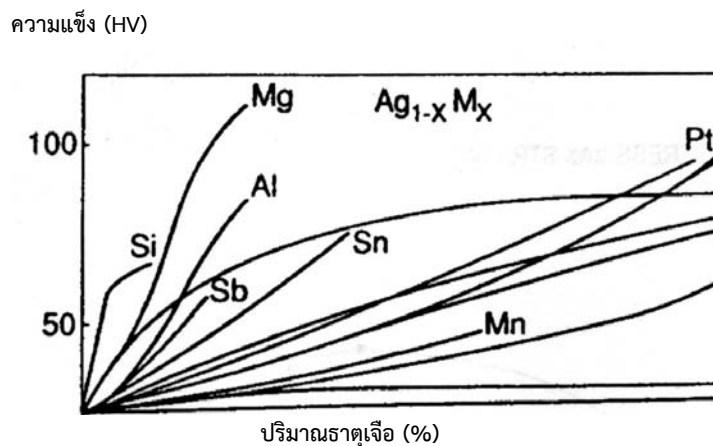
2.4.4 อิทธิพลของธาตุเจือต่อคุณสมบัติของโลหะเงินเจือ

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

ตารางที่ 2.17 ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ [9]

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 [8]

ตารางที่ 2.18 ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง [8]

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 หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผลทางด้านการไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี และช่วยลดก๊าซออกซิเจน (Deoxidized) ในโลหะเงินหลอมละลาย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล, กรรมวิธีทางความร้อน, ความต้านทานการหมองและการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการหล่อโลหะเงิน+ทองแดง+สังกะสี+ซิลิกอน ด้วยเทคนิคการหล่อในเตาหล่อเหวียงแบบสุญญากาศ โดยกำหนดส่วนผสมของโลหะเงินเจือดังนี้ คือ $93.5\%Ag+4.5\%Cu+1.6\%Zn+0.1\%Si$ ซึ่งมีการแปรผัน มุมทางเดินน้ำโลหะ, ความเร่ง (ความเร็วรอบในการหมุนเหวียง) และอุณหภูมิเทหล่อ พบว่า ค่าที่มีแนวโน้มให้สิ่งบกพร่องภายในชิ้นงานน้อยที่สุด คือ มุมรูเท 65° ความเร่ง 10G และอุณหภูมิเทหล่อ $1050^{\circ}C$ จากผลการวิจัยที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าในโครงการดังกล่าวไม่สามารถทำการศึกษาปริมาณของธาตุเจือรอง (Zn,Si) ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งตรงกับข้อสงสัยของผู้ประกอบการ SMEs ที่ทำการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยเครื่องหล่อเหวียงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา ที่ต้องมีการเติมสังกะสี หรือทองเหลืองเข้าไปในโลหะเงินเพื่อทำหน้าที่เป็นธาตุ Deoxidized หรือไล่แก๊สในน้ำโลหะ

สุรัตน์ วรรณศรี (2548) ได้ทำการศึกษาลักษณะข้อบกพร่องของโลหะเงินเจือทองแดง จากกรรมวิธีหล่อเหวียงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา พบว่าลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อสามารถสรุปลักษณะข้อบกพร่องและสาเหตุของการเกิดออกเป็น 3 ประเภทดังนี้คือ 1) ข้อบกพร่องที่ผิวที่เกิดจากส่วนผสมของโลหะความสกปรกของโลหะและปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะกับปูนแบบหล่อหรือบรรยากาศในการหล่อหลอมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริติกรอยแตกร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือและการหดตัวของโลหะ 2) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมแบบหล่ออัตราการผสมของน้ำกับปูนที่ใช้ทำแบบหล่อไม่เหมาะสมระยะเวลาในการผสมปูนไม่เหมาะสมทำให้ปูนมีการเซ็ตตัวก่อนที่จะเทลงกระบอกปูนเพื่อทำแบบหล่อการสั่นสะเทือนของแบบหล่อขณะที่ปูนกำลังเซ็ตตัวตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นผิวชิ้นงานหยาบมีคราบน้ำที่ผิวชิ้นงานรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและเนื้อปูนฝังในชิ้นงานหล่อเป็นต้นและ 3) ข้อบกพร่องที่เกิดจากขั้นตอนการหล่อหลอมโลหะอุณหภูมิของการหล่อโลหะไม่เหมาะสมและบรรยากาศในการหล่อไม่เหมาะสมตัวอย่างลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเช่นรูพรุนที่ผิวชิ้นงานหรือตามการเกิดฟองแก๊สในชิ้นงานรอยร้าวจากการแยกตัวของธาตุเจือข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงานลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำปลีรอยย่นที่ผิวชิ้นงานและผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวเดนดริติก เป็นต้น

LarryDimond. (1987) ได้สร้างโมเดลข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยขบวนการหล่อแบบ Investment casting ที่มีความสัมพันธ์ขบวนการหล่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมแบบหล่อล้วนมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อแทบทั้งสิ้น

DieterOtt. (1991) ได้ทำการศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งบางองค์ประกอบจะเกี่ยวข้องกับเทคนิค และความละเอียดรอบคอบในการปฏิบัติงานหล่อ และในหลายๆกรณีจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาหรือเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ซึ่งประกอบด้วยการหดตัวของโลหะ การเกิดฟองแก๊สในน้ำโลหะหรือชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

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

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

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

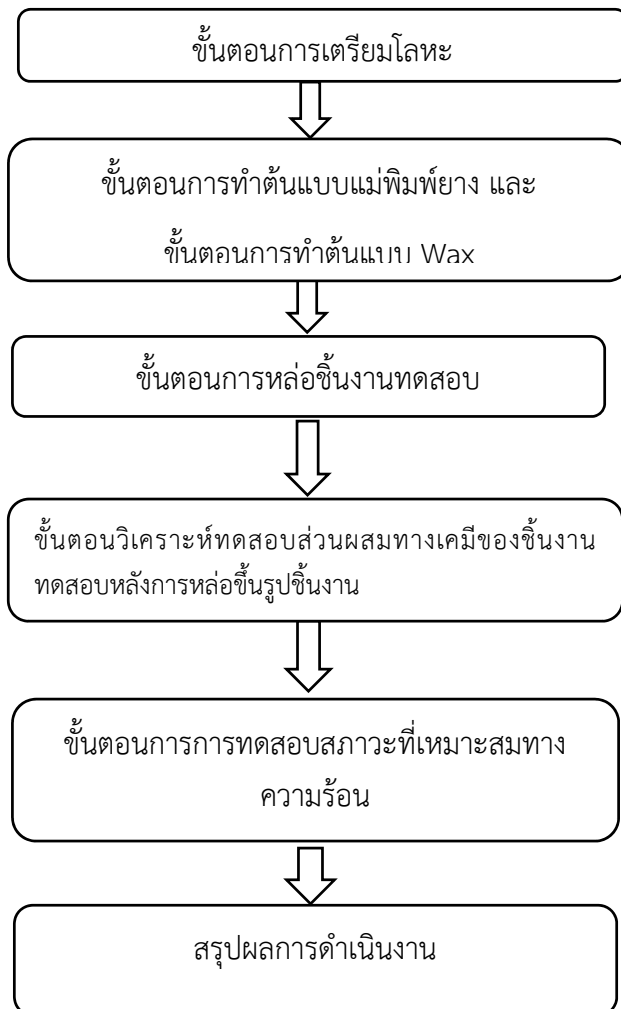
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการสืบค้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนวัตกรรมย้อนรอยแห่งการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตทองขาวเจือดำ 8k เพื่อนำมาผลิตเครื่องประดับให้มีประสิทธิภาพอีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเครื่องประดับ โดยการสร้างแผนการปฏิบัติงานนี้เพื่อเสนอแนะและเป็นแนวทางการปฏิบัติงานที่เหมาะสม

3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานศึกษาพัฒนาส่วนผสมโลหะทองขาวเจือดำ 8k สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับได้กำหนดแผนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์โดยมีแผนภาพการทำงานตามที่กำหนด



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน

3.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะ

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

3.2.1 ทอง

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



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะโลหะทองคำที่ใช้การทดลอง

โดยโลหะทองที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นโลหะทองความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือแสดงดัง รูปที่ 3.2

3.2.2 เงิน

โลหะเงินเป็นธาตุโลหะที่หายากและมีราคาแพง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่าเช่นเดียวกับทองคำ ธาตุโลหะเงินมีสัญลักษณ์ทางเคมี Ag และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face

Center Cubic) โลหะเงินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ในรูปแบบเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือ แสดงดัง รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโลหะเงินที่ใช้ในการทดลอง

โดยโลหะเงินที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเป็นโลหะเงินความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กเพื่อง่ายแก่การเจือ

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 เงินบริสุทธิ์ สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19% อลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า อลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้เนื้ออลลอยนิ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 9% จะทำให้เกิด Cu_4Sn ซึ่งจะทำให้เปราะ และในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น SnO_2 การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ลดขนาดของส่วนเจือนี้เพื่อความสะดวกโดยการเจาะเอาครีบริบหรือซีเจาะให้เป็นแผ่นสะดวกแก่การใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะดีบุกที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6 การออกแบบการทดลองเจือธาตุในอัตราส่วนต่างๆ

การดำเนินการหลอมโลหะที่อัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อศึกษาวิเคราะห์และตรวจสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบปริมาณ ส่วนผสมทางเคมี XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) และวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือดำ 8k เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบดังกล่าวที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

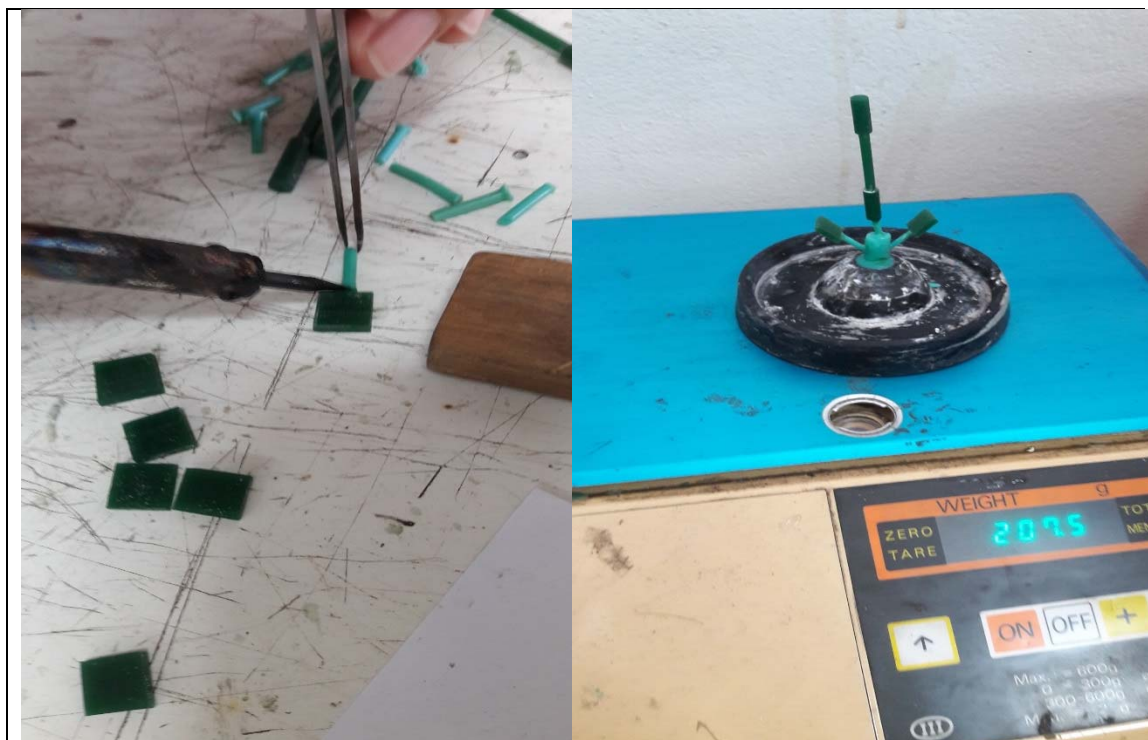
อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง				
	Au	Ag	Cu	Zn	Sn
33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn	33.33	50.67	10	5	1
33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn	33.33	50.67	8	7	1
33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn	33.33	50.67	8	8	0



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 โดยช่องว่างดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานที่ต้องการหลังจากเทน้ำโลหะลงในช่องว่างแล้วก็จะปล่อยให้โลหะเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวได้ชิ้นงานหล่อออกมามีลักษณะใกล้เคียงชิ้นงานจริง ในการหล่อแท่งทดสอบจะมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการเทปูน

การเทปูนคือ การผสมปูนกับน้ำตามสัดส่วนหลังจากติดต้นเทียนเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำต้นเทียนใส่ฐานยาง และเทน้ำปูนที่ผสมเสร็จตามสูตรของปูนที่นำมาเพื่อการทดลองเทลงกระบอกปูนที่มีต้นเทียนในนั้นการเทปูนเพื่อเตรียมสร้างโพรงแบบก่อนกำจัดต้นแบบเทียนและส่วนของเทียนทั้งหมดออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อ ทำให้แม่พิมพ์ปูนเกิดเป็นโพรงต้นแบบขึ้นด้านใน พร้อมกับทางเดินน้ำโลหะ(ดังรูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 แสดงการเทปูนลงในแบบพิมพ์

3.4.2 การอบปูน

ในการอบปูนนั้นจะนำเข้าที่เทปูนเสร็จแล้วเข้าเครื่องอบปูน ความร้อนในเตาอบจะช่วยในการกำจัดต้นแบบเทียนช่วงเวลาอบไล่เทียนใช้เวลา 3 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส และช่วยปรับอุณหภูมิของกระบอกหล่อให้มีความเหมาะสมกับอุณหภูมิในการหล่อในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการอบเบ้างานหล่อที่ 720 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 แสดงการอบปูน

3.4.3 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงาน

กระบวนการหล่อเป็นแนวทางการขึ้นรูปโลหะเพื่อการสร้างชิ้นทดสอบเพื่อการทดลองซึ่งผู้วิจัยเลือกการหล่อด้วยระบบแบบหล่อเหวี่ยง (ดังรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ

3.4.4 ขั้นตอนการล้างเข้าโลหะหลังการหล่อ

การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ ควรพักกระบอกปูนหลังการหล่อไว้ 5-10 นาทีเพื่อให้ น้ำโลหะเกิดการเซตตัวหรือที่เรียกว่าการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งจากนั้นทำการล้างเข้าด้วยน้ำเย็น เพื่อให้ปูนหลุดออกม่ง่าย เมื่อชิ้นงานออกมาจากกระบอกโลหะแล้วให้ทำสะอาดชิ้นงานให้สะอาด (ดังรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 การล้างกระบอกโลหะหลังการหล่อ

3.4.5 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานและขัดแต่งชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการตัดแต่งเอาเฉพาะงานชิ้นทดสอบหล่อออกจากส่วนที่เป็นกึ่งก้านรูเทรูล์นออก (ดังรูปที่ 3.13) และรวมไปถึงขั้นตอนการตะไบแต่งผิวส่วนที่ไม่เรียบออกไป ชิ้นงานหล่อเพื่อชิ้นทดสอบจะถูกตัดโดยใช้เครื่องมือตัด เพื่อแยกชิ้นงานออกจากต้นไม้หรือฐานของมันและพร้อมเพื่อการทดสอบด้านต่างๆ



รูปที่ 3.13 ภาพชิ้นงานทดสอบหลังการหล่อขึ้นรูป

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

จากเม็ดอัลลอยที่มีความแตกต่างกัน ศึกษาและดำเนินการวิจัยส่วนผสมธาตุเจือของทองขาวเจือต่ำ 8k ธาตุทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) โดยจากการหลอมผสมโลหะให้ได้ ส่วนผสมตามอัตราส่วน และทำการหล่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบทองขาวเจือต่ำ 8k จากนั้นนำไปทำการ วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณ ธาตุที่อัตราต่างๆ เป็นวิธีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ที่มีความรวดเร็ว สะดวกในการตรวจสอบ และ มีความแม่นยำสูงของห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับ แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อาคารไอทีเอฟ ทาวเวอร์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบส่วนผสมของปริมาณธาตุต่างๆ

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

3.6 การทดสอบสถานะที่เหมาะสมทางความร้อน

การทดสอบสถานะที่เหมาะสมทางความร้อนของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ขึ้นงานทดสอบเพื่อต้องการตรวจวัดค่าความร้อนของการหลอมละลายโดยนำส่วนที่ตัดออกของทุกสูตรการเจือนำมาให้ความร้อนด้วยการเผาด้วยแก๊สจนถึงสภาวะการหลอมละลายจากของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและค่าความร้อนของโลหะทองขาวเจือดำ 8k ทุกสูตรส่วนผสมการเจือทำซ้ำเพื่อสอบความเชื่อมั่น

3.6.1 สูตรการเจือที่ 1 มีสัดส่วน ดังนี้ $33.33\%Au+50.67\%Ag+10\%Cu+5\%Zn+1\%Sn$ นำมาให้ความร้อนด้วยการเผาด้วยแก๊สจนถึงสภาวะการหลอมละลายจากของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและวัดค่าความร้อนของโลหะทองขาวผสมธาตุเจือ แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 1

3.6.2 สูตรการเจือที่ 2 มีสัดส่วน ดังนี้ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ มาให้ความร้อนด้วยการเผาด้วยแก๊สจนถึงสภาวะการหลอมละลายจากของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและวัดค่าความร้อนของโลหะทองขาวผสมธาตุเจือ แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 2

3.6.3 สูตรการเจือที่ 3 มีสัดส่วน ดังนี้ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+8\%Zn+0\%Sn$ นำมาให้ความร้อนด้วยการเผาด้วยแก๊สจนถึงสภาวะการหลอมละลายจากของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและวัดค่าความร้อนของโลหะทองขาวผสมธาตุเจือ แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การวัดค่าความร้อนของสูตรการเจือที่ 3

3.7 สรุป

จากการดำเนินการกระบวนการผลิตชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสมของธาตุเจือในปริมาณต่างๆ เพื่อการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมทางความร้อนของโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k เพื่อการศึกษาและวิเคราะห์ อันเป็นปัจจัยหลักของการทดสอบด้านอิทธิพลของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k โดยการทดลองครั้งนี้ได้นำผลการทดสอบเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผลในบทต่อไป

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการศึกษาในบทนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาพัฒนาส่วนผสมของธาตุเจือที่เหมาะสมของโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k โดยทำการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลปริมาณของธาตุเจือเงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก ที่มีผลต่อสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k ซึ่งนอกจากนี้ผลของการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 20 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขาใหม่ของประเทศ

4.1 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของส่วนผสมโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k โดยการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองการผสมของปริมาณธาตุที่อัตราต่างๆ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1-4.2 และชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนทั้ง 3 ชนิดพบว่า 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

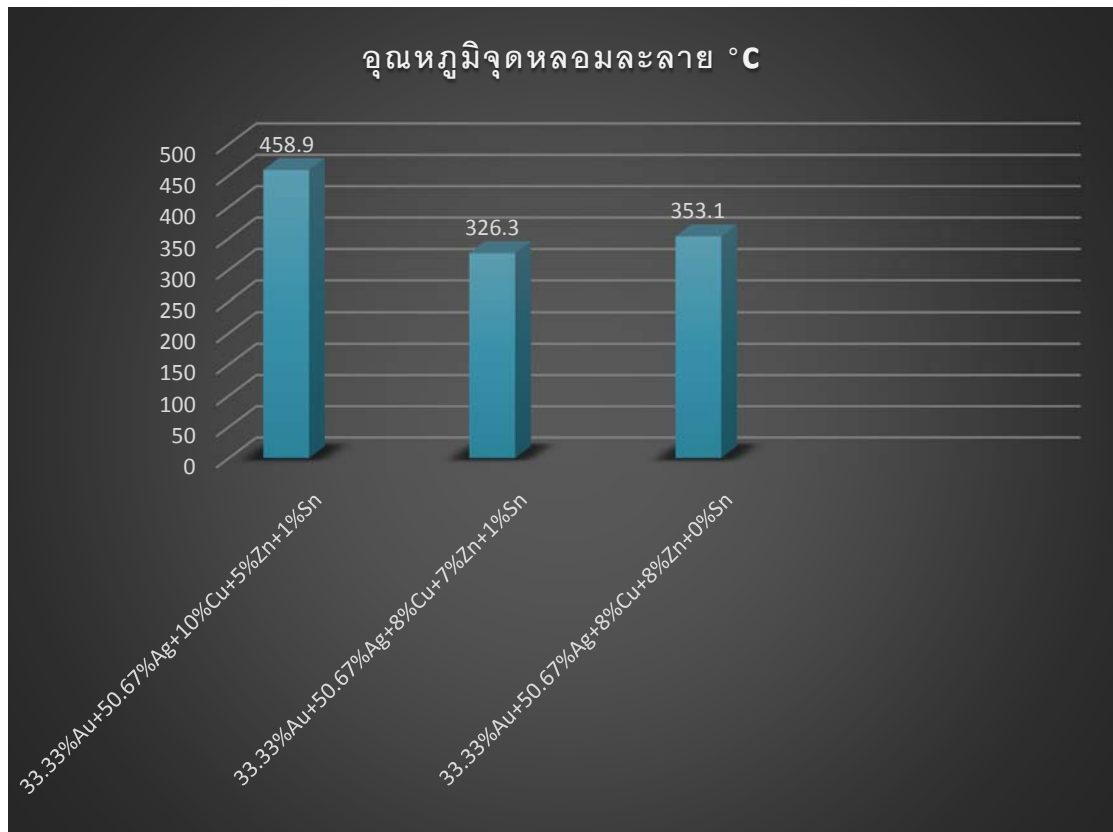
อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง				
	Au	Ag	Cu	Zn	Sn
33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn	33.74	51.70	10.32	3.20	1.04
33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn	33.78	52.75	8.88	2.67	0.92
33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn	35.34	52.34	8.89	3.43	0

หมายเหตุ ใบรายงานผลการวิเคราะห์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (GIT) ดังแสดงในภาคผนวก

4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนจากชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความวามร้อน

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือดำ 8k ในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการอ่านค่าความร้อนเมื่อเริ่มต้นให้จนถึงมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงทางสถานะโครงสร้างผลึกของทองขาวเจือดำ 8k แต่ละสูตรและผ่านการจัดบันทึกในบทที่ผ่านมา แสดงรายละเอียดคือสูตรการเจือที่ 1 เจือที่ 33.33%Au+50.67%Ag+10%Cu+5%Zn+1%Sn จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 458.9 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะสูงที่สุด สูตรการเจือที่ 2 เจือที่ 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+7%Zn+1%Sn จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 326.3 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำที่สุด สูตรการเจือที่ 3 เจือที่ 33.33%Au+50.67%Ag+8%Cu+8%Zn+0%Sn จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 353.1 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะที่สูงขึ้นมาเล็กน้อย ทั้งนี้การที่อัตราส่วนผสมมีปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกันก่อให้เกิดอิทธิพลคุณสมบัติของธาตุแต่ละชนิดไม่เหมือนกันจึงทำให้มีค่าความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะ ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิจุดหลอมละลายของโลหะทองขาวเจือตำ 8k ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าความวามร้อน

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือตำ 8k ในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการอ่านค่าความร้อนเมื่อเริ่มต้นให้จนถึงมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงทางสถานะโครงสร้างผลึกเมื่อทองขาวเจือตำ 8k โดยธาตุสังกะสี (Zn) อาจเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันตรงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นสูงสุดในลำดับการเจือสุดท้ายดังสูตรการเจือที่ 2 ปริมาณที่ 7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาตามหลักการทางความร้อนของธาตุเจือดังกล่าวตามจุดมุ่งหมายแห่งการทดลองครั้งนี้การเจือเพื่อปรับคุณสมบัติเป็นไปตามเป้าประสงค์ การทดลองในครั้งนี้นี้ยังเห็นอีกได้ว่าการเจือธาตุสังกะสีเพียงต่างกัน 1-2 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของทองขาวเจือตำ 8k ที่มีสูตรการผสมของธาตุ ทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) ได้

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 โดยใช้วิธีการหลอมโลหะผสมเป็นขั้น ทดสอบด้วยเครื่องหล่อแบบเหวี่ยง ในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการอ่านค่าความร้อนเมื่อเริ่มต้นให้จนถึงมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงทางสถานะโครงสร้างผลึกของทองขาวเจือดำ 8k ในแต่ละสูตรการผสมธาตุเจือ และผ่านการจดบันทึกและวิเคราะห์ในบทที่ผ่านมา อิทธิพลของธาตุเจือที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ทำการผสมจริงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของน้ำประสานทองมีปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังกระบวนการหลอม

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ พบว่าค่าความร้อน สูตรการเจือที่ 1 ปริมาณการเจือที่ $33.33\%Au+50.67\%Ag+10\%Cu+5\%Zn+1\%Sn$ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 458.9 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะ สูงที่สุด สูตรการเจือที่ 2 ปริมาณการเจือที่ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 326.3 องศาเซลเซียส จึงเห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ต่ำสุด และใน ส่วน ของสูตรการเจือที่ 3 ปริมาณ ของการเจือที่ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+8\%Zn+0\%Sn$ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 353.1 องศา

เซลเซียส เห็นได้ว่าเป็นค่าทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะที่สูงขึ้นมาเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าได้ว่าสูตรการเจือที่ 2 ปริมาณการเจือที่ $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความร้อนจากจุดเริ่มต้นถึงระดับความเปลี่ยนแปลงสถานะก่อนกลายเป็นของเหลวใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 326.3 องศาเซลเซียส เป็นผลทดสอบทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำและดีที่สุด โดยทั้งสามสูตรการเจือสามารถวิเคราะห์ และสรุปผลโดยผ่านการทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) ก่อนนำมาทดลองด้วยการให้ความร้อน

5.1.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k ในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการอ่านค่าความร้อนเมื่อเริ่มต้นให้จนถึงมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงทางสถานะโครงสร้างผลึกของทองขาวเจือต่ำ 8k โดยธาตุสังกะสี (Zn) อาจเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันตรงจากสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นสูงสุดในลำดับการเจือสุดท้าย ดังสูตรการเจือที่ 2 ปริมาณที่ 7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาตามหลักการทางความร้อนของธาตุเจือดังกล่าวตามจุดมุ่งหมายแห่งการทดลองครั้งนี้เจือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเป็นไปตามเป้าประสงค์ การทดลองในครั้งนี้ยังเห็นอีกได้ว่าการเจือธาตุ สังกะสีเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของทองโลหะทองขาวเจือต่ำ 8k ที่มีสูตรการผสมของธาตุ ทอง(Au) เงิน(Ag) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) และดีบุก(Sn) ได้ ปัจจัยที่สองและสามของปริมาณธาตุเจือที่ต่างกันและอาจมีผลรวมคือ เงิน(Ag) และทองแดง(Cu) แต่อาจส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความต่างกันของอุณหภูมิของการเกิดหลอมละลาย

5.1.4 การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยพบว่าทั้งสามสูตรการเจือผลทางความร้อนก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวนั้นสามารถนำไปขึ้นตัวเรือนเครื่องประดับได้เป็นอย่างดี หลอมละลายง่ายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 458.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้นต่ำสุดอยู่ที่ 326.3 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความต่างการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของธาตุที่นำมาทดลอง จากการผ่านการวิเคราะห์ และสรุปผลเห็นได้ว่าสูตรเจือที่ 2 $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+7\%Zn+1\%Sn$ เป็น สูตรการเจือซึ่งให้ค่าความร้อนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวต่ำที่สุดค่าเฉลี่ยที่ 326.3 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่ดีที่สุดของการทดลองนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะในส่วนของสูตรที่ 2 $33.33\%Au+50.67\%Ag+8\%Cu+1\%Zn+1\%Sn$ เป็นสูตรซึ่งให้ค่าความร้อนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวต่ำที่สุดค่าเฉลี่ยที่ 326.3 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการใช้ในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับอันเนื่องมาจากสามารถหลอมละลายเพื่อการหล่อขึ้นรูป การหลอมละลายเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร และขึ้นรูปด้วยมือ

5.2.1 ข้อเสนอแนะในส่วนของการพัฒนาทางด้านกระบวนการการหล่อขึ้นรูปงานเครื่องประดับของทองขาวเจือดำ 8k ตามสูตรการเจือที่มีส่วนผสมทอง เงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก โดยเริ่มศึกษาการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวจุดเดือดถึงระดับการระเหิดทั้งนั้นเพื่อถ่ายเทการออกแบบการหล่อรวมถึงอุณหภูมิการอบเข้ก่อนการหล่อขึ้นรูปทองขาวเจือดำ 8k ตามธาตุที่มีส่วนเจือดังกล่าว

บรรณานุกรม

1. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,การใช้งานทองและทองผสม, การสัมมนาโครงการวิจัย คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ, 2541,76 หน้า
2. สมนึก วัฒนศรีกุล. การทดสอบวัสดุ (Material Testing). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549. หน้า 13-19
3. A.S. McDonal, and G.H.Sistare. The Metallurgy of Some Carat Gold Jewelry Alloys. Gold Bulletin Volume 11 No.3 1978: 66-73 pp.
4. Katsuhiko Yasuda. Age Hardening and Relate Phase Trans for major in Dental Gold Alloys. Gold Bulletin.20 1982 : 90-103 pp.
5. Dieter Ott. Optimizing Gold Alloys For The Manufacturing Process. Gold Technology, Issue No.34, World Gold Council, 2002, 37-44 pp.
6. Medeleinc du Toit, Elma van der Lingen, Lizelle Glaner, Rainer Suss. The Development of a Novel Gold Alloy with 995 Fineness and Increased Hardness Gold Bulletin. Volume 35 Noi.2 2002 : 46-52 pp.
7. Ing. F.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.
8. Dave Sehneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
9. Cristopher W. Corti. Assaying of Gold Jewelry-Choice of Technique. Gold Technology, Issue No. 32, World Gold Council, 2001, 20-30 pp.
10. Gold Technology, Issue No.1 : Gold Alloy Data, World Gold Council,1990,6-17 pp.

ภาคผนวก

ใบรายงานผลการวิเคราะห์ XRF (X-ray Fluorescence Spectrometers) จากสถาบันวิจัยและ
พัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)

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

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายกรีธา สิงห์สมบุญ

(ภาษาอังกฤษ) Mr.Greta Singsomboon

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 8099 00305 28 8

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. สถานที่ทำงาน

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

โทรศัพท์/โทรสาร: 0-2836-3000 ต่อ 4231

โทรศัพท์มือถือ: 08-5916-4072

[E-mail : greta2512@hotmail.com](mailto:greta2512@hotmail.com)

5. ประวัติการศึกษา

วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2544

วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2554

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา

การลดของเสียในงานอุตสาหกรรม, การลดความสูญเสียเปล่าในโรงงาน, การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต, การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ และแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุ

สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัย
ในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : -

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : -

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด