

รายงานฉบับสมบูรณ์
โครงการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้
ประกอบอัญมณี

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ
อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสนอ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
สำนักนายกรัฐมนตรี

29 ตุลาคม 2542

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณี

รายงานฉบับสมบูรณ์นี้ จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอข้อมูลต่าง ๆ ในด้านโลหวิทยาของโลหะทองที่ใช้เป็นตัวเรือนประกอบอัญมณีทั้งหมด ที่ได้จากการค้นคว้า และวิจัย ในโครงการการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณี ตั้งแต่ได้เริ่มโครงการโดยมีระยะเวลาทั้งสิ้น 2 ปี ในเบื้องต้นคณะผู้วิจัยได้รับงบประมาณสำหรับการวิจัยเป็นรายปี ในปีแรกของโครงการได้อนุมัติให้ทำการวิจัยเมื่อ เมษายน 2540 ถึง 31 มีนาคม 2541 และในปีที่สองได้รับการอนุมัติเมื่อ 1 กันยายน 2541 ถึง 31 สิงหาคม 2542 คณะผู้วิจัยได้นำเสนอและส่งรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 ฉบับที่ 2 และรายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ 1 (ระยะที่ 2) ให้กับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เมื่อ 1 ตุลาคม 2540 20 พฤษภาคม 2541 และ 26 เมษายน 2542 ตามลำดับ

ในรายงานฉบับนี้ คณะผู้วิจัยได้บรรจุเนื้อหาโดยแยกออกเป็น 8 บท ซึ่งจะบรรจุเนื้อหาเกี่ยวกับตัวโครงการวิจัยนี้ และผลที่ได้จากการวิจัยในแต่ละหัวข้อ ในบทที่ 1 และ 2 จะบรรจุเนื้อหา ทั้งความเป็นมาของโครงการ วัตถุประสงค์ การดำเนินงานวิจัยและกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งด้านการวิจัย การค้นคว้า และการเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการในวาระต่าง ๆ อาทิเช่น การจัดสัมมนา การอบรม ฯลฯ ตั้งแต่เริ่มโครงการจนกระทั่งโครงการสิ้นสุด ในบทที่ 3-7 จะนำเสนอ ข้อมูลการค้นคว้า ขั้นตอนการวิจัย ผลงานวิจัยที่ได้จากการศึกษาและวิจัยในโครงการย่อย ทั้ง 4 โครงการ โครงการดังกล่าวที่ได้ทำเสร็จสิ้นแล้ว คือ โครงการการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโลหะทองผสมทองแดง 18 กะรัต และการศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะตัวประสานที่ผสมสังกะสี โครงการการอบเป็นเนื้อเดียวของทอง 14 กะรัต ตลอดจนได้นำเสนองานวิจัยที่น่าสนใจและควรทำต่อไปอีกในอนาคต ในส่วนของข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ อีกจำนวนมาก ที่ได้เก็บรวบรวม และได้จัดทำไว้ในรายงานความก้าวหน้า (ระยะ 1) ฉบับ 1, 2 และรายงานความก้าวหน้า (ระยะ 2) ฉบับที่ 1 คณะผู้จัดทำรายงานฉบับนี้ ขอแนะนำ เฉพาะสาระที่สำคัญ และน่าสนใจเท่านั้นมาบรรจุไว้ในรายงานฉบับนี้ เพื่อความกระชับและความเหมาะสม อย่างไรก็ตามรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาที่ได้บรรจุอยู่ในรายงานความก้าวหน้า คณะผู้จัดทำได้ระบุและทำการอ้างอิงไว้สำหรับผู้สนใจสามารถสืบค้นรายละเอียดได้ อันจะเป็นประโยชน์กับผู้อ่านต่อไป

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้จัดทำรายงานการเงินฉบับสมบูรณ์ ซึ่งแสดงถึงยอดการใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วง 6 เดือนสุดท้ายของโครงการและได้สรุปการใช้จ่ายต่าง ๆ ทั้งหมดในโครงการ

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยหวังว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลความรู้ต่าง ๆ ที่มีคุณค่าต่อการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคตและมีประโยชน์แก่ช่างทองและผู้ประกอบการเครื่องประดับอัญมณี ตลอดจนผู้สนใจโลหะวิทยาและการหล่อทองและทองผสม



(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ)

หัวหน้าโครงการ

บทคัดย่อ

การศึกษาส่วนผสมทางเคมีและเทคนิคการผลิตของโลหะทองที่ใช้เป็นตัวเรือนประกอบเครื่องประดับอัญมณี ได้ถูกนำมาศึกษา โดยเน้น การอบเป็นเนื้อเดียวในเส้นลวดทองคำ 14 กะรัต พฤติกรรมความแข็งของโลหะทองคำ 18 กะรัตที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูป และความสามารถในการเปียกของโลหะประสานทองที่มีสังกะสีผสม

จากการศึกษาในโลหะทอง 14 กะรัต (59.1%Au-14.5%Ag-26.4%Cu) พบว่า การอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 4 ชม. แล้วจุ่มน้ำเย็น 0 °C ทันที สามารถได้โครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อเดียว และส่งผลให้ความแข็งแรงของโลหะลดลง และมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน นอกจากนี้การบ่มเพิ่มความแข็งแรง ที่อุณหภูมิ 350 °C นาน 60 นาที ในชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

ค่าความแข็งแรงของทองคำผสม 18 กะรัต ที่ผสมทองแดง 5-15% และผ่านการรีดลดขนาด 0-90% มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการลดขนาดและปริมาณทองแดงในเนื้อโลหะ การอบอ่อนในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป 90% มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงมาใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงในสภาพหล่อ และเฟสที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปสารละลายของแข็ง เฟสเดียว ประเภทไม่เป็นระเบียบ การบ่มเพิ่มความแข็งแรงในทองผสม 18 กะรัต ณ อุณหภูมิ 270 °C นาน 80-100 นาที เป็นสภาวะที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด

ในการศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะประสานทอง 14 กะรัต ที่มีอัตราส่วนเงินต่อทองแดงที่ประมาณ 1:1 และเติมสังกะสีอยู่ในช่วง 1-10% พบว่า เมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเปียกสูงขึ้น เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสและช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวลดลง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสี ปริมาณสังกะสีที่เหมาะสมสำหรับโลหะประสานทองเกรด 14 กะรัต อยู่ที่ประมาณ 3%

Abstract

The chemical composition and technique of gold alloys using in jewelry industry has been investigated by emphasizing the effect of homogenization in 14 K gold wire, the relationships between the heat treatment, cold working and hardness property in 18 K gold alloy, and the wettability of 14 K gold solder with zinc additive.

In 14 K gold alloy (59.1%Au-14.5%Ag-26.4%Cu) it was found that the homogenized microstructure could be obtained using the homogenization condition with the temperature of 800 °C for 4 hrs and subsequently quenched immediately in water (0 °C). Thus this led to decreasing in hardness value and produced the hardness uniformly throughout the cross section area of specimens. In addition, in the specimens with and without homogenization, the aging process, at temperature of 350 °C for 1 hr, didn't affect to the hardness.

In 18 K gold alloys, varying the copper content from 5-15% and the reduction area using roller of 0-90%, the hardness increased with the percentage of reduction area and copper content in alloys. Annealing the specimen after cold working with 90% reduction produced the lower hardness as same as the hardness value in as-cast specimen. Furthermore the microstructure showed that the disordered single phase solid solution has been occurred. Subsequent aging with the temperature of 270 °C for 80-100 min. produced the peak aged condition with providing the maximum hardness.

In the investigation of the wettability of 14 K solder with the ratio between silver and copper of about 1:1 and the zinc content in the range of 1-10% it was found that increasing the zinc content produced the higher wettability of the solder alloy due to the lower contact angle and the lower solidification range. However the hardness decreased with zinc content. The zinc content suitable for the 14 k soldering alloy was approximately at 3% by weight.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณีนี้สามารถทำสำเร็จล่วงหน้าได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ และให้แนวทางและการสนับสนุนจากบุคคล และองค์กรที่เกี่ยวข้องตามที่ได้ระบุไว้ในกิตติกรรมประกาศนี้ โดยให้ความช่วยเหลือ ทั้งในแนวทางการวิจัยบางขั้นตอน และให้ข้อมูลต่าง ๆ ทั้งทางด้านความรู้เกี่ยวกับโลหวิทยา และเทคนิคการผลิต

แรกสุดคณะผู้จัดทำปรารถนาที่จะขอขอบคุณ คุณพิเชษฐ พะลานุกูล ที่มีส่วนช่วยเหลืออย่างยิ่งทั้งในการให้ข้อมูลและหัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจต่าง ๆ และยังช่วยดำเนินการผลิตโลหะทองคำผสมกะรัตต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการทำคู่มือ Atlas Microstructure และขอขอบคุณพนักงานของบริษัท บิวตี้เจมส์ แฟคตอรี ผู้เกี่ยวข้องช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ การประสานงานที่ดีอย่างยิ่ง และทำการผลิตโลหะให้กับคณะผู้วิจัยนี้

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานกฤษฎมนตรี ที่ให้การสนับสนุน ทุนวิจัย และครุภัณฑ์ในโครงการวิจัยนี้ ตลอดจนทุนดูงานที่มหาวิทยาลัย VICENZAOROI ให้กับอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และบุคคลที่คณะผู้วิจัยปรารถนาที่จะขอขอบคุณอย่างยิ่งแก่ รศ.ดร. ทวีป ศิริรัมย์ ที่ช่วยประสานงานโครงการได้อย่างดีและรวดเร็วเป็นอย่างยิ่ง และให้คำแนะนำในด้านการจัดการทั้งงานวิจัยและงานการเงินและการบัญชี ได้อย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ คุณ สมศักดิ์ ตันฑชน เจ้าของห้างทอง JIA JIN CHIENG ที่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ในการผลิตทองที่ทำในกลุ่ม SME ซึ่งทำให้คณะผู้วิจัยรู้ถึงกระบวนการผลิตในกลุ่มผู้ผลิตรายย่อยและระดับกลาง นอกจากนี้ขอขอบคุณในการให้ความช่วยเหลือในด้านสนับสนุนการดูงานมหาวิทยาลัย VICENZAORO I อีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณ รุ่งวิทย์ เต็มพิทยาเวช กรรมการผู้จัดการ บริษัทโกลด์มูน จำกัด ที่สนับสนุนโครงการโดยการบริจาคเตาหลอมโลหะระบบอินดักชั่น ขนาด 10 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เตา เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ สมาพันธ์ผู้ผลิตทองคำแห่งโลก ประจำประเทศไทย (World gold council) ที่ให้ข้อมูลด้านงานวิชาการและการวิจัย ของโลหะทองและโลหะมีค่าอื่น ๆ ซึ่งทำให้คณะผู้วิจัยสามารถสืบค้นข้อมูลโลหวิทยาของทองและเทคนิคการผลิต ต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้อง

ท้ายสุดนี้คณะผู้จัดทำ ขอใช้โอกาสนี้ขอบคุณอย่างสูงแก่ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการจัดตั้งห้องปฏิบัติการวิจัยและ สนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัย ต่าง ๆ และขอขอบคุณนิสิตปริญญาโททุกท่านในโครงการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ ผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือและผลักดันให้งานวิจัยของโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1. บทนำ.....	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1-1
1.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะประกอบอัญมณี.....	1-1
1.3 คณะผู้วิจัยในโครงการ.....	1-3
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1-3
1.5 ขอบเขตของโครงการ.....	1-3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	1-4
บทที่ 2. การดำเนินงานวิจัยและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	2-1
2.1 แผนงานการดำเนินงานวิจัย.....	2-1
2.2 กิจกรรมทางวิชาการอื่น ๆ.....	2-3
2.2.1 การอบรมสัมมนาและเผยแพร่.....	2-3
2.2.2 การจัดทำ เอกสารประกอบการสัมมนา การบรรยายและเอกสารเผยแพร่.....	2-4
2.2.2.1 เอกสารประกอบการสัมมนา และการบรรยาย.....	2-4
2.2.2.2 เอกสารเผยแพร่.....	2-4
2.2.3 คู่มือโลหวิทยา และ Atlas microstructure.....	2-5
2.3 คุรุภัณฑ์สำหรับงานวิจัยในโครงการนี้.....	2-5
2.4 การเยี่ยมชมโรงงาน.....	2-6
2.5 การจัดงานมหกรรม VICENZAORO I ที่ประเทศอิตาลี.....	2-7

บทที่ 3. โลหะทอง ทองผสม และการศึกษาส่วนผสมทางเคมี	3-1
3.1 การใช้งานโลหะทองและทองผสม	3-1
3.2 โลหะทองและทองผสม	3-2
3.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์	3-4
3.3.1 โครงสร้างผลึกของโลหะทอง (Crystal structure of gold)	3-5
3.3.2 จุดหลอมเหลวของทองคำบริสุทธิ์	3-5
3.3.3 ค่าความร้อนจำเพาะ	3-5
3.3.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ในการผลิตโลหะทองคำบริสุทธิ์	3-6
3.3.5 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability)	3-6
3.4 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ	3-6
3.5 สีของโลหะ ทองบริสุทธิ์ และทองผสม	3-8
3.6 อิทธิพลของธาตุผสม (Effects of alloying elements)	3-10
3.6.1 ธาตุผสมที่มีผลต่อการปรับขนาดเกรน (Grain refiners)	3-13
3.6.2 ธาตุผสมที่มีผลต่อการหล่อโลหะทองผสม (Additions in casting alloys)	3-14
3.6.3 อิทธิพลของสารเจือปน (Impurities)	3-15
3.7 การควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นจากการหล่อ	3-16
3.7.1 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อวัสดุ (Inclusions)	3-17
3.7.2 ของเสียที่สืบเนื่องจากการหล่อแบบแทนซีผั่ง (Investment casting)	3-18
3.8 การศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาใช้ เป็น Master alloy	3-25

บทที่ 4. การศึกษาอิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อการผลิตเส้นลวดทองคำ 14 กระรัต	4-1
4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการอบเป็นเนื้อเดียว (Homogenization)	4-1
4.1.1 การเกิดผลึกของโลหะผสมในสภาวะไม่สมดุล	4-1
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในโลหะผสมเมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียว.....	4-3
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างครั้งที่สอง	4-3
4.1.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะผสมเมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียว	4-4
4.2 ระเบียบและวิธีในการทำวิจัย.....	4-5
4.2.1 วัตถุประสงค์.....	4-5
4.2.2 วิธีดำเนินการทดลองและขั้นตอนการทดลอง.....	4-5
4.2.3 ระเบียบ และวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล	4-10
4.2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	4-12
4.3 รายงานผลการทดลองและอภิปรายผล.....	4-13
4.3.1 อิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อทองคำกระรัต	4-13
4.3.2 อิทธิพลของการรีดต่อชิ้นงานที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว.....	4-23
4.3.3 อิทธิพลของการอบอ่อนต่อชิ้นงานรีดที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว.....	4-27
4.3.4 ผลของการอบเพิ่มความแข็งแรงต่อชิ้นงานที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว	4-29
4.4 สรุปผลการวิจัยในหัวข้ออิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียว.....	4-33
บทที่ 5. พฤติกรรมความแข็งแรงของโลหะทองคำ 18 กระรัต ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูป	5-1
5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5-2
5.2 ขอบเขตการวิจัย	5-2

5.3 การปรับโครงสร้าง.....	5-2
5.3.1 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมทองคำ (Phase Equilibrium Diagram).....	5-3
5.3.2 โครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Ordered structure)	5-8
5.3.3 การบ่ม เพิ่มความแข็ง (Age Hardening or Aging).....	5-23
5.4 ขั้นตอนการทดลอง	5-25
5.4.1 การขึ้นรูปเย็น.....	5-25
5.4.2 การทำ annealing.....	5-26
5.4.3 การบ่ม (Aging)	5-26
5.5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	5-26
5.5.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของ การขึ้นรูปเย็น (Cold Work)	5-26
5.5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อน (Annealing).....	5-29
5.5.2.1 ผลการทดลอง	5-29
5.5.2.2 อภิปรายผลการทดลอง	5-30
5.5.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเพิ่มความแข็งในโลหะผสมทองคำ.....	5-33
5.5.3.1 ผลการทดลอง	5-33
5.5.3.2 อภิปรายผลการทดลอง	5-44
เอกสารอ้างอิง	5-46
บทที่ 6. ศึกษาความสามารถในการเปื่อยของโลหะตัวประสานที่ผสมสังกะสี	6-1
6.1 วัตถุประสงค์.....	6-1
6.2 ขอบเขตการศึกษา	6-1

6.3 ข้อมูลเบื้องต้น	6-2
6.4 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	6-8
6.4.1 การวัดความสามารถในการเปียก.....	6-10
6.4.1.1 มุมสัมผัส(Contact angle) และ แรงตึงผิว(surface tension)	6-10
6.4.1.2 The sessile drop method	6-12
6.5 ส่วนผสมทางเคมีต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม	6-16
6.6 ขั้นตอนการทดลอง	6-17
6.6.1 เครื่องมือที่ใช้	6-17
6.6.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	6-17
6.6.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	6-19
6.7 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	6-19
6.7.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ได้จากการเตรียม.....	6-19
6.7.1.1 ส่วนผสมทางเคมีของมาสเตอร์อัลลอยด์ที่ได้ (master alloy)	6-19
6.7.1.2 การเตรียมโลหะประสานทอง 14 กระรัต จากมาสเตอร์อัลลอยด์ MA301	6-20
6.7.2 ผลการทดสอบ Sessile drop.....	6-22
6.7.2.1 ผลการทดลอง กับ โลหะอะลูมิเนียม และ เงินบริสุทธิ์	6-22
6.7.2.2 การทดสอบ Sessile drop ในทอง 14 กระรัต	6-25
6.7.3 คุณสมบัติด้านความแข็ง.....	6-27
6.7.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสภาพของแข็งเป็นของเหลว	6-28
6.8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	6-30

บทที่ 7. อิทธิพลของขนาดและรูปร่างงานหล่อต่อการเกิดรูพรุนในการหล่อแบบ Investment Casting ของทองคำ 14 กระรัต	7-1
7.1 ความเป็นมาของการวิจัยในหัวข้อนี้	7-1
7.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7-2
7.3 ขอบเขตของการศึกษา	7-2
7.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	7-2
7.5 ข้อมูลจากการศึกษาเพิ่มเติม	7-2
7.5.1 ข้อบกพร่องในการหล่อ (Defect of casting)	7-2
7.5.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อ	7-5
7.6 ระเบียบการวิจัย และขั้นตอนการทดลอง	7-11
7.6.1 เครื่องมือที่ใช้	7-11
7.6.2 วัสดุที่ใช้	7-11
7.6.3 ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง (Master Model)	7-12
7.6.4 การทดลอง	7-13
บทที่ 8. สรุปผลการวิจัยของโครงการ	8-1

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทอง.....	3-4
ตาราง 3.2 ข้อมูลโครงสร้างผลึกและ Lattice Parameter ของทองบริสุทธิ์.....	3-5
ตาราง 3.3 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ความจุความร้อนจำเพาะของทองคำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	3-6
ตาราง 3.4 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในแบบต่าง ๆ.....	3-7
ตาราง 3.5 แสดงส่วนผสมกะรัตและสีของทองผสมที่นิยมใช้.....	3-9
ตาราง 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุผสม สีและคุณสมบัติที่เกิดขึ้นในโลหะ.....	3-10
ตาราง 3.7 แสดงถึงผลของธาตุทองแดงในปริมาณต่าง ๆ ในโลหะทอง-เงินทองแดง 18 กะรัต หลังจากผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด 15% 30% และ 60%.....	3-11
ตาราง 3.8 อิทธิพลของธาตุผสมรองและสิ่งเจือปนที่มีผลต่อโลหะทองผสม.....	3-12
ตาราง 3.9 ส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์โลหะ Master alloy.....	3-25
ตาราง 4.1 แสดงความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะในวัตถุดิบแต่ละชนิด.....	4-5
ตาราง 4.2 แสดงผลการตรวจวัดส่วนผสมทางเคมีของทองคำ 14 กะรัตที่ใช้ในการทดลอง.....	4-6
ตาราง 4.3 แสดงระยะห่างแกนเดนไดรท์ในทองคำกะรัตที่ใช้ในการทดลอง.....	4-7
ตาราง 4.4 แสดงค่าส่วนผสมทางเคมีของเดนไดรท์ และช่องระหว่างเดนไดรท์.....	4-8
ตาราง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบส่วนผสมที่ผิวชิ้นงานที่อบ และไม่อบเป็นเนื้อเดียว.....	4-19
ตาราง 4.6 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของทองคำ 14 กะรัต และ 16 กะรัตที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา.....	4-21
ตาราง 4.7 แสดงค่าส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็ง.....	4-29
ตาราง 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลกับการลดขนาดในทอง 18 กะรัต.....	5-29
ตาราง 5.2 แสดงความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งเป็นเวลา 100 นาที ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานทั้งสาม.....	5-37
ตาราง 6.1 แสดงช่วงของการหลอมเหลวของโลหะทองคำผสม กะรัตต่าง ๆ ¹	6-3
ตาราง 6.2 แสดงช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของทองคำในอัตราส่วนของเงินและทองแดงต่าง ๆ กัน ¹	6-5
ตาราง 6.3 ตัวประสานทองสีเหลือง ที่ปราศจากแคดเมียม ⁸	6-7
ตาราง 6.4 ข้อมูลทางด้านอุณหภูมิสำหรับตัวประสานทองสีเหลือง ⁸	6-7
ตาราง 6.5 แสดงค่าแรงตึงผิวของโลหะผสมทอง ⁵	6-11
ตาราง 6.6 แสดงแรงตึงผิวและมุมสัมผัส.....	6-12
ตาราง 6.7 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานสำหรับทอง 14 กะรัต.....	6-17
ตาราง 6.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของทองคำผสม 14 กะรัต ที่จะนำมาประสาน.....	6-18
ตาราง 6.9 แสดงส่วนผสมของมาสเตอร์อัลลอยด์(master alloys).....	6-18
ตาราง 6.10 แสดงส่วนผสมของมาสเตอร์อัลลอยด์.....	6-20

ตาราง 6.11 แสดงปริมาณของโลหะแต่ละชนิดที่ต้องใช้ในการหล่อตัวประสานทอง.....	6-21
ตาราง 6.12 แสดงส่วนผสมของโลหะประสานทอง.....	6-21
ตาราง 6.13 แสดงค่าแรงดึงผิวของอะลูมิเนียมและเงินที่ 1000°C.....	6-24
ตาราง 6.14 แสดงมุมสัมผัสของโลหะประสานทอง.....	6-26
ตาราง 6.15 แสดงค่าความแข็งของโลหะประสาน เมื่อเปลี่ยนปริมาณ สังกะสี.....	6-27
ตาราง 6.16 แสดงอุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัว และ อุณหภูมิหลอมเหลว ของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต.....	6-29
ตาราง 7.1 ผลของอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะต่อคุณภาพงานหล่อ.....	7-6

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 ความอุดมสมบูรณ์ของโลหะมีค่าต่าง ๆ เทียบในลักษณะสเกล Log	3-4
รูปที่ 3.2 แสดงสีต่าง ๆ ของโลหะทองผสมเกรดต่าง ๆ	3-8
รูปที่ 4.1 แสดงการแข็งตัวของโลหะที่สภาวะที่ไม่สมดุล	4-1
รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นภายใต้การแข็งตัวที่สภาวะไม่สมดุลของ	4-2
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการลดขนาด (ϕ) กับเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว (t)	4-4
รูปที่ 4.4 แสดงแท่งทองคำ 14 กระรัต ที่ได้จากการหลอมด้วยเตาเหนียวไฟฟ้า ชุดที่ 2	4-6
รูปที่ 4.5 แสดงภาพจำลองของขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองอบเป็นเนื้อเดียว	4-7
รูปที่ 4.6 แสดงเครื่องวัดลดขนาดเป็นเส้นลวดที่ใช้ในการทดลอง	4-9
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะวิธีการวัดค่าความแข็งชิ้นงานทดสอบ	4-11
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทองคำ 16 กระรัต กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30 %	4-14
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของธาตุเงินของทองคำ 16 กระรัต ในสภาพหล่อและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว ที่เวลา 40 นาที ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping)	4-15
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปที่ระยะเวลาการอบเป็นเนื้อเดียวต่าง ๆ กัน	4-16
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานในระยะต่าง ๆ ของทองคำ 14 กระรัต	4-17
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของธาตุเงินในทองคำ 14 กระรัตในสภาพหล่อและสภาพผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว ที่เวลา 240 นาที ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping)	4-18
รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนเมื่อระยะเวลาการอบเป็นเนื้อเดียว เปลี่ยนไปในทองคำ 14 กระรัต และ 16 กระรัต	4-19
รูปที่ 4.14 ผิวทอง 14 กระรัตที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%	4-20
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคทองคำ 14 กระรัต ผ่านอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C แล้ว เย็นตัวภายในเตา กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%	4-22
รูปที่ 4.16 แสดงเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทองคำที่อบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C แล้ว ปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา กัดด้วยสารละลาย $\text{KCN}+(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	4-22
รูปที่ 4.17 แสดงผิวของทองคำ 14 กระรัตที่ผ่านการรีดที่ปริมาณลดพื้นที่หน้าตัด 88%	4-23
รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการรีด 88%	4-24
รูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งทองคำ 14 กระรัตที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจากขอบถึงกึ่งกลางชิ้นงาน	4-25
รูปที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจากขอบถึงกึ่งกลางชิ้นงาน	4-25
รูปที่ 4.21 แสดงแบบจำลองโครงสร้างในวัสดุผสมเมื่อได้รับแรงภายนอก	4-26
รูปที่ 4.22 แสดงผิวที่เกิดความเสียหายจากการรีด ชิ้นงานทองคำ 16 กระรัต ที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว	4-27

ที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว.....	4-28
รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและผ่านการรีด และอบอ่อน	4-28
รูปที่ 4.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของทองคำ 14 กระรัต ในขั้นตอนการรีด	4-29
รูปที่ 4.26 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเมื่ออบเพิ่มความแข็งแรงหลังผ่านการรีดเย็นและการอบอ่อน กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%	4-30
รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของทองคำ 14 กระรัต เมื่ออบเพิ่มความแข็งแรง หลังผ่านการรีดเย็น และการอบอ่อน กัดด้วยสารละลาย $\text{KCN}+(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ เจือจาง 10%	4-31
รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว อบเพิ่มความแข็งแรง การรีดเย็น และการอบอ่อน.....	4-32
รูปที่ 5.1 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Au-Ag	5-4
รูปที่ 5.2 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Cu-Ag	5-4
รูปที่ 5.3 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Au-Cu.....	5-4
รูปที่ 5.4 แสดง Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป 3 มิติ.....	5-5
รูปที่ 5.5 Ternary Diagram แสดงเส้น Liquidus ของระบบ Au-Cu-Ag	5-5
รูปที่ 5.6 Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป Isothermal section แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็น สารละลายเฟสเดียว กับบริเวณที่มีสองเฟส ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	5-6
รูปที่ 5.7 Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป Isothermal section ที่อุณหภูมิ 300 °C แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็นสารละลายเฟสเดียว , บริเวณที่มีสองเฟส และบริเวณที่เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	5-7
รูปที่ 5.8 แสดง Phase Diagram ของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18 , 10 และ 14 กระรัต	5-7
รูปที่ 5.9 แสดง Unit cell ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ และโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu_3	5-9
รูปที่ 5.10 แสดง Unit cell ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu ชนิดต่าง ๆ.....	5-9
รูปที่ 5.11 ภาพ Schematic แสดงสารละลายของแข็ง (a) แบบเป็นระเบียบ (Ordering) (b) แบบเกาะกลุ่ม (clustering).....	5-11
รูปที่ 5.12 แสดงสารละลายแบบของแข็ง (a) แบบ random และ (b) แบบมีระเบียบช่วงสั้น	5-12
รูปที่ 5.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นระเบียบช่วงยาว (L) และช่วงสั้น (s) ตามอุณหภูมิ สำหรับ (a) CuZn และ AuCu , (b) AuCu_3	5-15
รูปที่ 5.14 แสดงขั้นตอนการขยายตัวของ Domain ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และการเกิด APB	5-15
รูปที่ 5.15 แสดงการขยายขอบเขตของ APD	5-16
รูปที่ 5.16 แสดง APB ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AlFe (a) ภาพถ่ายจาก TEM (b) ภาพ schematic	5-16
รูปที่ 5.17 แสดง Metastable APD ในโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu_3	5-17
รูปที่ 5.18 แสดง Metastable APD ในโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu	5-17
รูปที่ 5.19 แสดงผลของ การเปลี่ยนโครงสร้าง เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบต่อ ความต้านทานทางไฟฟ้า	5-18
รูปที่ 5.20 แสดงหลักการทำงานของวิธี Debye-Scherrer Powder Method.....	5-21
รูปที่ 5.21 แสดง Powder Pattern ของ (a) โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (b) โครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	5-21
รูปที่ 5.22 แสดงหลักการทำงานของ X-ray Diffractometer	5-22

รูปที่ 5.23 แสดงตัวอย่าง XRD Pattern ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Solution Treated) และ โครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีระดับความเป็นระเบียบต่าง ๆ กันตามเวลาในการบ่ม.....	5-22
รูปที่ 5.24 แสดง SAED Reflection Pattern ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	5-23
รูปที่ 5.25 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ในระหว่างการบ่มความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโลหะผสม ทองคำ 18 กระรัต 16 กระรัต และ 14 กระรัต ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Cu:Ag เป็น 65 : 35	5-25
รูปที่ 5.26 แสดงผลของการลดขนาดต่อความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผสมทองคำ.....	5-28
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบความแข็งแรงในสภาพ as cast , สภาพ cold work และ สภาพ annealed	5-29
รูปที่ 5.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์.....	5-31
รูปที่ 5.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการ Annealing.....	5-31
รูปที่ 5.30 แสดง XRD Pattern ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการ Annealing.....	5-32
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับปัจจัยการบ่มในชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag	5-33
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับปัจจัยการบ่มในชิ้นงาน 750Au-150Cu-200Ag	5-34
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับปัจจัยการบ่มในชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag	5-35
รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag , 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag	5-36
รูปที่ 5.35 คุณสมบัติความแข็งแรงหลังจากการบ่ม นาน 100 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในทองส่วนผสมต่าง ๆ	5-38
รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบความแข็งแรงในสภาพ Annealed กับสภาพหลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 270 °C เป็นเวลา 100 นาที ที่ส่วนผสมทางเคมีที่ปริมาณเงิน ต่าง ๆ ในทอง 18 กระรัต	5-40
รูปที่ 5.37 แสดง XRD Pattern ของ 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 270 °C ณ เวลาการบ่มต่าง ๆ ..	5-41
รูปที่ 5.38 แสดง XRD Pattern ของ 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 270 °C ณ เวลาการบ่มต่าง ๆ ..	5-42
รูปที่ 6.1 แผนภูมิสมดุ 3 เฟส ของทอง-เงิน-ทองแดง	6-3
รูปที่ 6.2 แสดงช่วงของส่วนผสมของสีของโลหะผสมทอง-เงิน-ทองแดง	6-4
รูปที่ 6.3 แสดงความต้านทานการหุ้มของโลหะผสม Au-Ag-Cu	6-9
รูปที่ 6.4 แสดงของเหลวในสมดุกับของแข็งด้วย contact angle θ	6-10
รูปที่ 6.5 เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop	6-12
รูปที่ 6.6 แสดงการวัดบน sessile drop เพื่อการคำนวณหาค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส	6-13
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสของทองคำบน TiC ที่ 1100 °C.....	6-14
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทองบนฐาน(a) SiC (b) TiO ₂ และ(c) ZnO.....	6-15
รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและwork of adhesion ของ ทอง บนฐานต่าง ๆ กันกับ Function of bandgap energies E_g ของฐานต่าง ๆ.....	6-16
รูปที่ 6.10 แสดงหยดของอะลูมิเนียมในการทดลอง sessile drop ที่ 1000°C	6-23
รูปที่ 6.11 แสดงหยดของโลหะเงิน ในการทดลอง sessile drop 1000°C	6-23
รูปที่ 6.12 แสดงDrop ของชิ้นงาน B101-2	6-25
รูปที่ 6.13 แสดงDrop ของชิ้นงาน B105-1	6-25
รูปที่ 6.14 แสดงDrop ของชิ้นงาน B109-1	6-26

รูปที่ 6.15 แสดง Drop ของชิ้นงาน B117-2	6-26
รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่ามอดุลัสของโลหะประสานทอง 14 กระรัต	6-27
รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณสังกะสีของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต	6-28
รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับอุณหภูมิที่จุด solidus และ liquidus	6-29
รูปที่ 7.1 สถิติของข้อบกพร่อง ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต	7-3
รูปที่ 7.2 สถิติ ของ ข้อ บกพร่องชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น	7-3
รูปที่ 7.3 ลักษณะของรูเท (Sprue) (Ref. 14)	7-7
รูปที่ 7.4 ช่องว่างของอากาศหรือบริเวณที่มีความดันต่ำเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างทันที	7-8
รูปที่ 7.5 ทางเดินน้ำโลหะของการหล่อเครื่องประดับทอง	7-9
รูปที่ 7.6 ลักษณะรูปร่างของต้นแบบชิ้นงานทดสอบ	7-12

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

อุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศได้เจริญรุดหน้าจนยอดส่งออกมีมูลค่าสูงถึง 47,088 ล้านบาทในปี 2537 โดยทำรายได้เข้าสู่ประเทศสูงเป็นอันดับที่ 4 รองจากเสื้อผ้าสำเร็จรูป เครื่องคอมพิวเตอร์ และกุ้งสดแช่เย็น แช่แข็ง ถึงแม้ว่าในช่วงที่ประเทศไทยประสบภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจ แต่อุตสาหกรรมนี้ยังสร้างรายได้จากการส่งออกกลับเข้าประเทศไทยมากขึ้น นับเป็นอันดับที่ 6 ของสินค้าส่งออกการผลิตในปี 2540 โดยมีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 55,622 ล้านบาท ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องประดับอัญมณีได้แก่ โลหะประกอบอัญมณีโดยทั่วไปยังมีการผลิตด้วยวิธีการดั้งเดิมที่ ได้รับการตกทอดลงมาจากบรรพบุรุษ อีกทั้งสูตรผสมโลหะและวิชาการผลิตเหล่านี้ก็ยังเป็นที่ปกปิดหรือเป็นความลับตลอดมา นอกจากนี้มาตรฐานและชื่อโลหะดังกล่าวก็มีได้มีแน่ชัดและเป็นสากล

โลหะหลักที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ทอง ทองแดง และเงิน ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งสิ้น ทองคำที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นจะมีความบริสุทธิ์ 99.99% หรือที่เรียกว่าทองสวิส ซึ่งไม่ใช่นำเข้าจากประเทศสวิสเพียงประเทศเดียว แต่มีการนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย ฯลฯ ทองดังกล่าวสามารถนำมาทำโลหะประกอบอัญมณีโดยตรงไม่มีการเจือได้ เช่น Goldmaster, Prima Gold หรือทองสุโขทัย เป็นต้น ซึ่งเป็นเครื่องประดับทอง ระดับสูงราคาแพง แต่มีผู้ใช้น้อยภายในประเทศ

เครื่องประดับทองที่เป็นที่นิยมภายในประเทศมักเรียกกันว่าทองคำแท้ 100% ซึ่งที่จริงแล้วมีความบริสุทธิ์เพียง 96.5% โดยมีการเจือเงินและทองแดงเข้าไป นัยหนึ่งเพื่อทำให้ทองแข็งขึ้น เพราะ เงินและทองแดงสามารถละลายได้ในทอง ใน Solid Solution Hardening และด้วยวิธีการ Heat Treatment ที่เหมาะสม ทองและทองแดงจะให้ Order Hardening อันสืบเนื่องจากการเกิด Super Lattice ได้ ซึ่งกรรมวิธีนี้หลังยังไม่มีในการทำในประเทศ

นอกเหนือจากด้านการค้าแล้วอุตสาหกรรมโลหะประกอบอัญมณีในประเทศยังมีความต้องการการสนับสนุนจากองค์กรของรัฐ และเอกชนด้วยตนเอง ในด้านมาตรฐานสินค้า มาตรฐานการผลิต และส่วนผสมโลหะอีกมาก

1.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะประกอบอัญมณี

1. ส่วนผสมและคุณภาพ เครื่องประดับทองที่ผลิตภายในประเทศมีความบริสุทธิ์สามระดับ อันได้แก่ ระดับที่หนึ่งทอง 99.99% ซึ่งมักเรียกขานกันว่าทอง 99 หรือทองสวิส ระดับที่สองทอง 96.5% หรือที่เรียกว่าตามการค้าว่าทอง 100% ทำได้โดยการนำทองสวิสมาผสมเงินหรือทองแดง ทองระดับที่สองนี้เป็นทองที่คนไทยนิยมนำมาทำตัวเรือนและสายสร้อย ระดับสุดท้ายเป็นทอง 90% เป็นทองที่มีการเจือด้วยทองแดงประมาณ 6.5% และเงิน 3.5% สัดส่วนของการเจือทองแดงและเงินอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ การปรับสีตามความนิยมและความต้องการของลูกค้า

อย่างไรก็ตาม ทองคำที่ผลิตในประเทศมักเกิด ออกซิไดซ์หรือเปลี่ยนสี (Discoloration) ในบริเวณ เนื้อทองเองและบริเวณรอยต่อซึ่งต่างจากทองคำที่ผลิตจากต่างประเทศที่ถึงแม้จะมีส่วนผสมของทองน้อยกว่าเช่นที่ 75%, 58.5% หรือ 33% (ส่วนผสมที่เป็นที่นิยม) ก็จะสามารถคงสภาพสีและความคงทนดีกว่า ทองที่ผลิตในประเทศ เครื่องประดับรูปประพจน์ทำด้วยทองอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ ทองที่มีความบริสุทธิ์ 50% และทองแดง 50% ซึ่งเรียกกันแพร่หลายว่านาก

การทำทอง 96.5% นั้น ผู้ผลิตภายในประเทศส่วนใหญ่จะนำทอง 99.99% มาผสมกับ Master Alloy ที่นำเข้าจากต่างประเทศและผลิตขึ้นในประเทศ Master Alloy นี้ประกอบด้วย เงินและทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักโดยมีโลหะตัวอื่น ๆ เป็นตัวประกอบย่อยซึ่งไม่เป็นที่เปิดเผย

2. การประสานทองของอุตสาหกรรมทองในประเทศยังใช้เทคนิคเก่าอยู่ ซึ่งมักส่งผลให้บริเวณนี้เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนสีและผุกร่อน อันทำให้ลูกค้าทั้งในประเทศและต่างประเทศขาดความมั่นใจในผลิตภัณฑ์ การทำตัวประสานทองนี้จะใช้โลหะเงินผสมกับสแตนเลส (ชนิดเจาะรู) ด้วยอัตราส่วน 3.5 : 6.5 ซึ่งปัจจุบันสแตนเลสหาได้ยากมาก จึงเริ่มมีผู้ผลิต Alloy ที่ประกอบด้วย ดีบุก และสังกะสี เพื่อลดจุดหลอมเหลวซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวประสานทองที่จะต้องหลอมเหลวก่อนเนื้อทองขึ้นงาน นอกจากนี้วิธีการใช้ตัวประสานดังกล่าวต้องทำให้ตัวประสานเป็นผง ซึ่งรู้จักกันว่า "การหลุย" ซึ่งจะหลอมทองกับ แกลบแล้วให้แท่งเหล็กคู้ยเข้าไประลอกทองออกเป็นผงละเอียด

จากการสำรวจเบื้องต้นก็ทำให้ทราบถึงปัญหาด้านการผลิตและคุณภาพ ดังนั้นจึงเป็นมูลเหตุจูงใจให้คณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษา และวิจัยเกี่ยวกับโลหะที่ใช้เป็นตัวเรือนประกอบอัญมณี เพื่อพัฒนาความรู้ อันจะเป็นการส่งเสริมสนับสนุนอุตสาหกรรมนี้ต่อไป

โครงการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณี เริ่มโครงการโดยได้ รับการสนับสนุนการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เมื่อวันที่ 1 เมษายน 2540 เป็นต้นมา โดยมีระยะเวลาโครงการ 2 ปี โดยทำสัญญาเป็นรายปี ระยะแรก (ปีที่ 1) เริ่มวันที่ 1 เมษายน 2540 ถึง 31 มีนาคม 2541 และ ระยะที่ 2 (ปีที่ 2) เริ่มวันที่ 1 กันยายน 2541 ถึง 31 สิงหาคม 2542

1.3 คณะผู้วิจัยในโครงการ

บุคลากรที่ทำการวิจัยในโครงการนี้ มีรายนามดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ	หัวหน้าโครงการ
2. อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร	นักวิจัย
3. นางศิริรัตน์ นิสารัตนพร	ผู้ช่วยวิจัย
4. นายปณต เทพพัตตรา	นิสิตปริญญาโท
5. นายกรันต์ ลิ้มปี่ไพฑูรย์	นิสิตปริญญาโท
6. นายจาพิกรณ์ สุภิกรม	นิสิตปริญญาโท
7. นายวินัย รักษาพันธ์	นิสิตปริญญาโท
8. นายปวิน กิจเจริญ*	นิสิตปริญญาโท
9. นางสาวนิรมล ลพหล้า	เจ้าหน้าที่ธุรการ

หมายเหตุ : * นายปวิน กิจเจริญ นิสิตปริญญาโท ที่เคยอยู่ในโครงการได้ลาออกไปแล้ว โดยมีนายวินัย รักษาพันธ์ เข้ามาในโครงการแทน

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและพัฒนาความรู้เรื่องอิทธิพลของธาตุผสม เช่น
 - ธาตุผสมหลัก - ทองแดง เงิน
 - ธาตุผสมรอง - ดีบุก นิกเกิล โครเมียม สังกะสี และอื่น ๆ
2. ศึกษาส่วนผสมและปรับปรุงตัวประสานให้มีคุณสมบัติและมาตรฐานการใช้งานที่ชัดเจน โดยแบ่งตัวประสานออกเป็น 2 ชนิด คือโลหะประสานและน้ำยาประสาน
3. ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการหล่อแบบเหวี่ยง โดยแปรเปลี่ยนส่วนผสม อุณหภูมิของการเทน้ำโลหะและความเร็วของการเหวี่ยง
4. ปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะโดยกรรมวิธีทางความร้อน เช่น การเพิ่มความแข็งโดยการป้อนด้วยความร้อน (Age Hardening) และการเพิ่มความแข็งโดยกรรมวิธี Order Hardening
5. เผยแพร่ความรู้และเอกสารที่ได้จากการศึกษา
6. ผลักดันให้อุตสาหกรรมโลหะประกอบอัญมณีมีความเป็นสากลมากขึ้น

1.5 ขอบเขตของโครงการ

ขั้นตอนการทดลองและขอบเขตของโครงการ ได้ระบุไว้ในสัญญาเลขที่ RDG 2/04/2540 และสัญญาเลขที่ RDG 4120046 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ศึกษาเอกสารและวารสารในประเทศและจากต่างประเทศ
2. วิเคราะห์โลหะประกอบอัญมณีและตัวประสาน โดยเน้นศึกษาในด้านต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 ส่วนประกอบทางเคมี
 - 2.2 โครงสร้างจุลภาคและวิธีการผลิต
 - 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสและการแข็งตัวโดย DSC/DTA
3. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดตามดและ Mould Filling ในการผลิตโลหะ โดยวิธีการเหวี่ยง
4. จัดสัมมนาและจัดพิมพ์เอกสารมาตรฐานเผยแพร่แก่วงการอุตสาหกรรม

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าจะได้ผลงานหลังเสร็จสิ้นโครงการทั้งหมด (ระยะเวลา 2 ปี) ดังนี้

1. ข้อมูลและสูตรผสมของโลหะผสมที่ใช้เป็นโลหะประกอบอัญมณี
2. มาตรฐานสำหรับโลหะวิทยาและพฤติกรรมของโลหะประกอบอัญมณี
3. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพงานหล่อเหวี่ยง
4. จัดสัมมนาเผยแพร่ความรู้และปรับปรุงมาตรฐานการผลิตให้เป็นสากล
5. คู่มือโลหะวิทยา สูตรผสมโลหะและ Atlas Microstructure

บทที่ 2

การดำเนินงานวิจัยและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผนงานการดำเนินงานวิจัย

จากข้อมูลเบื้องต้น วัตถุประสงค์ ขอบเขตการดำเนินงาน การเข้าเยี่ยมชมและสอบถามข้อมูลต่าง ๆ จากผู้ประกอบการในช่วง 6 เดือนแรก ตลอดจนคำแนะนำให้การปรึกษาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่มาประเมินโครงการ ทำให้มีข้อมูลเพิ่มเติมที่มีประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการวิจัย กล่าวคือ โลหะทองคำผสมในประเทศไทยที่แยกตามชนิดและสีของโลหะ มีการดำเนินการผลิตขึ้นอยู่เกือบทุกชนิดและทุกสี อย่างไรก็ตาม ทองคำที่นิยมในบ้านเราจะเป็นทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งมักเรียกกันว่าทองคำแท้ 100% ซึ่งแท้จริงแล้วมีความบริสุทธิ์เพียง 96.5% และทองคำที่มีความบริสุทธิ์ 90% ก็เป็นอีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้ทำทองคำแท่ง ทองคำที่นิยมส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศโดยมากเป็นทองคำประเภท 18k หรือ 14k ดังนั้น ในงานวิจัยสำหรับโครงการนี้คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาทองคำ ที่นิยมในบ้านเราและต่างประเทศดังกล่าว ในส่วนกรรมวิธีการผลิตคณะผู้วิจัยพบว่าปัญหาที่เป็นปัญหาคำคัญมากที่สุดที่พบในการหล่อคือ รูพรุนเนื่องจากการหดตัวที่เรียกว่า Shrinkage Porosity หรือรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซเรียกกันว่าการเกิดตามด ซึ่งตรงกับแผนการศึกษาวิจัยที่วางไว้แต่แรก อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยพบว่าในประเทศไทย การหล่อที่ใช้กันมากมีอยู่ 2 ประเภทคือ การหล่อด้วยเตา Induction ร่วมกับระบบสูญญากาศ และการหล่อด้วยก๊าซประกอบกับเครื่องหล่อแบบเหวี่ยง โดยการหล่อประเภทแรกที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณภาพสูง อย่างไรก็ตาม เตา Induction มีราคาแพงและใช้กันไม่กว้างขวางนัก ขณะที่การหล่อด้วยเครื่องหล่อแบบเหวี่ยงเป็นการหล่อที่เป็นที่นิยมมานานแล้ว และใช้ในโรงงานระดับกลางและเล็ก เนื่องจากราคาของเครื่องถูกมากเมื่อเทียบกับประเภทแรก แต่จะพบปัญหาเนื่องมาจากการผลิตมาก การแก้ไขก็อาศัยจากประสบการณ์ของช่างหล่อ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะเน้นการหล่อด้วยเครื่องหล่อแบบเหวี่ยง โดยอาศัยหลักวิชาการเพื่อแก้ไขและให้ความรู้แก่ผู้ประกอบการขนาดเล็กจำนวนมาก

สิ่งที่น่าสนใจและได้นำมาเป็นหัวข้อวิจัยในโครงการย่อยนี้ คือ อิทธิพลของธาตุทองแดง ในวงการเครื่องประดับโลหะประกอบอัญมณี เป็นที่รู้กันมานานว่าการใส่ทองแดงทำให้ทองคำผสม มีคุณสมบัติแข็งแรงและมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม พบว่าการทำเครื่องประดับในไทยมักจะทำการผลิตและขายผลิตภัณฑ์ในสภาพหล่อ หรือแม้ว่าจะมีการขายผลิตภัณฑ์ของรูปพรรณในสภาพรีด แต่ผลิตภัณฑ์ทั้งหล่อหรือรีดมาก็ไม่ได้ผ่านการเพิ่มคุณสมบัติทางกล ความแข็งแรงและความแข็งด้วยวิธีทางความร้อน หรือที่

เรียกกันทางวิชาการด้านโลหวิทยาว่า การอบด้วยความร้อน (Heat treatment) ดังนั้น ความแข็งที่ได้ในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ จะมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบ Solid Solution Hardening เท่านั้น เพราะในกลไกนี้ ธาตุเงินและทองแดงสามารถละลายได้ในทอง ใน (Solid Solution) ในกรณีของความแข็งที่ได้ในชิ้นงานที่ผ่านการรีด ก็จะได้จากการกลไกที่เรียกว่า กลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการขึ้นรูป ทั้งสองกลไกดังกล่าวในบางสถานะที่ไม่เหมาะสม จะไม่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลหรือเพิ่มก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้นทำให้ชิ้นงานมีความทนทานต่อการเสียดสี หรือมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นด้วยวิธีการ Heat Treatment ที่เหมาะสม ทองและทองแดงจะให้ Order Hardening อันสืบเนื่องจากการเกิด Super Lattice ได้ ซึ่งกรรมวิธีหลังยังไม่มีการทำในประเทศ โดยเฉพาะในทองคำผสม 18 และ 14 กะรัต

การประสานทองในประเทศไทย ยังใช้เทคนิคเก่าอยู่ และสูตรโลหะประสานทองก็เป็นสูตรเฉพาะของโรงงานผู้ประกอบการแต่ละแห่ง และปิดเป็นความลับตลอดมา อย่างไรก็ตามพบว่า โลหะที่นำมาเป็นธาตุผสมที่สำคัญ นอกเหนือจากโลหะหลัก ทอง เงิน และทองแดงแล้ว คือ โลหะสังกะสี ดีบุก และอินเดียม ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะศึกษาโลหะผสมเหล่านี้ อย่างไรก็ตามในหัวข้อการวิจัย จะทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุสังกะสี ก่อน โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติด้านการเปียกของ ตัวประสานทองที่มีธาตุผสมสังกะสีอยู่

กรรมวิธี การอบด้วยความร้อนอีกชนิดหนึ่ง คือการอบเป็นเนื้อเดียวด้วยความร้อน (Homogenization) เป็นกรรมวิธีที่ใช้กันมากในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม ทองแดง เพื่อเป็นการลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนกระบวนการผลิต อาทิเช่น การรีด การอัดขึ้นรูป ฯลฯ อย่างไรก็ตาม กรรมวิธีนี้ก็พบในการผลิตโลหะทอง โดยเฉพาะโลหะทองผสม ในต่างประเทศ แต่ยังไม่ทราบขั้นตอนและรายงานการใช้กรรมวิธีนี้ในการผลิตอย่างแน่ชัด และกรรมวิธีนี้ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ในประเทศไทย มูลเหตุจูงใจในการศึกษาในหัวข้อนี้ เกิดจากการเยี่ยมชมโรงงานที่ผลิตเครื่องประดับประเภทโลหะที่ผ่านการขึ้นรูป เช่น สร้อย และกำไล พบว่า ได้นำโลหะที่ได้จากการหลอมมาขึ้นรูปด้วยวิธีการดึง (Drawing) โดยไม่ผ่านขั้นตอนการอบเป็นเนื้อเดียว จึงมีโอกาที่จะเกิดการแตกร้าวได้ง่าย โดยเฉพาะบริเวณผิวชิ้นงานและทำให้การลดขนาดทำได้น้อยลง ดังนั้นกระบวนการอบเป็นเนื้อเดียวจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำมาศึกษา และวิจัย นอกจากนี้อาจจะเป็นขั้นตอนที่ใช้เพื่อลดปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตได้อีกทางหนึ่ง อันจะเป็นประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมเครื่องประดับอัญมณีของไทย

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนลักษณะจุดเน้นของหัวข้อวิจัยตามที่ได้รับการเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ จาก สกว. ประจำโครงการนี้และปรับให้เหมาะสมกับความสนใจและความต้องการของอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับประกอบอัญมณีนี้อย่าง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาข้อมูล และวางแผนแนวทางการวิจัยในโครงการนี้ โดยแบ่งเป็น การศึกษาข้อมูลทางด้านโลหวิทยาของทองและทองผสม การศึกษาวิจัยส่วนผสมทางเคมี และทำการวิจัยในแต่ละโครงการย่อย ดังนี้

- 1) โลหะทองและทองผสม และการศึกษาส่วนผสมทางเคมี
- 2) ศึกษาอิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อการผลิตเส้นลวดทองคำ 14 กะรัต
- 3) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโลหะทองผสมทองแดง 18 กะรัต โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมความแข็งแรงของโลหะทองคำ 18 กะรัตผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูป
- 4) ศึกษาความสามารถในเปียกของโลหะตัวประสาน 14 กะรัต ที่ผสมสังกะสี
- 5) ศึกษาตัวแปร ขนาด และรูปร่างงานหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน (ตามด) ในการหล่อแบบเหวี่ยง ของทองคำ 14 กะรัต

2.2 กิจกรรมทางวิชาการอื่น ๆ

2.2.1 การอบรมสัมมนาและเผยแพร่

รายละเอียดของการเข้าร่วมสัมมนา การจัดสัมมนา และการเข้าร่วมกิจกรรมเผยแพร่ความรู้ต่าง ๆ ที่คณะผู้วิจัยได้มีส่วนในกิจกรรม มีดังต่อไปนี้

18 กรกฎาคม 2540 เข้าร่วมสัมมนาเรื่อง "เทคโนโลยีการผลิตและหล่อทองคำ" ณ ดุสิตธานีฮอลล์ โรงแรมดุสิตธานี จัดโดย สมาพันธ์ผู้ผลิตทองคำแห่งโลก (World Gold Council)¹

15 มีนาคม 2541 ได้จัดสัมมนา เรื่อง "คุณสมบัติของโลหะที่มีอิทธิพล ต่อ คุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป" และเรื่อง "คุณสมบัติของโลหะที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบด้วยความร้อน" ขึ้นในงาน Bangkok Gems Jewelry Fair ณ ห้องสัมมนา 1 ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ และ อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นวิทยากร²

กันยายน 2541 ได้บรรยายในหัวข้อ "อิทธิพลของธาตุผสมและการควบคุมตำหนิของการหล่อทอง" ณ ห้องโถงใต้ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โดย อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นวิทยากร อนึ่ง งานครั้งนี้ได้จัดขึ้นโดย สำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

9-10 ตุลาคม 2541 ได้จัดการอบรมด้านโลหวิทยา ในหัวข้อ "ความรู้ด้านโลหวิทยาเบื้องต้นของการผลิตเครื่องประดับ" และ "เงินสเตอร์ลิง" จัดขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ และอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นวิทยากร

¹ รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 ส่วนที่ 1

² รายละเอียดและสรุปผลการสัมมนาระบุไว้ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 หัวข้อที่ 1.8

2.2.2 การจัดทำ เอกสารประกอบการสัมมนา การบรรยายและเอกสารเผยแพร่

คณะผู้วิจัยได้จัดทำเอกสารประกอบการสัมมนา การบรรยาย และเอกสารเผยแพร่ ในวาระต่าง ๆ ไว้ ดังนี้

2.2.2.1 เอกสารประกอบการสัมมนา และการบรรยาย

1. "คุณสมบัติของโลหะที่มีอิทธิพลต่อ คุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป" โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ ใช้ประกอบการสัมมนาจัดขึ้นในงาน Bangkok Gems Jewelry Fair ณ ห้องสัมมนา 1 ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ เมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2541
2. "คุณสมบัติของโลหะที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบด้วยความร้อน" โดย อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ใช้ประกอบการสัมมนาจัดขึ้นในงาน Bangkok Gems Jewelry Fair ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ เมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2541
3. "ความรู้ด้านโลหวิทยาเบื้องต้นของการผลิตเครื่องประดับ" และ "เงินสเตอร์ลิง" โดยรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ และอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ใช้ประกอบการบรรยาย ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จัดขึ้น เมื่อวันที่ 9-10 ตุลาคม 2541
4. "อิทธิพลของธาตุผสมและการควบคุมด้านนิของการหล่อทอง" โดยรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ และอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นบทความประกอบการบรรยาย ณ ห้องโถง โลตัส ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ ในช่วงเดือนกันยายน 2541 และบทความนี้ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือชื่อ "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ" โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ เป็นหนึ่งในคณะบรรณาธิการในหนังสือเล่มนี้

2.2.2.2 เอกสารเผยแพร่

คณะผู้วิจัยได้จัดทำเอกสารเผยแพร่ ซึ่งเนื้อหาบางส่วนได้ใช้เป็นข้อมูลประกอบการบรรยายเกี่ยวกับโลหะวิทยาเบื้องต้นของการผลิตเครื่องประดับทอง หัวข้อในเอกสารเผยแพร่ มีดังนี้

1. ความรู้เบื้องต้นและการใช้งานของโลหะทองและทองผสม
2. การทดสอบโลหะทองคำด้วย Touchstone
3. การวิเคราะห์ทองคำในสวิสเซอร์แลนด์
4. ปริมาณซิลิกอนที่เหมาะสมในทองเค
5. การควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นจากการหล่อ
6. โลหะวิทยาการผลิตสร้อยทอง
7. การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะทองคำผสมในเครื่องประดับ

8. โลหะวิทยาของทองกะรัต
9. โลหะทองผสมไททาเนียมเกรด 990 (23.37 กะรัต)
10. ตารางคุณสมบัติทอง 22K และ 18K

คณะผู้วิจัยได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือในการอนุเคราะห์เอกสารและข้อมูลทางวิชาการต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง จากสมาพันธ์ผู้ผลิตทองคำแห่งโลก (World Gold Council) โดยเฉพาะอย่างยิ่งวารสาร Gold Technology ที่เป็นข้อมูลหลักที่นำมาใช้ในการจัดทำเอกสารเผยแพร่ฉบับนี้ ดังนั้น คณะผู้วิจัย จึงขอแสดงความขอบคุณสมาพันธ์มา ณ ที่นี้

2.2.3 คู่มือโลหะวิทยา และ Atlas microstructure

การจัดทำคู่มือโลหะวิทยาและ Atlas microstructure ยังอยู่ในระหว่างดำเนินการจัดทำรูปเล่มและการบรรยายเนื้อหาประกอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะแต่ละชนิด ในส่วนของชิ้นงานโลหะทองผสม คณะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ เพื่อชิ้นงาน จากคุณพิเชษฐ์ พะลานกุล บริษัท Beauty Gems เพื่อจัดทำโลหะทองผสมกะรัตต่าง ๆ ตั้งแต่ 6K, 10K, 14K, 18K และ 22-23K จำนวนทั้งหมด 21 ชิ้น โดยแปรเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีของโลหะทอง เงินและทองแดง โดยอ้างอิงถึงแผนภูมิระหว่างส่วนผสมทางเคมีในระบบทอง-เงิน-ทองแดงกับการให้สีที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะ เนื่องจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะทองผสมมีขั้นตอนซับซ้อน และสารเคมีที่ใช้กัดโลหะเพื่อดูโครงสร้าง ก็เป็นสารเคมีที่มีความรุนแรงสูง ทำให้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นไปอย่างล่าช้า อย่างไรก็ตาม คาดว่าในเร็ว ๆ นี้จะสามารถสรุปผลและจัดทำ Atlas microstructure ได้

2.3 ครุภัณฑ์สำหรับงานวิจัยในโครงการนี้

ครุภัณฑ์ที่ได้รับการอนุมัติจาก สกว. ให้จัดหาไว้ในโครงการมีดังนี้

- | | |
|-------------------------------------|-----------|
| 1. เครื่องรีดมอเตอร์ขนาดกลาง | 1 เครื่อง |
| 2. เครื่องหล่อเหวี่ยงดูดแบบสูญญากาศ | 1 เครื่อง |
| 3. เตาอบปูน 8 เบ้า | 1 เตา |
| 4. เครื่องฉีดล้างปูน | 1 เครื่อง |

ในระบรอบ 6 เดือนที่ 1 (ปีที่ 2) คณะผู้วิจัยได้การอนุมัติสนับสนุนเงินอุดหนุนงานวิจัย จากสำนักงานทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับจัดซื้อครุภัณฑ์เตาหลอมโลหะแบบอินดักชั่นพร้อมระบบสูญญากาศจำนวน 1 เตา วงเงิน 1,600,000 บาท จากบริษัท Vetter Technic ประเทศเยอรมัน โดยวิธีการเปิด L/C เพราะครุภัณฑ์ดังกล่าวไม่มีจำหน่ายในประเทศไทย สถานภาพในปัจจุบันของเตาหลอมโลหะนี้ ได้ทำการติดตั้งและทดลองใช้อุปกรณ์เครื่องจักรเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว ไว้ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการแล้ว นอก

จากนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงห้องในภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่วางเตาหลอมดังกล่าว เพื่อให้เป็นห้องปฏิบัติการด้านโลหะประกอบเครื่องประดับอัญมณี โดยเงินที่ใช้ในการปรับปรุงเป็นเงินในส่วนที่เหลือจากการซื้อครุภัณฑ์เตาหลอมโลหะ และ ผ่านการอนุมัติการให้เงินดังกล่าวจากสกว. คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณในการให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนดังกล่าว ณ ที่นี้ด้วย

เมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2541 ที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยยังได้รับการบริจาคเตาหลอมโลหะระบบอินดักชันขนาด 10 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เตา จากนายรุ่งวิทย์ เต็มพิทยาเวช กรรมการผู้จัดการบริษัท โอลด์มูน จำกัด ซึ่งเป็นหน่วยงานภาคอุตสาหกรรมที่เล็งเห็นคุณประโยชน์ของงานวิจัยนี้ และต้องการบริจาคเตาโดยเน้นวัตถุประสงค์ของการบริจาคเพื่อใช้ในการงานวิจัยเฉพาะโครงการพัฒนาเทคนิค และส่วนผสมของโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณีเท่านั้น ปัจจุบัน เตาดังกล่าวมีประโยชน์มาในการทำ Master Alloys และทอง 14 กระรัต ที่มีสังกะสีผสมและปราศจากสังกะสี สำหรับงานวิจัยหัวข้อโลหะประสานทอง 14 กระรัต และคณะผู้วิจัยยังใช้เตาเพื่อใช้ในหัวข้อวิจัยการศึกษาอิทธิพลของระบบทางเดินน้ำโลหะต่อการเกิดรูพรุนในการหล่อโลหะแบบ Investment Casting ของทองสีเหลือง 14 กระรัต อีกด้วย

2.4 การเยี่ยมชมโรงงาน

คณะผู้วิจัยได้เยี่ยมชมโรงงานผู้ประกอบการขนาดใหญ่และเล็กที่ดำเนินกิจการในด้านการผลิตเครื่องประดับอัญมณี รวมถึงเครื่องประดับทองและเงิน ทั้งหมด 15 ครั้ง โดยสามารถแยกการเข้าเยี่ยมชมตามระยะของโครงการได้ดังนี้

ในระยะที่ 1 (รอบ 6 เดือนแรก) คณะผู้วิจัยได้รับความเชื่อเพื่อในการเข้าชมโรงงานของผู้ประกอบการขนาดเล็กและใหญ่ 8 ครั้ง และ ในรอบ 6 เดือนที่ 2 ได้มีโอกาสเข้าเยี่ยมชมโรงงานผลิตเครื่องประดับอัญมณีทางภาคเหนือ 3 แห่ง ในช่วงระยะที่ 2 ของโครงการได้เยี่ยมชมโรงงานอีก 10 ครั้ง เพื่อขอข้อมูลเพิ่มเติม รายชื่อของบริษัทและโรงงานที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เยี่ยมชมสถานที่ มีดังต่อไปนี้

- 1) โรงงานบิวตี้เจมส์แฟคตอรี ผลิตเครื่องประดับทองและเงิน ยี่ห้อ Beauty Gold 3 ครั้ง
- 2) โรงงานแพรวนด้า ผลิตเครื่องประดับทองและเงิน ยี่ห้อ Prima Gold 2 ครั้ง
- 3) ห้างทองชินเจียงเชียง ชั้น 3 เซ็นทรัลพลาซ่า งามอินทรา 4 ครั้ง
- 4) ศูนย์ศิลปชีพ ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ อ.บ่อพลอย จ.กาญจนบุรี 1 ครั้ง
- 5) บริษัท Thai Jewelry Manufacturer Co., Ltd. ผลิตเครื่องประดับเงินส่งออก 2 ครั้ง
- 6) บริษัท Silver & Gold Jewelry Ltd. ผลิตเครื่องประดับเงินส่งออก 1 ครั้ง
- 7) บริษัท ไทยอิลินี จำกัด ผลิตเครื่องประดับทอง 1 ครั้ง
- 8) บริษัท ชื่นจิ๋วเวอร์รี่ ผลิตเครื่องประดับเงิน 3 ครั้ง
- 9) บริษัท ยุพา แชนด์ จิวเวอร์รี่ จังหวัด อุบลราชธานี ผู้ผลิตเครื่องประดับเงิน 1 ครั้ง
- 10) บริษัท โรงงานบริษัท สุภาพร จำกัด ผู้ผลิตเครื่องประดับทองสุโขทัย

11) โรงงานบริษัท Bijoux Argent จำกัด ผู้ผลิตเครื่องประดับเงิน

12) โรงงานบริษัท ลานนาโกลด์ จำกัด ผู้ผลิตเครื่องประดับทองและเงิน โดยได้รับความอนุเคราะห์
ประสานงานเข้าเยี่ยมชมจากศูนย์ส่งเสริมการส่งออก จังหวัดเชียงใหม่

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประกอบการตามรายนามข้างต้น ในความเอื้อเฟื้อและการสนับสนุนให้
ข้อมูลทางวิชาการและเทคนิคการปฏิบัติต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อคณะผู้วิจัย มา ณ ที่นี้

อย่างไรก็ตาม จากการเยี่ยมชมโรงงาน คณะผู้วิจัย พบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ของผู้ประกอบการคือ
ผู้ผลิตไม่ทราบถึง ข้อมูลรายละเอียดส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ตัวอย่างเช่น ส่วนผสมของ
โลหะเงิน ทองแดง ดังนั้น การผลิตจึงอาศัยประสบการณ์ ความชำนาญของช่างฝีมือ และเมื่อเกิดปัญหาใน
ด้านคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ก็แก้ไขโดยเปลี่ยนวัตถุดิบและการลองผิดลองถูก นอกจากนี้ ยังพบปัญหา
ในด้านการหล่อตัวเรือนแหวนเงิน เช่นการเกิดรูพรุน เกิดฝ้าขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ส่วนปัญหาอื่น ๆ ที่พบ เช่น
ตลาดแคบในช่างฝีมือคุณภาพสูง การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดี ขาดเทคโนโลยีในการผลิตชิ้นงาน
คุณภาพสูง และ เทคโนโลยี ในการซ่อมแซมชิ้นงานที่บกพร่องจากการผลิต³

2.5 การจัดงานมหกรรม VICENZAORO I ที่ประเทศอิตาลี

การจัดงานมหกรรม “ENTE FIERA DI VICENZA” ณ เมือง VICENZA ประเทศอิตาลี ของอาจารย์
ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร นักวิจัยในโครงการ ระหว่างวันที่ 9-17 มกราคม 2542 ได้รับการสนับสนุนอนุมัติ
ทุนสนับสนุนค่าเดินทางจาก สกว.เป็นจำนวนเงิน 71,200 บาท ซึ่งเป็นทุนอุดหนุนเพิ่มเติมให้กับโครงการนี้
คณะผู้วิจัย โดยเฉพาะอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ขอขอบคุณ สกว. ที่ สนับสนุนค่าเดินทางมา ณ ที่
นี้ด้วย คณะผู้วิจัยได้รับประโยชน์อย่างยิ่งในด้านการผลิตเครื่องประดับอัญมณี โดยเฉพาะการทำท่อ หรือ
หลอดกลวง การประสานห้วงข้อต่อต่าง ๆ ด้วย กรรมวิธีใช้แสง Laser หนึ่งอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ได้ร่วม
เดินทางกับหัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ ผู้ได้รับทุนสนับสนุนค่าเดินทางจากคุณ
สมศักดิ์ ตันตชน เจ้าของห้างร้านของ JIA JIN CHIENG คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสมศักดิ์ ตันตชน
มา ณ โอกาสนี้ด้วย

รายละเอียดของการจัดงานมหกรรมดังกล่าว ได้ระบุไว้ในรายงานความก้าวหน้า 6 เดือนแรกของ
ระยะที่2 ในส่วนที่ 2 หัวข้อ 2.5 อย่างไรก็ตาม ขอสรุปสาระสำคัญในการจัดงานครั้งนี้ ไว้ดังนี้

มหกรรม “ENTE FIERA DI VICENZA” ที่จัดขึ้นในเมือง VICENZA ประเทศ Italy นับเป็นมหกรรม
การแสดงผลผลิตภัณฑ์เครื่องประดับและอัญมณีโดยเฉพาะเครื่องประดับทองและเงิน มีวัตถุประสงค์เพื่อเปิด
ให้โอกาสผู้ผลิตโดยเฉพาะผู้ผลิตอิตาลีได้แสดงผลผลิตภัณฑ์สินค้าเครื่องประดับตลอดจนเทคโนโลยีการ
ผลิตและเครื่องจักร แก่ผู้ที่สนใจจากทั่วทุกมุมโลก มหกรรมนี้จัดขึ้น 2 ครั้งต่อปี แบ่งเป็น VICENZAORO1

³ ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับปัญหาของผู้ประกอบการระบุไว้ในรายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ 1 ส่วนที่ 1

จัดขึ้นในช่วง 10-17 มกราคม 1999 และ VICENZAORO2 ในส่วนของ VICENZAORO1 มีจำนวนผู้เข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการจากประเทศอิตาลีเป็นส่วนใหญ่ โดยมีจำนวนมากถึง 1,119 ราย และผู้จัดแสดงนิทรรศการจากประเทศอื่น ๆ ทั่วโลกอีกจำนวน 190 ราย รวมประเทศไทยด้วย เทคโนโลยีและเครื่องจักรในมหกรรมครั้งนี้ที่น่าสนใจมีดังนี้

- 1) เครื่องผลิตสร้อยโดยใช้ Laser เชื่อม
- 2) เครื่องผลิตหลอมหล่อโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuing Casting)
- 3) เครื่องผลิตเครื่องประดับกลวงโดยใช้การขึ้นรูปผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroforming)
- 4) เครื่องหล่อแบบสูญญากาศเหมือนกับ J10 J15 ที่ผลิตจากสหรัฐอเมริกา
- 5) ชุดเครื่องรีดทำหลอดโลหะเพื่อผลิตเป็นสร้อยและกำไล

อุตสาหกรรมเครื่องประดับอัญมณี ในปัจจุบันและอนาคตมีแนวโน้มในการประยุกต์นำเทคโนโลยี Laser มาใช้ในการผลิตเครื่องประดับมากขึ้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่และน้ำหนักเบา และมีราคาเมื่อสวมใส่ เช่นการขึ้นรูปผิวโลหะ ด้วยไฟฟ้า การทำสร้อยกลวง แนวโน้มที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์รวมถึงการใช้คอมพิวเตอร์ติดตั้งเข้ากับเครื่องหลักเครื่องกัดโลหะ เช่น ทองเหลือง ทองและเงิน เพื่อทำเป็นต้นแบบโลหะในลักษณะ 3 มิติ อีกด้วย

สรุปข้อคิดเห็นประโยชน์ที่ได้จากการดูงานและข้อเสนอแนะ

1. ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

2. เทคโนโลยีที่คาดว่าจะมีแนวโน้มที่ดีสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ คือ เทคโนโลยีที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์สำหรับ Mass Market เช่น การผลิตสร้อยกลวง เครื่องประดับกลวง โดยใช้เครื่องจักรเชื่อมด้วย Laser เครื่องขึ้นรูปผิวโลหะ (Electroforming)

3. ในด้านการออกแบบ พบว่าในประเทศอิตาลีนิยมใช้เครื่องประดับทอง 18 กะรัต และเครื่องประดับที่ทำจากแพลตตินัม แพลลadium และไม่เน้นการประดับอัญมณี

บทที่ 3

โลหะทอง ทองผสม และการศึกษาส่วนผสมทางเคมี

โลหวิทยาเป็นศิลปทางกลศาสตร์ที่เก่าแก่ที่สุดและมีอายุมานานกว่า 5,000 ปี ศาสตร์นี้ เกิดขึ้น และถูกพัฒนาในลักษณะที่เป็นศิลปก่อนเข้าสู่ยุคของวิทยาศาสตร์ โลหะมีค่า เช่น ทอง ซึ่งมนุษย์ได้ค้นพบ โลหะชนิดนี้มาตั้งแต่ 4,000 ปีก่อน ค.ศ. และนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในรูปของศิลปโบราณ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จากโลหะมีค่าในสมัยโบราณจึงเน้นไปที่ความสวยงามล้ำค่า อย่างไรก็ตาม ไม่มีศิลปหรืองานฝีมือใด ๆ ที่ทำขึ้นโดยปราศจากความรู้ทางวิทยาศาสตร์เพียงแต่การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาใช้ในการศึกษาและเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะมีค่าเมื่อประมาณสองร้อยปีที่ผ่านมานี้ ตัวอย่างเช่น การประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะและค้นพบอิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล ทำให้การใช้งานโลหะมีค่ากว้างขวางมากขึ้น

3.1 การใช้งานโลหะทองและทองผสม

ทองคำบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่แล้วใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ โลหะที่นำมาใช้เป็นตัวกลางดังกล่าวต้องมีความบริสุทธิ์หรือมีเนื้อทอง 99.5% ขึ้นไป จึงเป็นที่ยอมรับ ด้วยเหตุนี้ทองคำจำนวนมากจึงถูกเก็บรักษาไว้ในชั้นใต้ดินของศูนย์การเงินสำคัญ ๆ ของโลก นอกจากนั้น ยังใช้ทำเหรียญ โลหะในทางทันตกรรม (เนื้อทอง 99.95-99.98%) เครื่องอิสริยาภรณ์ โลหะเคลือบโลหะอื่นหรือแม้แต่พระเครื่องทองคำ ผงทองยังได้นำมาใช้ในการตกแต่งประดับประดาเครื่องแก้วหรือภาชนะเครื่องเคลือบอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ทองคำบริสุทธิ์สูงมีราคาแพง และความแข็งแรงต่ำ ทองคำประเภทนี้จึงถูกนำมาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมไม่มากนัก ยกเว้นในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าที่ดี และความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เช่น ใช้ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ชุบชิ้นส่วนไอซี (Integrated Circuit Chips) ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น ฟิวส์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาไฟฟ้า หรือเป่าในเครื่องรังสีเอกซ์ ท่อนหรือภาชนะที่ทนต่อการเกิดออกซิเดชันใช้สำหรับบรรจุสารเคมีพิเศษ

ในกรณีที่โลหะทองเติมธาตุผสมต่าง ๆ เข้าไป กลายเป็นโลหะทองผสม มีจุดประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความแข็งแรง ความแข็งหรือเพื่อเปลี่ยนแปลงสีของโลหะให้สวยงามและเหมาะสมกับการใช้งาน การประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ด้านศาสนาทำพระพุทธรูป ด้านอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยการผลิตด้วยวิธีการหล่อหรือการขึ้นรูปเครื่องทองรูปพรรณ ซึ่งประเทศอิตาลีและสหรัฐ

อเมริกาเป็นประเทศผู้ผลิตเครื่องประดับทองคำใหญ่ที่สุดในโลก ด้านการเงินบางครั้งเหรียญทองยังผสมทองแดงเข้าไปเป็นตัวเพิ่มความแข็งให้กับโลหะที่มีปริมาณทอง 89.9-91.7% หรือผสมธาตุซิลิคอนเข้าไปที่เรียกกันว่าเยอรมันเนียม ทำให้ทองมีคุณสมบัติด้านจุดหลอมเหลว (จุดยูเทคติก) ต่ำ หลอมได้ง่าย ในทางปฏิบัติการเผาทองที่สัมผัสกับซิลิคอนทำให้บริเวณผิวสัมผัสหลอมได้ง่าย จึงเป็นตัวประสานที่ดีสำหรับยึดติดกับเคมี-คอนดักเตอร์กับฐานเข้าด้วยกัน นอกจากนี้การใช้งานโลหะทองผสมเป็นตัวยึดประสานทั่ว ๆ ไปก็คือใช้โลหะทองผสมพลงสำหรับเคมีคอนดักเตอร์ ขั้ว N และทองผสมอินเดียมสำหรับขั้ว P

3.2 โลหะทองและทองผสม

คำจำกัดความของทองคำตามความหมายไทย ๆ ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน บอกไว้ว่าทองคำคือธาตุหนึ่งเนื้อแน่นมาก สีเหลืองสุกปลั่งและเป็นโลหะมีค่า อย่างไรก็ตาม ความหมายทางด้านวิทยาศาสตร์ ได้ระบุว่าทองคำเป็นโลหะชนิดหนึ่ง มีสัญลักษณ์ทางเคมีว่า Au หลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิ 1064.4°C จุดเดือดที่ 2960°C และจัดเป็นโลหะหนักอันดับเจ็ดของโลก ซึ่งมีความหนาแน่น 19.32 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองจากธาตุรีเนียม ออสเมียม อิริเดียม แพลตตินัม นิพทูเนียมและพลูโตเนียม ทองคำยังจัดเป็นโลหะมีตระกูล (Noble Metal) ที่อยู่ในกลุ่มโลหะมีค่า (Precious Metals) โดยจัดอยู่ร่วมกับโลหะเงินและโลหะกลุ่มแพลตตินัม ที่มีธาตุหลักในกลุ่มนี้ 6 ธาตุ คือ แพลตตินัม แพลลาเดียม อิริเดียม รูธเนียม โรเดียม และออสเมียม โลหะทั้ง 6 ธาตุนี้จะมีคุณสมบัติความต้านทานต่อการผุกร่อนดีเยี่ยม และจุดหลอมเหลวสูง เนื่องจากโลหะในกลุ่มโลหะมีค่านี้มีค่า Affinity ต่อกออกซิเจนต่ำ ดังนั้น เราจึงพบแร่ทองคำตามธรรมชาติส่วนใหญ่ในรูปของโลหะธรรมชาติ (Native Metal) หรือส่วนน้อยเป็นสารประกอบชนิดที่สามารถนำมากลึงเป็นโลหะได้ง่าย เนื่องจากแร่ทองเหล่านี้มักมีปริมาณไม่แน่นอนและอยู่กระจัดกระจายรวมกับแร่ที่ไม่มีคุณค่าต่าง ๆ (Gangue Materials) ทำให้การได้แร่ทองหรือสารประกอบที่มีทองผสมอยู่เพื่อนำไปผลิตโลหะต่อไปนั้นทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องนำวิธีการหรือเทคนิคที่ประณีตเพื่อแยกแร่มีค่าออกจากวัสดุที่ไม่มีคุณค่า โดยปกติกรรมวิธีที่ใช้ในการแยกคือ การละลาย การสกัด แล้วตามด้วยการกลึงแร่

แหล่งแร่ทองคำสามารถจัดแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ ตามลักษณะการค้นพบคือ แหล่งแร่ที่อยู่ในหินต้นกำเนิดเดิม เรียกว่า แหล่งแร่ปฐมภูมิ (Primary Deposits) กับแหล่งแร่ที่หลุดจากต้นกำเนิดเดิม เรียกว่า แหล่งแร่ทุติยภูมิ (Secondary Deposits)

แหล่งแร่ปฐมภูมิเกิดขึ้นเมื่อ 500 ล้านปีก่อน ซึ่งพบในลักษณะรวมอยู่กับแร่อื่น ๆ ที่รวมตัวกันกลายเป็นหิน หรือแทรกอยู่ตามรอยแตกของหินกลายเป็นสายแร่ทองคำ โดยมากจะพบในหินควอตซ์

แหล่งแร่ทุติยภูมิสามารถแบ่งออกได้อีกโดยแบ่งออกเป็น แหล่งแร่ประเภทตกค้างที่เดิม (Residual Deposits) ลานแร่พลัดไหลเขา (Alluvial Deposits) ลานแร่พลัดเชิงเขา (Colluvial Deposits) แหล่งแร่สะสมตามท้องธาร (Stream Deposits) และลานแร่ (Placer Gold) การเรียกชื่อแหล่งแร่ทุติยภูมินี้ขึ้นกับผลของการผุพังและสายน้ำพัดพาแร่ทองไปสะสมรวมกันอยู่ในบริเวณใด

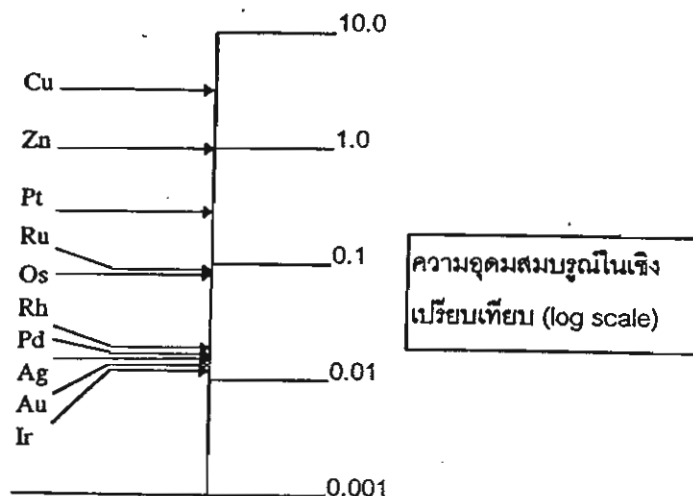
ปริมาณแร่ทองพบมากที่สุดในโลกในเมืองแร่ทองคำประเทศแอฟริกาใต้ โดยเฉพาะแหล่งทองที่มั่งคั่งที่สุดคือ เมืองทองวิทวอเตอร์สแรนด์ ประเทศแอฟริกาใต้ให้ผลผลิตประมาณ 3 ใน 4 ของทองทั้งหมดในโลก และผลิตจากเมืองทองวิทวอเตอร์สแรนด์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตโลก แหล่งแร่ทองเป็นแหล่งแร่ปฐมภูมิซึ่งมีทั้งอยู่ระดับตื้นและลึก วิธีทำเหมืองแบ่งออก 2 แบบคือ แบบเหมืองหอบและแบบเหมืองอุโมงค์ แบบเหมืองหอบจะใช้สำหรับแหล่งแร่ขนาดใหญ่มีความสมบูรณ์ต่ำและอยู่ไม่ลึก ขณะที่แบบเหมืองอุโมงค์จะมีความสมบูรณ์สูงและอยู่ลึกต้องเจาะอุโมงค์ลงไปและนำหินที่มีแร่ทองขึ้นมาทำการแยกต่อไป

นอกจากนี้ ยังพบแหล่งแร่ทองในประเทศอเมริกา สาธารณรัฐประชาชนจีน เกาหลี ญี่ปุ่น รวมทั้งในประเทศไทย

แหล่งทองในประเทศไทย พบได้ในทุกภาคและหลายจังหวัด ส่วนมากพบแหล่งแร่เป็นลักษณะลานแร่และตามลำธารลำห้วย แหล่งแร่ที่สำคัญมี 3 แหล่ง คือแหล่งบางสะพาน จังหวัดประจวบ-คีรีขันธ์ ที่ได้ทองคำที่มีความบริสุทธิ์สวยงามอย่างที่เรียกกันว่าทองเนื้อเก้า แหล่งกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี เป็นแหล่งที่เปิดทำเหมืองตั้งแต่ ปี 2416 และหยุดการสำรวจและพัฒนาเหมืองเมื่อมกราคม พ.ศ. 2500 แหล่งโต๊ะโม๊ะ จังหวัดนราธิวาส เป็นแหล่งที่คาดว่าจะมีทองคำมากที่สุดในตอนนี้ นอกจากนี้ยังพบที่มีแร่ทองคำในภาคต่าง ๆ เช่น

ภาคเหนือ ที่ จังหวัดเชียงราย และ จังหวัดลำปาง
ภาคอีสาน ที่ จังหวัดเลย และ จังหวัดหนองคาย
ภาคตะวันออก ที่ จังหวัดชลบุรี และ จังหวัดจันทบุรี
ภาคใต้ ที่ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และ จังหวัดชุมพร
ภาคกลาง ที่ จังหวัดราชบุรี และ จังหวัดกาญจนบุรี

ถึงแม้ว่าจะพบแร่ทองกระจายจัดกระจายในประเทศไทยและในโลก แต่ปริมาณของทองคำ เมื่อเทียบกับโลหะมีค่าและโลหะทางวิศวกรรมอื่น ๆ มีน้อยมาก โดยสังเกตได้จากรูปที่ 1.1 ที่แสดงถึงปริมาณหรือความอุดมสมบูรณ์ของโลหะทองเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอื่น ๆ โดยกำหนดให้ปริมาณหรือความอุดมสมบูรณ์ของแร่สังกะสีมีค่าเท่ากับ 1.0 จะพบว่าโลหะในกลุ่มโลหะมีค่ามีปริมาณและความอุดมสมบูรณ์น้อยหรือเรียกได้ว่าหายากนั่นเอง โดยเฉพาะโลหะทองคำมีความอุดมสมบูรณ์น้อยมาก นับเป็นโลหะที่หายากอันดับสองรองจากธาตุอิริเดียมและความหายากนี้เองทำให้ราคาของทองมีค่าสูง



รูปที่ 3.1 ความอุดมสมบูรณ์ของโลหะมีค่าต่าง ๆ เทียบในลักษณะสเกล Log

3.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ตาราง 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทอง

เลขอะตอม	79
น้ำหนักอะตอม	196.9665
โครงสร้างผลึก	Face-centered cubic
สี	เหลือง
ความถ่วงจำเพาะ	19.32
ความหนาแน่น ที่ 20 °C (68 °F)	19320 kg/m ³ (0.69 lb/in ³)
จุดหลอมเหลว	1064.4 °C
จุดเดือด	2960 °C
ความร้อนจำเพาะ* ที่ 18 °C (64 °F)	0.1323 J/g °C (0.0316 cal/g °C)
ค่าการนำความร้อน* ที่ 0 °C (32 °F)	300 W/m °C (72 cal/m s °C)
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (20-100°C)	14.4 x 10 ⁻⁶ /°C
ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว	66.2 J/g (15.8 cal/g)
ความร้อนแฝงในการเป็นไอ	1738 J/g (415 cal/g)
ค่าการนำไฟฟ้า*	80% IACS* (ทองแดง 100%)
ความต้านทานจำเพาะ*	22 μΩ mm
สัมประสิทธิ์การต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ	0.0034/°C
ค่าศักย์ไฟฟ้า (Electrode Potential)	+ 1.498 V
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus)	80 x 10 ⁹ N/m ² (11.6 x 10 ⁶ lbf/in ²)
ความแข็งแรง*ในสภาพอ่อน	100 N/mm ² (7 tonf/in ²)
ความแข็งในสภาพอ่อน	30 DPN
ค่าความแข็งตาม Mohr' scale	2.5-3
Magnetic susceptibility	-0.15 x 10 ⁻⁶

หมายเหตุ: ค่า IACS = International annealed copper standard

3.3.1 โครงสร้างผลึกของโลหะทอง (Crystal structure of gold)

โครงสร้างผลึกของทอง เป็นโครงสร้างผลึกแบบ F.C.C. (Face centred cubic) ซึ่งอยู่ในกลุ่มของโครงสร้างผลึกที่เรียกว่า Cubic Close Packed จากรายงานของ J. Donohue [1] พบว่าโลหะทองคำบริสุทธิ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยเป็นโครงสร้างผลึก F.C.C. ตั้งแต่อุณหภูมิเยือกหลอมเหลวจนถึงอุณหภูมิ 1000°C ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลถึงค่าของ Lattice Parameter ในโลหะทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก วัดที่อุณหภูมิ 25°C

ตาราง 3.2 ข้อมูลโครงสร้างผลึกและ Lattice Parameter ของทองคำบริสุทธิ์

ความบริสุทธิ์ %Au	Lattice Parameter nm	เอกสารอ้างอิง
99.999	0.407894	1
99.99+	0.407887	2
99.999	0.407880	3

จากตารางที่ 3.2 ค่า Lattice Parameter เฉลี่ยของตารางนี้ คือ 0.407887 nm นอกจากนี้ พบว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า Lattice Parameter โดยมีค่า

$$\alpha = 13.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \text{ ในช่วง } 25\text{-}65^\circ\text{C} \quad [2]$$

$$\alpha = 17.29 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \text{ ในช่วง } 25\text{-}1000^\circ\text{C} \quad [3]$$

3.3.2 จุดหลอมเหลวของทองคำบริสุทธิ์

อุณหภูมิในการหลอมละลายทองคำบริสุทธิ์ คือ 1064.43°C หรือ $1337.58 \pm 0.15\text{K}$ เป็นค่าบน IPTS (International Practical Temperature Scale) ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการวัดด้วยไพโรมิเตอร์ที่ทันสมัยทำให้วัดค่าจุดหลอมเหลวของทองคำได้ $1337.22 \pm 0.16\text{K}$ ก็ตาม

3.3.3 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความจำเพาะของทองในโครงสร้าง F.C.C. หรือทองในสภาพของเหลวหรือก๊าซ สามารถหาได้จากสมการของค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) ดังต่อไปนี้

$$C_p = a + bT + cT^{-2} \text{ J/mol.k}$$

โดยค่าคงที่ a b และ c มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ ตามตารางที่ 3.3

ตาราง 3.3 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ความจุความร้อนจำเพาะของทองคำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

สภาพของทอง	a	b	c	อุณหภูมิ
ของแข็ง (F.C.C.)	22.63	$+6.36 \times 10^{-3}$	$+0.79 \times 10^5$	298 - 1337.58 K
ของเหลว (L)	33.35	-	-	1337.5 - 3200 K
ก๊าซ (g) [4]	20.79	-	-	-
ก๊าซ (g) [5]	22.26	-3.02×10^{-3}	$+1.5 \times 10^6$	-

3.3.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ในการผลิตโลหะทองคำบริสุทธิ์

ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) โลหะทองคำบริสุทธิ์สูงนี้เหมาะกับการขึ้นรูปทุกประเภท

3.3.5 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability)

การบัดกรีด้วยหัว Torch ใช้กับโลหะประสานที่มีธาตุเงินผสม ไม่จำเป็นต้องใช้ Flux และใช้กับเปลวไฟทุกชนิด

ในกรณีของการเชื่อมที่ใช้ Oxyacetylene ใช้กับทอง ไม่ต้องใช้ Flux และใช้ได้กับเปลวไฟทุกชนิด

ในกรณีใช้ในงานเชื่อมประเภท Resistance Weld ทุกประเภท

อุณหภูมิในการอบอ่อนคือ 300°C (575°F) แต่ปกติไม่จำเป็นต้องทำการอบอ่อนก็ได้

อุณหภูมิในการขึ้นรูปร้อน (Hot Working) สามารถใช้ได้ทุก ๆ อุณหภูมิที่มีค่าไม่เกินจุดหลอมเหลว

อุณหภูมิในการหล่อ 1100°C - 1300°C (2000°F - 2370°F)

3.4 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ

โลหะทองคำที่มีความบริสุทธิ์เกือบถึง 100% เราสามารถเรียกได้ว่าเป็นทองคำบริสุทธิ์ (Pure Gold) แม้ว่าจะมีสิ่งเจือปนอยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ทางการค้าโลหะที่มีปริมาณเนื้อทองมากกว่า 99.99% จะถูกเรียกว่าทองคำที่พิสูจน์แล้ว (Proof Gold)

ความบริสุทธิ์ (Fineness) คือ ปริมาณทองคำต่อ 1000 ส่วนของวัสดุนั้น บางครั้งใช้หน่วยวัดความบริสุทธิ์ที่เราเรียกกันว่า กระรัต (Carat or Karat, kt) ซึ่งแตกต่างจากกระรัตที่ใช้เป็นหน่วยวัดน้ำหนักของเพชรพลอย

สูตรที่ใช้คือ

$$\text{fineness xxx} = \text{xxx fine} = \text{xx.x\%Au by weight} = \frac{\text{xxx}}{1000} \times 100\%$$

ค่าความบริสุทธิ์ของทองสามารถแบ่งได้ตามหน่วยกระรัต ได้เป็น 7 ชนิดใหญ่ ดังแสดงไว้ในตารางที่

3.4

ตาราง 3.4 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในแบบต่าง ๆ

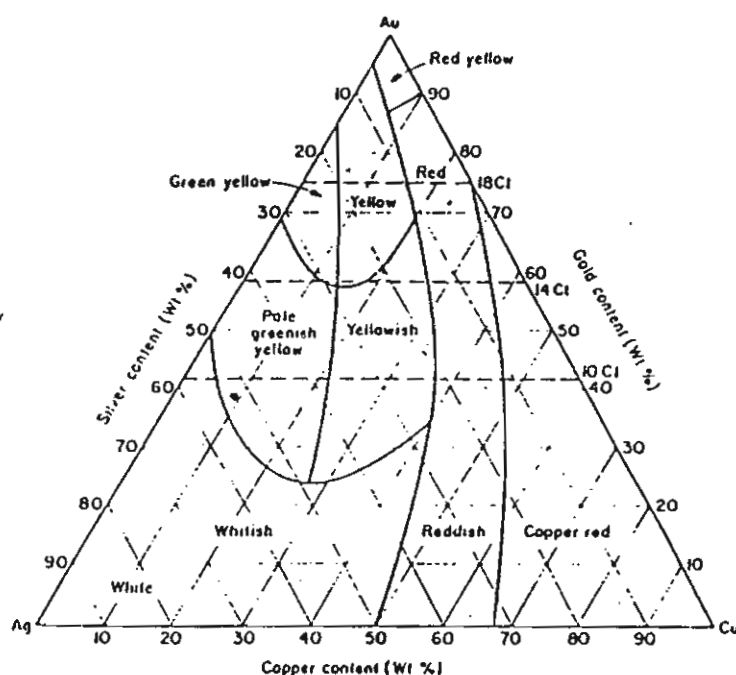
ปริมาณทองคำในเนื้อโลหะ	เปอร์เซ็นต์ของเนื้อทอง	ความบริสุทธิ์ (Fineness)	หน่วยกระรัต (kt หรือ k)
990/1000	99.0%	990	24
954/1000	95.4%	954	23
916/1000	91.6%	916	22
750/1000	75.0%	750	18
585/1000	58.5%	585	14
357/1000	35.7%	357	9
333/1000	33.3%	333	8

ข้อสังเกต จากตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า การเปรียบเทียบโดยใช้หน่วยกระรัต ทำได้โดยการแบ่งเนื้อทองบริสุทธิ์ 100% ออกเป็น 24 ส่วน ตัวอย่างเช่น ทองคำ 75% เท่ากับ 18 kt ยกเว้นในกรณี ทอง 24 kt จะให้ใช้กับโลหะทองที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 99.0% ขึ้นไป

มาตราวัดน้ำหนักทองในประเทศไทย ใช้หน่วยเป็นบาท มีค่าเท่ากับ 15.244 กรัม

3.5 สีของโลหะทองบริสุทธิ์และทองผสม

สีของโลหะทองบริสุทธิ์และทองผสมมีมากมายหลายสีตั้งแต่สีขาว เหลือง จนกระทั่งสีชมพูหรือสีแดงขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่าง ๆ โดยปกติในโลหะผสมกลุ่มทอง-เงิน-ทองแดง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตเครื่องประดับจะให้สีต่าง ๆ รูปที่ 3.2 แสดงถึงแผนภูมิสมมูลของโลหะผสมทอง-เงิน-ทองแดงที่บ่งบอกถึงสีต่าง ๆ ของโลหะผสม



รูปที่ 3.2 แสดงสีต่าง ๆ ของโลหะทองผสมเกรดต่าง ๆ

โลหะทองที่เป็นที่นิยมในประเทศจะเป็นทองที่มีส่วนผสมของธาตุทองสูงถึง 90% ขึ้นไป ถ้าดูจากแผนภูมิสมมูลแล้วพบว่า จะมีอยู่ 2 สีคือ สีเหลืองแดงและสีเหลือง ขณะที่ทองที่นิยมในต่างประเทศจะมีเกรดตั้งแต่ 9k ถึง 18k ซึ่งจะให้สีแตกต่างกันออกไป ตามส่วนผสมของธาตุเงินและทองแดง ถ้ามีปริมาณเงินอยู่มากก็จะให้สีเหลืองอ่อนหรือเหลืองอมเขียว ขณะที่ถ้าผสมทองแดงมากขึ้นก็จะให้สีเหลืองหรือแดง ส่วนทองเกรดต่ำกว่า 9k ลงมาไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้เพราะสีเหลืองของทองคำจะหมดไป ทำให้เหมือนไม่มีทองผสมอยู่ ดังนั้น ผู้ซื้อจึงนิยมใช้โลหะเงินผสมทองแดงแทน

ผู้ประกอบการผลิตเครื่องประดับในไทย มีอยู่ 2 กลุ่ม คือผลิตเพื่อขายในประเทศ กับผลิตเพื่อส่ง
ออกต่างประเทศ การผลิตในประเทศผู้ประกอบการนิยมที่ จะผลิตให้ได้ปริมาณเนื้อทองสูง เพราะค่านิยม
ของคนไทยชอบเครื่องประดับทองที่มีเนื้อทองสูง ดังนั้นผู้ผลิตจะผลิตทองที่มีเนื้อทอง 90% สำหรับงาน
ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการหล่อ .ในกรณีงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปจะมีเนื้อทองถึง 96.5% ถ้าเติมเนื้อทอง
มากกว่านี้ทองที่ได้จะมีความแข็งแรงต่ำ และทนต่อการเสียดสี ในช่วงใช้งานได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามในบ้าน
เรา ก็มีการนำเทคโนโลยีจากต่างประเทศมาใช้ ทำให้สามารถผลิตทองที่มีเนื้อทองสูงถึง 99% และยังคง
ความแข็งแรงอยู่ได้ หรือมีจะนั้นก็อาศัย การออกแบบที่สวยงาม ทันสมัย และการบริการหลังการขายที่ดี มี
คุณภาพ เป็นส่วนช่วยในการจูงใจให้ผู้บริโภคซื้อสินค้า ในกลุ่มผู้ประกอบการที่ผลิตเพื่อส่งออกต่าง
ประเทศมีการผลิตทองทุกประเภท และทุกสี แต่จะเน้นทองที่มีกะรัต ตั้งแต่ 9-18 กะรัต สีที่สามารถทำได้
ในประเทศ มีสีที่อยู่ในระบบทอง-เงิน-ทองแดง ตามแผนภูมิรูปที่ 3.2 และยังสามารถผลิตทองคำสีอื่น ๆ อาทิ
ทองคำสีขาว ทั้งประเภทที่ผสมนิกเกิล และปราศจากนิกเกิล (Nickel-free white gold) โดยใช้ ธาตุ แพ
ลลาเดียมมาผสมแทน

ทองคำเกรด 18k ที่นิยมใช้ในประเทศส่วนใหญ่มีเนื้อเงิน 5-15% และทองแดง 5-10% ทองคำเกรด
14k จะมีสีเหลืองแกมแดง ซึ่งจะมีส่วนผสม 58.5% Au-16.5%Ag-25%Cu ในขณะที่ต่าง-ประเทศนิยมใช้
ทอง 14k สีขาวแกมเขียวส่วนผสมเป็น 58.5% Au-30% Ag และ 11.5% Cu

ตาราง 3.5 แสดงส่วนผสมกะรัตและสีของทองผสมที่นิยมใช้

กะรัต	สี	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
		ทอง	เงิน	ทองแดง	สังกะสี
22	แดงอ่อน	91.66	-	8.34	-
22	เหลือง	91.66	6.20	2.14	-
22	เหลืองจาง	91.66	8.34	-	-
22	เหลืองเข้ม	91.66	1.23	7.11	-
18	เหลืองเข้ม	75.00	9.00	16.00	-
18	เหลือง	75.00	20.00	5.00	-
9	เหลืองอมแดง	37.50	12.48	46.58	3.50
9	แดงอมเหลือง	37.50	5.50	53.50	3.50

3.6 อิทธิพลของธาตุผสม (Effects of alloying elements)⁴

ธาตุผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ธาตุผสมหลัก (Major Alloying Elements) และธาตุผสมรอง (Minor alloying elements) ธาตุผสมหลักได้แก่ เงิน ทองแดง และธาตุผสมรองอื่น เช่น สังกะสี นิกเกิล ฯลฯ

ธาตุผสมหลักจะถูกเติมใส่ลงในเนื้อทองในปริมาณมาก สีของโลหะทองบริสุทธิ์และทองผสมมีมากมายหลายสีตั้งแต่สีขาว เหลือง จนกระทั่งสีชมพูหรือสีแดง ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่าง ๆ โดยปกติโลหะที่นิยมใช้ในการผลิตเครื่องประดับทอง จะเติมธาตุผสมเข้าไป เช่น ในโลหะผสมกลุ่มทอง-เงิน-ทองแดง สีต่าง ๆ ของโลหะผสมในกลุ่มนี้ สามารถผลิตได้โดยเปลี่ยนส่วนผสมของเงินและทองแดงดังรูปที่ 3.2 ที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากธาตุผสมจะมีอิทธิพลทำให้สีของโลหะทองผสมเปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองผสมด้วย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตาราง 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของธาตุผสม สีและคุณสมบัติที่เกิดขึ้นในโลหะ

ชนิดของธาตุ	สีที่เปลี่ยนแปลงไป (ในกรณีมีปริมาณธาตุผสมสูง)	บทบาทต่อคุณสมบัติของโลหะผสม
ทองแดง (Copper)	สีแดงหรือสีชมพู	ตัวเพิ่มความแข็ง
เงิน (Silver)	ขาว	ตัวเพิ่มความแข็ง (<Cu) และความต้านทานการกัดกร่อน
สังกะสี (Zinc)	ขาว	ตัวลดการเกิดออกซิเดชัน
นิกเกิล (Nickel)	ขาว	ตัวเพิ่มความแข็งอย่างมากแต่ทำให้สีของทองคำเป็นขาวเร็ว
แพลลาเดียม	ขาว	เพิ่มความแข็งไม่มากเมื่อเทียบกับนิกเกิล แต่ทำให้สีขาวเกิดไว

*หมายเหตุ : ธาตุหลัก แมงกานีส โคบอลต์ และอินเดียม เมื่อเติมเข้าไปในโลหะจะทำให้เกิดสีขาวเหมือนเดิมด้วย แพลตตินัม แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับใช้กันในการผลิตเครื่องประดับ

เงิน เพิ่มความแข็งให้กับทองไม่มากนักเมื่อเทียบกับทองแดง

ทองแดง เพิ่มความแข็งโดยกรรมวิธี Order Hardening หรือ Precipitation Hardening

ในกรณีของโลหะทองผสมเงินและทองแดงเกรด 18 กะรัต เมื่อผ่านการลดขนาดต่าง ๆ กัน ปริมาณของทองแดงที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและให้สีของเนื้อโลหะแตกต่างกัน โดยความแข็งของโลหะผสมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงสูงขึ้น นอกจากนี้ผลของการลดขนาดก็มีส่วนเพิ่มความแข็งโดยกลไกของ Work hardening ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7

⁴ ในเอกสารประกอบการบรรยายหัวข้อที่ 1 และบทความเพื่อเผยแพร่ ในหนังสือชื่อ "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ"

ตาราง 3.7 แสดงถึงผลของธาตุทองแดงในปริมาณต่าง ๆ ในโลหะทอง-เงินทองแดง 18 กระรัต หลังผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด 15% 30% และ 60%

สีของโลหะผสม	ปริมาณทองแดง (%)	ความแข็งแบบบริเนลหลังจากผ่านการลดขนาดต่าง ๆ กัน		
		15%	30%	60%
แดงเข้ม	2.50	143	178	202
แดงส้ม	21.4	156	177	205
เหลืองอมแดง	16.7	166	176	197
เหลือง	12.5	148	160	182
เหลืองอมเขียว	8.3	141	149	176
เขียวอมเหลือง	3.6	114	127	138
เขียวอมเหลืองจาง	0.0	69	78	93

นิกเกิล เพิ่มความแข็งแรง และเป็นธาตุหลักในการทำทองคำสีขาว นอกจากใช้ผสมในทองแล้วยังใช้เป็นโลหะเคลือบผิวทองแดงก่อนเคลือบด้วยทองเพื่อป้องกันทองแพร่เข้าไปในทองแดง

แพลตตินัม เพิ่มความแข็งแรงให้กับทองได้ด้วยวิธีทางความร้อนแบบการบ่มด้วยความร้อน (Ageing Treatment) อุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 300-400°C โลหะผสมชนิดนิยมใช้สำหรับทำเครื่องประดับชุบเคียวเรติ และโลหะที่ใช้อุดฟัน

สังกะสี ถูกใส่ในโลหะทองในรูปของทองเหลือง มีส่วนช่วยในด้านการเชื่อมประสานและช่วยในด้านสีสรรสวยงาม

แพลลาเดียม เพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรงเหมือนกับแพลตตินัม นอกจากนี้ยังใช้เป็นธาตุผสมที่สำคัญในการผลิตทองคำสีขาว โดยใช้แทนนิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลในวงการแพทย์ พบว่าเป็นโลหะที่ทำให้เกิดอาการแพ้ที่ผิวหนังของมนุษย์ได้ ด้วยสาเหตุนี้ในอนาคตโลหะนิกเกิลจะถูกเลิกใช้ และหันมาใช้โลหะ แพลลลาเดียมมากขึ้น

โรเดียม เป็นธาตุที่นำมาใช้เคลือบผิวของแบบจำลอง เพื่อให้ได้ผิวที่แข็งที่เรียบเหมาะนำไปใช้ในการเททองต่อไป

แดคเมียม ใส่ในโลหะทองที่มีสีออกเขียวหรือตัวประสานที่มีทองผสมเงิน เนื่องจากมีจุดหลอมเหลว 320°C

ดีบุก ใช้สำหรับเป็นธาตุผสมในตัวประสานเงินเนื่องจากจุดหลอมเหลว 232°C

ข้อควรระวังในการใช้ทอง

ในการหลอมทองควรหลีกเลี่ยงการเกิด Contamination โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตะกั่ว บิสมีท

ในกรณีที่โลหะทองมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ในปริมาณน้อย ช่วงตั้งแต่หลายส่วนในล้านส่วน (ppm) ถึง ส่วนในร้อยส่วน (เปอร์เซ็นต์) ธาตุเหล่านี้อาจจะให้เกิดผลดีหรือผลเสียขึ้นต่อคุณสมบัติต่างๆ ของโลหะทองผสมได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุชนิดนั้นที่มีอยู่ในโลหะ ตัวอย่างเช่น ธาตุอิริเดียม รูทีเนียม สังกะสีหรือแม้แต่ซิลิคอน ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหล่อของโลหะ อย่างไรก็ดีตาม ถ้าใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องก็ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ ธาตุที่อยู่ในเนื้อโลหะในปริมาณที่น้อยจะเรียกว่าธาตุผสมรอง (Minor Alloying Element)⁵ ในขณะที่ธาตุที่มีผลเสียซึ่งไม่ต้องการให้มีอยู่ในเนื้อโลหะแต่ยากที่จะขจัดออกได้ เรียกว่า สารเจือปน (Impurities)

ธาตุผสมรองส่วนใหญ่ที่ผสมเข้าไปในเนื้อทองมักจะไม่เกิน 1% โดยน้ำหนักและจะไม่ส่งผลให้สีของโลหะทองผสมเปลี่ยนแปลงไป แต่จะเปลี่ยนคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ทำให้ขนาดของเกรนเล็กลงมากเกินไป หรือช่วยลดการเกิดออกซิเดชันในขั้นตอนการหล่อโลหะได้ และอื่นๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตาราง 3.8 อิทธิพลของธาตุผสมรองและสิ่งเจือปนที่มีผลต่อโลหะทองผสม

ชนิดของธาตุ	ตัวลด ขนาดเกรน	ตัวเพิ่ม ขนาดเกรน	ความสามารถ ในการหล่อ	Embrittlement	ตัวเพิ่ม ความแข็ง	ตัวลดออกซิเจน
อิริเดียม	/			x		
รูทีเนียม	/					
ซิลิคอน		x	/	x		/
โคบอลต์	/				/	
สังกะสี			/			/
ตะกั่ว				x		
แบเรียม	/					
ไทเทเนียม					/	
แคลเซียม	/				/	
แวนาเดียม	/			x	/	
แกดเลียม				x	/	
บิสมีท	/					
เหล็ก		x				
โบรอน	/		/			/
ฟอสฟอรัส				x		/

/ หมายถึงธาตุที่เติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ x หมายถึงธาตุที่มีผลเสียหรือเป็นสิ่งเจือปน

⁵ รายละเอียดเกี่ยวกับธาตุผสมรองอยู่ในภาคผนวก

3.6.1 ธาตุผสมที่มีผลต่อการปรับขนาดเกรน (Grain refiners)

ตัวปรับขนาดเกรน (Grain Refiner) มีหน้าที่ทำให้ขนาดเกรนเล็กลงส่งผลให้ผิวของโลหะหลังการขึ้นรูปมีผิวเรียบ ถ้าไม่ใส่ตัวปรับขนาดเกรนนี้จะทำให้มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าผิวเปลือกส้ม (Orange Peel) ได้ง่ายขึ้น

ตัวปรับขนาดเกรนแบ่งได้ 2 ชนิด โดยทั้งสองชนิดมีวัตถุประสงค์ในการเติมคือ ปรับขนาดของเกรนให้เล็กลงเพื่อยืดหรือรักษารูปร่างของเกรนไม่ให้ใหญ่ขึ้น ชนิดที่ 1 ลดขนาดของเกรนในการหล่อ ชนิดที่ 2 รักษาขนาดขอบเกรนให้เล็กในการอบอ่อน (Annealing)

ชนิดที่ 1 ตัวปรับขนาดเกรนในขั้นตอนการหล่อโลหะผสม

เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวจะมีกลไกการสร้างผลึกหรือเกรนเกิดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีนิวเคลียสเกิดขึ้นก่อน วิธีที่จะเพิ่มจำนวนของนิวเคลียสก็คือการเติมธาตุหรือสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะ ธาตุหรือสารประกอบเหล่านี้ต้องไม่ละลายรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับโลหะหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดลงจึงเป็นของแข็งแขวนลอยหรือในอีกกรณีธาตุผสมต้องมีความสามารถในการละลายในโลหะผสมได้ต่ำ มันจะเกิดการแยกตัวออกมาก่อนที่โลหะหลอมเหลวจะเริ่มการแข็งตัว นั่นก็คือการสร้างนิวเคลียสเทียมจำนวนมากให้กับโลหะหลอมเหลว นิวเคลียสเหล่านี้ต้องมีขนาดเล็กและกระจายอยู่ทั่ว ๆ ในโลหะหลอมเหลว ธาตุที่ใช้เป็นตัวปรับเกรนในลักษณะนี้ได้แก่ นิกเกิล โคบอลต์ แมงกานีส เหล็ก รินเนียม อิริเดียม รูทีเนียม โรเดียม โบรอน โดยปกติทั่วโลกเกือบ 95% ใช้ธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ อย่างไรก็ตาม ธาตุแมงกานีสมีประสิทธิ-ภาพมากแต่ยากที่จะควบคุม ในกรณีของเหล็กเป็นธาตุที่ใส่เข้าไปแล้วจะมีผลทำให้ควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพได้ยาก

ธาตุอิริเดียม

อิริเดียมเป็นธาตุผสมที่ใช้มากในโลหะทองผสม เพียง 0.1% หรือน้อยกว่า ก็สามารถเป็นตัวปรับขนาดเกรนได้ การเพิ่มประสิทธิภาพทำได้โดยการเติมธาตุอิริเดียมในรูปของ Master Alloy ที่ผสมระหว่างทองแดงกับอิริเดียม ในกรณีเติมธาตุอิริเดียมมากกว่า 0.1% ไม่สามารถปรับขนาดเกรนให้ละเอียดลงได้

ธาตุรูทีเนียม

รูทีเนียมปรับขนาดได้ดีเยี่ยมในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0.001 ถึง 0.1% การเติมธาตุผสมชนิดนี้มากเกินไปก็มีผลต่อการขัดเงาขึ้นงาน รูทีเนียมต้องใส่เข้าไปในลักษณะ Master Alloy และต้องควบคุมให้ธาตุผสมกระจายตัวสม่ำเสมอในโลหะหลอมเหลวด้วยวิธีการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงเพียงพอเป็นระยะเวลา นาน

ธาตุโคบอลต์

โคบอลต์เป็นตัวปรับเกรนในโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนมา แต่ในด้านการหล่อโคบอลต์ถูกพบว่ามีข้อจำกัดบางอย่างอยู่ ในโลหะทองบริสุทธิ์ ธาตุโคบอลต์สามารถละลายได้ในเนื้อทองประมาณ 8.4% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิยูเทคติก 996°C จุดหลอมเหลวของธาตุโคบอลต์อยู่ที่ 1495°C และทองอยู่ที่ 1064.43°C แม้ว่าธาตุโคบอลต์จะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าทองก็ตาม แต่ความสามารถในการละลายของธาตุโคบอลต์ในเนื้อทองมีสูงถึง 8.4% โดยน้ำหนัก และไม่ปรากฏว่ามีสารประกอบระหว่างทองและโคบอลต์อยู่ในแผนภูมิสมดุลเลย ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดสารแขวนลอยหรือนิวเคลียสเทียมขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของโลหะ ในกรณีทองบริสุทธิ์ ธาตุโคบอลต์จึงไม่เหมาะที่จะเป็นตัวปรับขนาดเกรน แต่โลหะในระบบทอง-เงิน-ทองแดง ธาตุเงินและธาตุทองแดงลดความสามารถในการละลายของโคบอลต์ในโลหะทองผสมได้อย่างดีทีเดียว ดังนั้น ในโลหะทองกะรัตต่ำ เช่น 14 กะรัต ปรากฏว่าโคบอลต์ 0.5% หรือมากกว่าจะเกิดเป็นตะกอนซึ่งสามารถปรับขนาดเกรนของโลหะได้

ชนิดที่ 2 ตัวปรับขนาดเกรนในขั้นตอนการอบอ่อนด้วยความร้อน

การอบด้วยความร้อนหมายถึงการทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) หรือที่เรารู้จักกันดีว่าการอบอ่อน (Soft Annealing) หลังจากที่ยังงานผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปมาแล้ว โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนรูปเมื่อนำมาอบด้วยความร้อนจะเกิดเกรนใหม่ขึ้น การปรับขนาดเกรนในกรณีนี้เกิดขึ้นได้จากการมีจำนวนของนิวเคลียสที่มากพอและการป้องกันการโตของเกรนที่เกิดขึ้นใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ

ธาตุโคบอลต์

โคบอลต์สามารถละลายในเนื้อทองได้ถึงประมาณ 8.4% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิอบอ่อน 600°C ดังนั้น การป้องกันการโตของเกรนที่อุณหภูมิ 600°C นี้จะต้องใส่ธาตุโคบอลต์ผสมลงไปเกินกว่า 8.4% โดยน้ำหนัก จึงจะมีผลในการปรับขนาดเกรนได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของโคบอลต์ที่ใช้สูงมากจึงทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้กับโลหะทองผสมกะรัตสูงมาก ๆ แต่ในโลหะทอง 14 กะรัตและ 18 กะรัต ธาตุโคบอลต์เหมาะสมที่จะนำมาใช้ปรับขนาดเกรนเพราะความสามารถในการละลายต่ำ ทำให้เกิดการแยกตัวของเฟสโคบอลต์ออกมาได้ง่ายขึ้น

3.6.2 ธาตุผสมที่มีผลต่อการหล่อโลหะทองผสม (Additions in casting alloys)

ตัวลดออกซิเจน (Deoxidizers)

ธาตุผสมที่มีผลต่อการลดการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเรียกดธาตุเหล่านี้ว่าตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer) ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับธาตุเงินและทองแดงได้ง่ายแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับทอง ในกรณีโลหะทองผสมกะรัตต่ำหรือมีปริมาณทองแดงในโลหะมาก การใช้ตัวลดออกซิเจนเพื่อป้องกันการเกิด

ออกไซด์ ก็จำเป็นมากขึ้น ธาตุที่เป็นตัวลดออกซิเจน ในกรณีนี้จะมีหน้าที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแทนทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้แก่ สังกะสี ซิลิคอน โบรอน และฟอสฟอรัส

ธาตุสังกะสี

การใส่สังกะสีลงไปทำให้เกิดสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นควันสีขาวและทำให้ทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นออกไซด์ไม่ได้ นอกจากนี้ ปริมาณสังกะสี 1-2% ช่วยทำให้ผิวเรียบสวยงามและทำให้ผิวเงาขึ้นด้วย แม้ว่าจะดูในสภาพก่อนนำไปกัดผิวด้วยกรดก็ตาม

ธาตุซิลิคอนและโบรอน

ธาตุทั้งสองนี้จะไวต่อการเกิดออกไซด์ขึ้นมากกว่าธาตุสังกะสี แต่การใส่ซิลิคอนมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกขึ้นได้โดยเฉพาะในการผลิตหลอดโลหะ นอกจากนี้ใช้เป็นตัวลดออกซิเจนแล้ว ซิลิคอนยังทำให้ผิวเงาขึ้นด้วย เนื่องจากมีแรงดึงผิวเกิดขึ้นทำให้เนื้อโลหะมีผิวเงาสวยงาม

ธาตุฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่นับว่าเป็นตัวลดออกซิเจนที่แรงที่สุด อย่างไรก็ตามธาตุนี้อันตรายอย่างยิ่งถ้าปริมาณที่ใช้มากเกินไปเพียงเล็กน้อย เช่น ก่อให้เกิดแตกขณะร้อน (Hot Shortness) และทำให้เปราะมาก ฟอสฟอรัสไม่ทำให้เกิดความเงาหรือผิวเรียบ ดังนั้น ความเรียบของ ผิวขึ้นกับความเรียบของแบบหล่อซึ่งฟอสฟอรัสนี้ไม่มีมีคุณสมบัติด้อยกว่าซิลิคอน

3.6.3 อิทธิพลของสารเจือปน (Impurities)

สารเจือปนคือธาตุที่อยู่ในรูปโลหะหรืออะโลหะที่ ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อวัสดุ โดยที่แยกออกได้ยาก หรือไม่สามารแยกออกจากวัสดุได้ และสารเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติต่าง ๆ

1) สารเจือปนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและก่อให้เกิดการแตกเปราะ

สารเจือปนที่จะเกิดเป็นสารจุดหลอมเหลวต่ำได้นั้นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ธาตุที่เป็นสารเจือปนต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีความสามารถในการละลายต่ำในโลหะ-ทองผสม
2. ธาตุเหล่านี้สามารถเกิดอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและเป็นสารประกอบที่มีธาตุหลัก เช่น ทอง เงิน ทองแดง ผสมอยู่ด้วย

ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้แก่ อินเดียม แกลเลียม และซิลิคอนที่ผสมเข้าไปแล้วทำให้ได้โครงสร้างยูเทคติกที่จุดหลอมเหลวต่ำ ธาตุดังกล่าวใส่เข้าไปในฐานะเป็นธาตุผสมที่มีประโยชน์ต่อโลหะ แต่ในกรณีสารเจือปนซึ่งมีโทษต่อโลหะ ได้แก่ ตะกั่ว บิสมาท ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส

2) ธาตุที่มีอิทธิพลทำให้เกรนขนาดใหญ่หยาบ (Grain Coarsener)

โดยปกติการปรับขนาดเกรนให้เล็กลงจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีธาตุผสมหรือสารเจือปนมีอิทธิพลต่อขนาดของเกรนผสมอยู่ในเนื้อวัสดุ แต่บางครั้งในโลหะผสมธาตุบางชนิดจะเกิดผลตรงกันข้าม เช่น ซิลิคอนทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีอีก 2 ธาตุคือเหล็กและโครเมียม ธาตุทั้งสองก่อให้เกิดการโตของเกรนที่มีขนาดใหญ่ในขั้นตอนของการอบอ่อน ปริมาณของธาตุเหล็กหรือโครเมียมเพียง 0.3-0.5% ก็ส่งผลรุนแรงทำให้เกรนขยายใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในเครื่องประดับ

3) ธาตุที่มีอิทธิพลต่อโลหะในด้านอื่น ๆ

อินคลูชันหรือมลทิน (Inclusion) ของแบบปูนหรือตะกรัน (Slags) นับว่าเป็นสารเจือปนซึ่งไม่ได้เป็นส่วนผสมของโลหะผสม อย่างไรก็ตาม โลหะออกไซด์ เช่น ทองแดงออกไซด์ อาจจะนับได้ว่าเป็นทั้งมลทินหรือส่วนผสมของโลหะผสมที่เกิดเป็นออกไซด์ก็ได้ มีรายงานว่าทองแดงออกไซด์ก่อให้เกิดโพรงก๊าซในการหล่อแบบปูน การอบอ่อนวัสดุที่มีออกไซด์หรือออกซิเจนในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนอยู่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การแตกหักแบบ Blister ได้เนื่องจากการรวมตัวของออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็นไอน้ำ ซัลเฟอร์ก็เป็นอีกธาตุหนึ่งที่สามารถอยู่ในรูปของทองแดงซัลไฟด์หรือเงินซัลไฟด์ที่ก่อให้เกิดโพรงก๊าซขึ้นในชิ้นงาน

3.7 การควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นจากการหล่อ⁶

การหล่อแบบ Investment Casting หรือ Lost Wax Casting เป็นการหล่อที่ได้ ใช้นิยมใช้ ในการผลิตทองรูปพรรณ (Gold Jewellery) เนื่องจากวิธีนี้ให้ความแม่นยำในเรื่องของขนาด (Dimension) พื้นผิวงานหล่อที่มีคุณภาพดี และมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อโลหะในแบบอื่น ๆ ทองรูปพรรณชนิดที่ได้รับความนิยมในการผลิตมากที่สุดคือทองผสม 18 กะรัต ทอง-เงิน-ทองแดง ซึ่งประกอบด้วยทอง 75% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสูตรของส่วนผสมทางเคมีคือ $\text{Au}_{75}\text{Ag}_{12.5}\text{Cu}_{12.5}$ อุณหภูมิหลอมเหลว 891°C และมีความหนาแน่น 15.45 g/cm^3 สาเหตุที่ได้รับความนิยมเนื่องมาจากสีเหลืองที่มีความเป็นเฉพาะของมัน ความต้านทานต่อการหมองและการกัดกร่อน (Tarnishing and Corrosion) ที่ดี และคุณสมบัติทางกลที่ดี ในขณะที่เดียวกันก็ยังมีทองผสมที่ได้รับความนิยมในการผลิตอีกก็คือทองผสม 14 กะรัต 20 กะรัต และ 22 กะรัต และถึงแม้ว่าการผลิตทองรูปพรรณด้วยวิธีการหล่อจะเป็นที่แพร่หลาย แต่การศึกษาในแง่เทคนิคในการหล่อต่าง ๆ เช่น การออกแบบระบบทางวิ่ง (Gating) การหลอมโลหะ (Melting) และการเทน้ำโลหะ (Pouring) มีไม่มากนัก โดยส่วนมากเทคนิคในการหล่อต่าง ๆ จะแตกต่างกันไปขึ้นกับผู้ผลิต และเทคนิคต่าง ๆ เหล่านี้ก็เป็นสิ่งปกปิดของผู้ผลิตแต่ละราย

ปัจจุบันนี้การผลิตเครื่องประดับทองได้มีการปรับปรุงทั้งอุปกรณ์เครื่องมือในการผลิต วัสดุดิบ และกระบวนการผลิตอย่างมากมาย เพื่อพัฒนาและผลิตเครื่องประดับที่มีคุณภาพและลดความเสียหาย ข้อ

⁶ Gold Technology vol 22 จัดทำโดยสมาพันธ์ผู้ผลิตทองคำแห่งโลก (World Gold Council)

บกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในการผลิต เช่น การเติมธาตุผสมเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล หรือลดปริมาณฟองก๊าซในเนื้องานหล่อ ดังนั้นในตอนนี้จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมคุณภาพการหล่อทอง ซึ่งหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมเครื่องประดับของไทย

การผลิตใด ๆ หากมีอัตราการเกิดของเสียมาก กระบวนการผลิตนั้นไม่เกิดผลกำไรและแน่นอนกฎเกณฑ์นี้ก็คลุมไปถึงการทำเครื่องประดับต่าง ๆ ด้วย การทำเครื่องประดับมีปัญหาพิเศษเฉพาะในเรื่องของเสีย ในประการแรกผิวของเครื่องประดับจะต้องผุดผ่องไม่มีตำหนอง ดังนั้นการป้องกันไม่ให้เกิดรูพรุนและผิวเครื่องประดับต้องเรียบสวยย่อมเป็นเรื่องสำคัญ มีรายงานตัวเลขสถิติของเสียจากตัวอย่างมากกว่า 100 กรณี ซึ่งพิสูจน์ว่าประมาณ 50% ของการชำรุดเกิดเพราะผิวเป็นรู 80% สาเหตุของการชำรุดเกิดจากการหล่อ ดังนั้นขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ดีเพื่อลดปริมาณของการเสียและเพิ่มกำไร มีวิธีการอยู่ 3 ขั้นตอน กล่าวคือ

- จุดจำชนิดของการชำรุด
- พิจารณาดันเหตุ
- หาวิธีที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้น

3.7.1 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อวัสดุ (Inclusions)

สาเหตุของสิ่งแปลกปลอมทั้งหมดสามารถแยกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

ก. มีสิ่งแปลกปลอมเล็ก ๆ (Particle) จากภายนอกมาปน เช่น ชิ้นส่วนของปูนทำแบบ (Particle of Investment)

ข. สิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากปฏิกิริยาของโลหะทอง ธาตุอื่น (เช่น ออกไซด์และซัลไฟด์ของเงินและทองแดง)

ชิ้นส่วนแปลกปลอมมักทำให้เกิดจุดแข็งบ่อและเป็นรอยเป็นทางยาว (Comet Tracy) ชิ้นส่วนของปูนแบบอาจจะมิดันกำเนิดมาจาก

- การนำโลหะมาหลอมใหม่ของวัสดุที่ปนเปื้อน
- แบบปูนที่ไม่แข็งแรงหรือปูนแบบคุณภาพต่ำ
- ขอบเบ้าที่เจาะรูสำหรับเทน้ำโลหะแหลมคม จะทำให้ขอบแตกชำรุดเมื่อน้ำโลหะไหล

มากระทบ

สาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่เกิดเสมอ คือการใช้เบ้าที่ไม่สะอาดเศษของตะกั่วสามารถทำให้เกิดปัญหา และเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นผลิตภัณฑ์ ตะกั่วที่พบอาจจะเป็นสารผสมของ อลูมิเนียมและทองแดงซิลิเกต เป็นต้น

การหลีกเลี่ยงการเกิดสิ่งแปลกปลอม

ปัจจัยสำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงการชำรุด คือ

ก. มีแบบหล่อที่แข็งแรงเพียงพอ (Sufficient Strength of Investment)

ข. ดันเทียนมีบริเวณแหลมคมน้อย

ค. ทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอมใหม่

ง. เบ้าหลอมต้องสะอาดและแข็งแรง

ควรใช้เบ้ากราไฟต์เสมอสำหรับหลอมทองคำสีเหลืองโดยที่ไม่ต้องเติมผงประสาน (Flux)

เพื่อป้องกันออกซิเจนเข้าไปในน้ำโลหะระหว่างการหลอมให้ใช้ก้อนถ่านวางบนผิวหน้าก็ได้

เบ้า Clay Graphite หรือเซรามิกซ์ จะเป็นอันตรายเมื่อเบ้าสึก เนื่องจากเบ้าจะลดความแข็งแรงเมื่อกราไฟต์ถูกเผาออกไป การสะสมตัวของผงประสานและตะกวนเป็นอันตรายอีกอย่างหนึ่ง การเปลี่ยนเบ้าหลอมตามระยะเวลาเป็นนิสัยที่ดี ซึ่งจะทำให้ประหยัดเงินเนื่องจากการลดของเสีย

3.7.2 ของเสียที่สืบเนื่องจากการหล่อแบบแทนซีฝั่ง (Investment casting)

ของเสียหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานผลิตภัณฑ์จากการหล่อแบบนี้ ที่ไม่ได้มีสาเหตุจากสิ่งแปลกปลอมหรือสารปนเปื้อน ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 3.71. สามารถแยกออกได้เป็นสองกลุ่มหลัก คือ

Group A

คราบน้ำ (Water marks)

ผิวหน้าหยาบ (Sandy Surface)

มีครีบ (Fins)

มีเม็ด (Beads)

กลุ่ม A เกือบทั้งหมดเป็นผลจากกรรมวิธีผลิตที่ไม่สมบูรณ์

กลุ่ม B เป็นปัญหาที่สำคัญมากที่สุดและไม่สามารถเชื่อมโยงถึงแหล่งกำเนิดเพียงอย่าง

เดียว (Single Origin)

Group B

รูพรุน

Dendritic Surface

คราบน้ำ (Water marks)

คราบน้ำไม่เรียบบนผิวหน้าของชิ้นหล่อ ซึ่งวิ่งตามแนวตั้งจากบนลงล่าง เกิดจากกระหว่างที่แบบ (Flask) ถูกเทให้เต็มด้วยโลหะ รอยคราบน้ำจะยิ่งปรากฏชัดบนโลหะแผ่นแบน

สาเหตุของการเกิดของการเกิดคราบน้ำ คือ

ผงปูนเมื่อผสมน้ำมีแนวโน้มที่จะแยกตัวออก ถ้าหากส่วนผสม (Slurry) ถูกทิ้งไว้นิ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานก่อนการแข็งตัว การกวนเท่านั้นป้องกันการแยกตัว ถ้าหากการแยกตัวเกิดขึ้นน้ำที่รวมตัวบนผิวขึ้นฝั่ง จะปรากฏรอยขึ้นบนชิ้นงาน

การป้องกันการเกิดคราบน้ำ

ผงปูนแต่ละรุ่น (Investment Powder) มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน ซึ่งรวมเวลาดังแต่ปูนสัมผัสน้ำ จนถึงจุดแข็งตัวโดยเฉลี่ยกินเวลา 12 นาที แต่เวลานี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของน้ำ (น้ำกลั่นหรือน้ำประปา ซึ่งแปรตามความกระด้างของน้ำ) เพื่อป้องกันรอยคราบน้ำ (Water Marks) กรรมวิธีผสมปูน (การผสม โล่ฟองอากาศการใส่ลงเบ้า การสั่นสะเทือน) จะต้องรีบทำภายในเวลากำหนดทั้งหมดก่อนการแข็งตัว

การกะประมาณเวลาแข็งตัวอาจจะสังเกตความเงาหายไป (Gloss of Time) ซึ่งเป็นเวลาที่นับจากการสัมผัสครั้งแรกของน้ำ กับเวลาที่มีความเงาหายไป ผิวของปูนผสมน้ำในแบบจะหมดความเงาเมื่อการแข็งตัวเริ่มขึ้น

ผิวหน้าหยาบและมีครีบ (Sandy Surface and Fins)

สาเหตุของการเกิดผิวหยาบ

ในกรณีที่โลหะหลอมไหลในรูปของปูน (Investment) ผิวของชิ้นหล่อจะมีลักษณะหยาบ (Sandy) และในกรณีที่ปูนหล่อแตกเนื่องจากมีแรงดันในน้ำโลหะมาก จะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อมีครีบเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากน้ำโลหะซึมลงในรอยร้าวของแบบหล่อ และครีบมักเกิดขึ้นบ่อยตรงตำแหน่งด้านหน้าตัดหน้าของชิ้นหล่อ ความเสียหายทั้งสองอย่างเกิดจากใช้ปูนหล่อที่มีแรงยึดตัวต่ำ และหรือใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไประหว่างการหลอม (เครื่องเหวี่ยงใช้ความเร็วสูงเกินไป)

สาเหตุและการป้องกัน

ส่วนใหญ่การชำรุดเกิดจากการใช้ปูนหล่อ ที่มีลักษณะเหลวมากเกินไป ซึ่งมาจากสาเหตุ คือ

1. อัตราส่วนของน้ำกับปูนสูงไป
2. อุณหภูมิในการเผาปูนยับยั้งสูงกว่า 750°C
3. ผงปูนรุ่นนั้นเสื่อมคุณภาพไม่ดี

เม็ดโลหะบนผิวงาน

การเกิดเม็ดโลหะ (Beads) บนผิวงาน เนื่องจากมีฟองอากาศอยู่ที่ผิวแบบซึ่งฝังระหว่างการหล่อ ถ้าการหล่อมิได้ทำในสุญญากาศ อากาศจะติดเข้าไประหว่างการกวาดอากาศจะติดอยู่ตามผิวหน้าของซึ่งฝังในลักษณะฟองอากาศเล็ก ๆ

การดูดอากาศออกจากน้ำปูนภายหลังการการผสมและภายหลังการตกลงแบบจะช่วยลดการเกิดเม็ดโลหะได้ค่อนข้างมาก แต่การหล่อปูนที่ดีต้องการการสั่นตัวของแบบหล่อด้วย

รูพรุน (Porosity)

รูพรุนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบทั้งในรูปร่างหรือต้นกำหนดการแบ่งชนิดอย่างคร่าว ๆ แบ่งได้ 2 อย่าง

- รูพรุนจากฟองอากาศ

- รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity)

การเสียหายแบบฟองอากาศเกิดจากการหล่อที่ไม่ถูกต้อง เช่น ความบริสุทธิ์และคุณสมบัติของปูน ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้ ส่วนรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) เกิดจากคุณสมบัติคงที่ ทางฟิสิกส์ ของโลหะเหลว รวมกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น การถ่ายเทความร้อน เราอาจจะลดการเสียหายโดยการควบคุมขบวนการหลอม บางทีเราก็ไม่สามารถเลี่ยงได้อย่างสมบูรณ์

รูพรุนจากฟองอากาศหรือก๊าซ (Gas Porosity)

ฟองอากาศ (Gas Pores) ทำให้เกิดรูเข็มบนผิวหน้าโลหะ เพราะรูเข็มอาจจะมีหลายสาเหตุ สาเหตุของการเสียหายสามารถพิสูจน์ได้โดยการดูด้วยกล้องขยาย อาจมีรูปร่างรูพรุนคล้ายเนยแข็ง (Swiss Cheese) บ้างครั้งรูพรุนรวมกันอยู่เป็นชั้นใกล้กับผิวโลหะ บางครั้งชิ้นงานที่ดูว่าเรียบร้อยกลับปรากฏรูพรุนเมื่อขัดหรือปอกผิว สาเหตุของการเกิดรูพรุนชนิดนี้มีดังนี้

1. รูพรุนจากฟองอากาศ (ก๊าซ) เกิดจากปฏิกิริยากับปูนหล่อ

ปูนยิบซัม (Gypsum-bond) ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบซัลเฟต เป็นตัวสำคัญและแคลเซียมซัลเฟต (ยิบซัม) เป็นตัวยึด (Binding) แคลเซียมซัลเฟตสามารถมีปฏิกิริยากับโลหะเหลวหลายรูปแบบ แต่ปฏิกิริยาสุดท้ายทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นค่อนข้างซับซ้อนและจะไม่กล่าวในที่นี้ อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงพบว่า

- โลหะเหลวสามารถทำให้แคลเซียมซัลเฟตแตกตัวโดยตรงให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

ผลพลอยได้คือ คอปเปอร์ซิลิเกต หรือคอปเปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับโลหะตัวอื่น ๆ ถ้าโลหะเหลวกำลังจะแข็งตัว ฟองอากาศไม่สามารถผ่านออกได้จะรวมตัวกันเป็นฟองใกล้ผิวชิ้นงาน

- แคลเซียมซัลเฟตจะถูกลดออกซิเจน (Reduced) ทำให้เกิดซัลไฟด์ของทองแดง เงิน สังกะสี หรือนิกเกิล ซัลไฟด์ สารเหล่านี้ หากถูกออกซิไดซ์ในเวลาถัดมาเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้

การรวมตัวโดยตรงของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในการรวมตัวมีปัจจัยเหมือนกัน 3 ประการ ได้แก่ ความร้อนที่นำมาใช้ในการหลอม ดังนั้น อุณหภูมิจึงมีผลกระทบกับหน้าสัมผัสระหว่างโลหะกับปูน (Investment) กับภาวะอากาศในการหล่อ ประการสุดท้ายส่วนผสมของเนื้อโลหะผสม

ความร้อนและอุณหภูมิ การหล่อใช้อุณหภูมิสูง มีผลเสียกับการเกิดรูพรุน อย่างไรก็ตามหน้าตัดของเนื้อโลหะของชิ้นงานที่จะหล่อต้องถูกพิจารณาด้วย จำนวนความร้อนที่เข้าไปในแบบขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะ การหล่อโลหะจำนวนมากขึ้นจะต้องหล่อด้วยเบ้าและอุณหภูมิที่น้อยกว่าชิ้นโลหะบางและน้อยชิ้น

ภาวะอากาศ (Atmosphere) การแตกตัว (Decomposition) ของแคลเซียมซัลเฟต จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ภายใต้บรรยากาศลดรีดิวซิง (Reducing) ส่วนมากช่างทำเครื่องประดับมีความเข้าใจผิดเสมอ

ว่าบรรยากาศที่ดีต้องใช้เครื่องมือที่แพง ซึ่งคำว่าบรรยากาศที่ดีคือ ไม่มีออกซิเจนหรือ เป็นสภาพรีดิวซ์ของก๊าซผสมไนโตรเจนและไฮโดรเจน (รู้จักกันดีในนาม Forming Gas) ใช้เป็นก๊าซรีดิวซ์ บรรยากาศสุญญากาศเราก็นับว่าเป็นรีดิวซ์ การคลุมเบ้าหลอมด้วยก๊าซที่ผสมไฮโดรเจน หรือก๊าซธรรมชาติในเบ้าหลอมแบบเปิดจะเกิดปัญหาล้ำก้น ในกรณีเหล่านี้แทนที่จะดีกลายเป็นเลวมีผลให้รูพรุนเกิดขึ้น การแก้ปัญหาคือใช้บรรยากาศกลางแม้จะมีออกซิเจนอยู่บ้าง ก๊าซไนโตรเจนที่มีคุณภาพระดับใช้ในห้องทดลอง (Technical Grade) นำมาใช้ได้ เช่นเดียวกันจะใช้ก๊าซอาร์กอนก็ได้ แต่อาร์กอนราคาแพงกว่าและได้ประโยชน์ไม่มากกว่าไนโตรเจน

โลหะทองเค (Alloy) ปฏิกริยาของทองเคขึ้นอยู่กับอย่างมากกับโลหะราคาต่ำที่ผสม สังกะสีและนิกเกิลโลหะทั้งสองนี้มีผลกระทบเป็นอย่างมาก แต่สังกะสีมากถึง 2% ไม่มีอิทธิพลกับทองสีเหลือง แต่หากเปอร์เซ็นต์สูงขึ้นไปอีกจะเพิ่มการแตกตัวของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตค่อนข้างสูง โดยเหตุผลนี้การใส่สังกะสีเป็นปริมาณสูงในทองสีเหลือง จะต้องพิจารณาถึงอันตราย โลหะทองคำขาวนิกเกิลมีโลหะสำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สังกะสี และนิกเกิลในปริมาณสูง การใช้ยับยั้งเป็นตัวประสานปูนผงจะพบความยุ่งยากบ่อย ๆ โดยเฉพาะถ้าชิ้นส่วนที่ใช้หล่อพื้นที้น้ำตื้นหนา และการใช้ฟอสเฟตเป็นตัวประสานจะมีความได้เปรียบกว่าในกรณีที่หลอมทองคำขาวพาสเตียมเหมือนกัน เพราะอุณหภูมิที่ใช้หลอมจะสูงกว่ามาก และพาสเตียมทำปฏิกิริยากับยับยั้ง

การรวมตัวของซัลไฟด์ในระยะกลาง (Intermediate formation of sulphide)

ตามหลักการการรวมตัวของซัลไฟด์เช่นเดียวกับการกำเนิดโดยตรงของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การเกิดซัลไฟด์จะเกิดได้เพราะโลหะเก่าที่มีผงปูน ภายใต้ภาวะรีดิวซ์ (Reducing) ซัลไฟด์ทำให้เกิดการชำรุดได้โดยตรงหรืออาจจะชักนำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น ตรวจพบรอยแตกของแหวน เมื่อเอามาขยายด้วยกำลังขยายสูงมาก ผิวหน้าแตกชำรุดแสดงให้เห็นรูพรุน (Gas Pores) และสารผสมซัลไฟด์ เนื้อโลหะที่ขยายแล้วพบว่ารูพรุนและรอยร้าว (Crack) ไปตามขอบเกรน ซัลไฟด์เล็ก ๆ ไหลไปรวมอยู่ตามรอยเกรนได้ถูกตรวจพบเมื่อดซัลไฟด์ด้วยเช่นเดียวกัน

2. รูพรุนฟองอากาศจากสาเหตุความปนเปื้อนไม่บริสุทธิ์ของวัตถุดิบ

ความยุ่งยากลำบากในการหลอมทองที่เก่าได้กล่าวมาในเรื่องข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับวัสดุตกค้างสาเหตุอื่นได้เดากันว่าคอปเปอร์ออกไซด์มีส่วนร่วม ทองเก่าที่ใช้แล้วหลายครั้งแล้วไม่ได้รับการล้างอย่างถูกต้องเป็นตัวพาให้เกิดออกไซด์ในปริมาณค่อนข้างสูง บางครั้งทำให้เกิดรูพรุนใหม่ ๆ ขึ้น

วิธีการแก้ไขปัญหารูพรุน (Gas Porosity) มีวิธีแก้ไขป้องกันอยู่หลายวิธีคือ

ก. ใช้โลหะสะอาด

ข. อย่าใช้บรรยากาศรีดิวซ์ ในการหล่อโลหะสะอาดหรือใหม่ในการทำเครื่องประดับ

- ค. หากหลอมและหล่อในเครื่องมือปิดให้ใช้ไนโตรเจนหรือ Argon แทนสุญญากาศ การมีออกซิเจนเล็กน้อย ดูเหมือนจะมีประโยชน์มากกว่าเสียประโยชน์
- ง. รักษาอุณหภูมิของเบ้าและอุณหภูมิหลอมอยู่ภายในกำหนด
- จ. หลีกเลี่ยงการใช้ทองสีเหลืองมีสังกะสีสูง (อย่าให้เกิน 2-3%)
- ฉ. หลีกเลี่ยงการหล่อชิ้นส่วนหนาโดยใช้ Nickel-white gold ในยิบซัม นอกจากเราใช้ Phosphate-bonded
- ช. ไม่ควรที่จะหล่อทองขาวผสมพลาสเตอร์ในปูน Gypsum-bonded
- ซ. ไม่ควรที่จะในการหล่อทองผสมไททาเนียม 1% (990 Gold) ในปูนที่มียิบซัม

รูปทรงแบบหดตัว (Shrinkage Porosity)

รูปทรงแบบหดตัวที่มีรูปร่างผิวเดนไดรต์ จัดว่าเป็นรูปทรงแบบหดตัวที่รุนแรง ทำให้โลหะมีคุณสมบัติทางกลที่ต่ำ หรือไม่แข็งแรง และเมื่อมีแรงเพียงเล็กน้อยมากกระทบกับชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหักได้ง่าย การวิเคราะห์ ตรวจสอบว่าเป็นรูปทรงลักษณะนี้สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีในการตรวจสอบลักษณะและสาเหตุของรูปทรง

ต้นกำเนิด (Origin) รูปทรงชนิดนี้มีสาเหตุหรือการกำเนิดเกิดจากหดตัวอย่างรวดเร็วของโลหะในขณะที่ยังเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง การหดตัวคือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ ในช่วงของการเปลี่ยนสถานะ โดยเฉพาะ ในขั้นตอนของการแข็งตัว ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมเป็นส่วนมาก (รวมทั้งโลหะทำเครื่องประดับ) เมื่อเป็นธรรมชาติของโลหะดังนั้นจึงไม่สามารถแก้ไขไม่ให้เกิดการหดตัวได้ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจากการหดตัวของวัสดุสามารถจำกัดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่ต้องการได้

การหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดรูปทรงในระหว่างการแข็งตัว สามารถทำได้โดยปริมาตรของชิ้นงานที่หดตัวไปเมื่อโลหะเปลี่ยนเป็นของแข็งจะต้องได้รับการชดเชยจากโลหะเหลวที่ไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างให้ทันทั่วทั้งที่ การติดตั้งรูเติมหรือทางเดินน้ำโลหะสามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อขัดข้อง 2 ประการ

ประการแรก ชิ้นงานออกแบบไม่ดี และ/หรือ การแข็งตัวของโลหะที่รุนแรงหรือชิ้นงานมีเนื้อบาง (Thin Wall) เกิดขึ้นก่อนชิ้นงานหลัก ซึ่งทำให้การไหลของโลหะเหลวทำไม่ได้อีกต่อไป ทำให้รูปทรงเกิดขึ้นขณะแข็งตัวเดนไดรต์ ที่มีลักษณะเป็นเข็มจะลักษณะรูปร่างสามารถจะมีลักษณะเป็นผลึกเติบโตไม่สม่ำเสมอใน 3 ทิศทางของที่ว่าง บางทิศทางที่โลหะเติบโตได้ดีก็จะมีกิ่งก้านยาว และนำไปสู่การเริ่มต้นของการเกิด โครงสร้างที่คล้ายต้นไม้ทำให้เกิดที่ว่างระหว่างกิ่งซึ่งถูกบรรจุด้วยโลหะเหลวกำลังแข็งตัว ถ้าหากมีน้ำโลหะไม่เพียงพอ เช่น การป้อนถูกบล็อก รูปร่างของรูปทรงยังค้างอยู่ระหว่างกิ่ง (Branches)

ประการที่สอง การโตขึ้นของเดนไดรต์ของการเป็นผลึก จับตัวคล้ายฟองน้ำซึ่งขัดขวางการไหลของโลหะเหลวระหว่างผิวโลหะบ้างไปผิวโลหะหนาของชิ้นงาน

ปัจจัยที่มีอิทธิพล (Influencing Factors)

ผลกระทบของปัจจัยชนิดหนึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยอีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างการลดลงอุณหภูมิของเบ้าอาจจะมีผลกระทบต่างออกไป เช่น การเทที่อุณหภูมิต่ำ ในสภาวะที่ชิ้นงานหล่อหนา การหล่อที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เกิดฟองอากาศ แต่ถ้าชิ้นงานนั้นมีส่วนที่บางหรือมีบริเวณที่ชิ้นงานเปลี่ยนรูปทรงและขนาด ก็จะทำให้เกิดปัญหาการเติมไม่เต็มแบบ หรือเกิดโพรงที่มาจาก การหดตัว เนื่องจากปัจจัยแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์ในลักษณะซับซ้อนนี้ ทำให้การวิเคราะห์ของเสียและได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ จำเป็นต้องใช้การศึกษาอย่างละเอียดรอบคอบและชิ้นงานจำนวนมาก ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหล่อโลหะมีดังนี้

1. การออกแบบ (Influence of Design) งานชิ้นใหญ่จะมีโอกาสเกิด Shrinkage Porosity ได้มากกว่างานชิ้นเล็กกว่า การออกแบบที่ดีควรคำนึงถึง ขนาด รูปร่างของชิ้นงาน ขนาดและรูปทรงของทางเดินน้ำโลหะ การติดตั้งทางเดินน้ำโลหะเข้ากับตัวเรือน การติดตั้งรูเติม (Riser) เพื่อช่วยให้ชิ้นงานเต็มแบบ ฯลฯ

2. ส่วนผสมโลหะ (Alloy Composition) ทอง 18K ขึ้นไป มีคุณสมบัติด้านการหล่อดีกว่าทอง 14K ทอง 14K สีเหลือง ที่มีสังกะสีสูง ดูเหมือนจะมีความเหนียวที่จะมีรูพรุนจากการหดตัวมากกว่าทองผสมที่ไม่มีสังกะสี การใช้ทองที่มีค่ากะรัตสูงกว่าจะหลีกเลี่ยงความยุ่งยากแลปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้ง Shrinkage Porosity

3. อุณหภูมิ อุณหภูมิที่ส่งผลต่องานหล่อ มีทั้ง อุณหภูมิการหลอม อุณหภูมิการเท ของโลหะ หลอมเหลว และอุณหภูมิของเบ้าปูน การใช้อุณหภูมิทั้ง 3 ชนิดให้เหมาะสมจะมีส่วนช่วยควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี หลักการที่ใช้ คือ อุณหภูมิการหลอม ไม่ควรสูงเกินไป ไม่ควรเพิ่มอุณหภูมิการหลอมเพื่อให้การไหลของโลหะเต็มแบบมากขึ้น เพราะจะส่งผลให้มีโอกาสพบการหดตัวที่สูงขึ้น และยังทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ สามารถละลายเข้าไปในน้ำโลหะได้ง่ายขึ้น รวมทั้ง การเกิดโพรงอากาศ ชนิดต่าง ๆ ได้มากขึ้นอีกด้วย อุณหภูมิการเทควรสัมพันธ์กับอุณหภูมิการหลอม โดยปกติไม่ควรเกิน 50-100°C การตั้งอุณหภูมิของเบ้าปูนเป็นตัวแปรที่สามารถ ดัดแปลง และปรับเปลี่ยนได้ เพราะการตั้งให้สูงขึ้นจะช่วยให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น และไหลได้เต็มแบบ แต่ไม่ควรตั้งสูงเกินไป โดยเฉพาะในกรณีใช้ปูนที่มียิปซัมผสมอยู่ เพราะจะก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ง่าย

รอยร้าวจากการหดตัว (Cracks Caused by Shrinkage)

รูพรุนขนาดใหญ่สามารถรวมตัวเข้าด้วยกัน ในรูปเป็นเครือข่าย มีผลทำให้ชิ้นหล่อมีคุณสมบัติไม่แข็งแรง หรือ อ่อนแออย่างมาก ส่งผลต่อการแตกร้าวของชิ้นงานเมื่อมีแรงกระทำไม่มากนัก หรือเมื่อนำไป

ขึ้นจะช่วยให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น และไหลได้เต็มแบบ แต่ไม่ควรตั้งสูงเกินไป โดยเฉพาะในกรณีใช้ปูนที่มียิปซัมผสมอยู่ เพราะจะก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ง่าย

รอยร้าวจากการหดตัว (Cracks Caused by Shrinkage)

รูปพุนขนาดใหญ่สามารถรวมตัวเข้าด้วยกัน ในรูปเป็นเครือข่าย มีผลทำให้ชิ้นหล่อมีคุณสมบัติไม่แข็งแรง หรือ อ่อนแออย่างมาก ส่งผลต่อการแตกร้าวของชิ้นงานเมื่อมีแรงกระทำไม่มากนัก หรือเมื่อนำไปใช้งาน การร้าวอีกประเภทหนึ่ง พบในโลหะผสมที่ไม่ตกผลึกพร้อมกับโครงสร้างแบบ Dendritic แต่มันจะมีโครงสร้างผลึกแบบหยาบ ๆ มีลักษณะกลม ในกรณีนี้รูปพุนจะรวมตัวอยู่รอบ ๆ เกรนทำให้เกิดรอยร้าว ข้อมูลจากการศึกษาพบว่ารอยแตกจากการหดตัว ส่วนใหญ่พบในการหล่อทองสีอมแดงและสีชมพู

การหลีกเลี่ยงโพรงอากาศที่เกิดจากการหดตัว (Avoiding Shrinkage Porosity)

เป็นไปได้ที่จะไม่ให้เกิด Shrinkage Porosity อย่างสมบูรณ์ สิ่งที่สามารถทำได้คือการลดจำนวนให้น้อยลง นอกจากนี้ยังเป็นไปไม่ได้ที่จะจัดทำสูตรการหลอมโลหะชนิดครอบจักรวาล เพื่อลดจำนวนของเสีย อย่างไรก็ตามมีข้อปฏิบัติที่อาจจะให้ประกอบหรือแก้ไขงานหล่อ คือ

- ออกแบบชิ้นงานที่หล่อได้ง่ายหลีกเลี่ยงที่จะมีส่วนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดอย่างฉับพลัน
- ระมัดระวังการทำรูปหล่อโลหะ (Sprue) อย่างถูกต้อง รูปหล่อโลหะต้องไม่ยาวและเล็กเกินไป อย่างไรก็ตามรูปหล่อโลหะที่สั้นและหนาทำให้งานเสียหาย ให้ทำรูปหล่อโลหะใกล้เคียงกับชิ้นหล่อบริเวณที่หนา เมื่อสามารถทำได้รูปหล่อชั้น 2 ตัวหรือหลายตัวอาจเป็นประโยชน์ แต่ต้องไม่ยาวและบางเกินไป ความเข้าใจผิดบ่อย ๆ เกิดจากการใช้รูปหล่อบางและยาวหลายตัว เมื่อทำที่หล่อเพียงอันเดียวไม่ได้
- ใช้อุณหภูมิที่ถูกต้อง โดยเฉพาะอุณหภูมิของเบ้าให้ผลมากกับการเกิดโพรง ขณะที่อุณหภูมิของน้ำโลหะมีอิทธิพลมากกับการไหลของโลหะ
- อย่าหล่องานขนาดหนาและบางบนต้นเทียนเดียวกัน เพราะจะไม่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการหล่อชิ้นงานทั้งสองรูปแบบ
- ใช้โลหะผสมที่หล่อง่าย ทอง 18K จะหล่อได้ง่ายกว่า 14K
- การเพิ่มสังกะสีจะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น แม้ว่าการไหลตัวและความสุกของโลหะจะดีขึ้น ให้พิจารณาปริมาณงานที่เสียไป เทียบกับมูลค่าของโลหะที่เพิ่มขึ้น

ผิวหนังเดนดริติก (Dendritic Surface)

การเปลี่ยนแปลงของรูพรุนเป็นการชำรุดแบบ Dendritic Surface ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดเมื่อก๊าซเกิดขึ้นไป (เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะเหลวกับปูน) ผลักดันโลหะเหลวออกไปจากผิวหนังของโลหะที่แข็งตัวแล้วเป็นบางส่วน เราสามารถพบได้บ่อย ๆ บนส่วนกว้างของรูหยอดโลหะบริเวณที่มีมวลใหญ่และอุณหภูมิร้อน บ่อยครั้งเราก็พบมันได้บนชิ้นงานที่เล็กและบาง

การหลีกเลี่ยง (Avoidance) ให้ใช้วิธีตามที่กล่าวไว้แล้วสำหรับการแก้ปัญหารูพรุนทุกข้อได้

รูพรุนและโพรงอากาศงานที่เสียบ่อยครั้งจะแก้ได้ โดยการเพิ่มความสะอาด และพิถีพิถันกับเนื้อโลหะ ไม่ว่าจะเป็นบรรยากาศและกระบวนการ โพรงอากาศที่เกิดจากการหดตัวเป็นปัญหาที่รุนแรงและสำคัญที่สุด เนื่องจากเกิดจากผลของหลายตัวแปร



3.8 การศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาใช้เป็น Master alloy

ในปัจจุบันการผลิตทองเคเกรดต่าง ๆ นอกจากนำโลหะทองผสมกับโลหะเงินและทองแดง โดยตรงแล้ว คณะผู้วิจัยได้พบว่าการผลิตโลหะประกอบเครื่องประดับอัญมณีในโรงงานขนาดเล็กและใหญ่ในประเทศ มีลักษณะการผลิตโดยใช้โลหะทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% ผสมกับ Master Alloy ที่ประกอบด้วยโลหะเงิน ทองแดง สังกะสี เป็นโลหะผสมหลักใน Master Alloy ที่ประกอบด้วยโลหะเงิน ทองแดง สังกะสี เป็นธาตุผสมหลัก ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงขอความอนุเคราะห์จากผู้ผลิต Master Alloys และนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เครื่อง EDAX พบว่า มีส่วนผสมทางเคมี

ตาราง 3.9 ส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์โลหะ Master alloy

ชนิดของ Master Alloy ที่ใช้ในงาน	ส่วนผสมทางเคมีคิดเป็น % โดยน้ำหนัก		
	ทองแดง	เงิน	สังกะสี
งานขึ้นรูปด้วยมือ	53.68	41.58	4.74
งานหล่อ (1) 18-22K	58.80	35.89	5.31
งานหล่อ (2)	73.09	23.20	3.73
งานหล่อ (3)	58.86	37.75	3.40

- หมายเหตุ :
1. บริษัท United PM (THAILAND) Co., Ltd. ผลิตภัณฑ์เลขที่ 420
 2. บริษัท Meilt ผลิตภัณฑ์เลขที่ 450
 3. ได้รับความอนุเคราะห์จากห้างทอง ที่รามอินทรา

จากการสอบถามผู้ใช้ Master Alloy พบว่างานหล่อ (2) เป็นที่นิยมเพราะให้สีสวยและเป็นมันวาวหลังจากขัด จากการวิเคราะห์จะพบว่า การใช้ Master Alloy เพื่อผสมกับโลหะทองคำผลิตเป็นโลหะประกอบเครื่องประดับในสภาพหล่อ เช่น แหวน จะมีธาตุทองแดงผสมอยู่มากกว่าโลหะ Master Alloy ที่ใช้ในงานขึ้นรูปด้วยมือ สาเหตุที่มีธาตุทองแดงต่ำในงานขึ้นรูปด้วยมือ เพราะการนำโลหะที่จะไปขึ้นรูปถ้ามีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่สูงจะทำให้คุณสมบัติทางกลด้านความเหนียวลดลง และความแข็งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การขึ้นรูปทำได้ยาก

อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยในโครงการนี้จะไม่ใช่ Master Alloy ที่สั่งซื้อมาจากแหล่งภายนอก เนื่องจากมีหลายประเภทและส่วนผสมทางเคมีไม่เหมือนกัน ขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นจะผลิตขึ้นใช้เองโดยจะควบคุมปริมาณธาตุทองแดงเงินและสังกะสีตามที่ต้องการให้ได้ก่อนนำไปผสมกับโลหะทอง

๑,

บทที่ 4

อิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อการผลิตเส้นลวดทองคำ 14 กะรัต

ในหัวข้อวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ การศึกษาอิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของทองคำ 14 กะรัต ที่มีส่วนผสมทางเคมีเป็น 58.5 wt% Au-16.5 wt% Ag-25 wt% Cu ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตเป็นเส้นลวดต่าง ๆ ดังนี้

การขึ้นรูปเย็น (Cold working)

การอบอ่อน (Annealing)

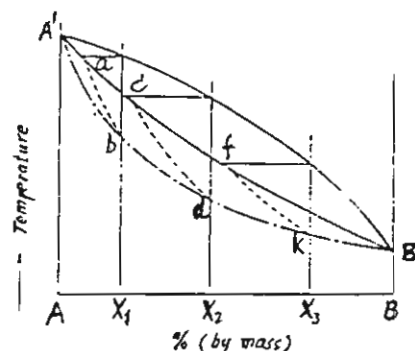
การอบเพิ่มความแข็ง (Age Hardening)

4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการอบเป็นเนื้อเดียว (Homogenization)

การทำการอบเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) คือกระบวนการทางความร้อน (Heat-treatment) ชนิดหนึ่ง เพื่อขจัดการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะ ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic Segregation) หรือคอริง (Coring) การแยกตัวนี้เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหล่อของโลหะ

4.1.1 การเกิดผลึกของโลหะผสมในสภาวะไม่สมดุล

การเกิดผลึกในสภาวะไม่สมดุลคือ การเกิดผลึกจากโลหะหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในโลหะหลอมเหลว (Supercooled) ทำให้การแพร่ (Diffusion) ของธาตุผสมในผลึกของโลหะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และส่งผลทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นของส่วนผสมแตกต่างกันเป็นชั้น ๆ



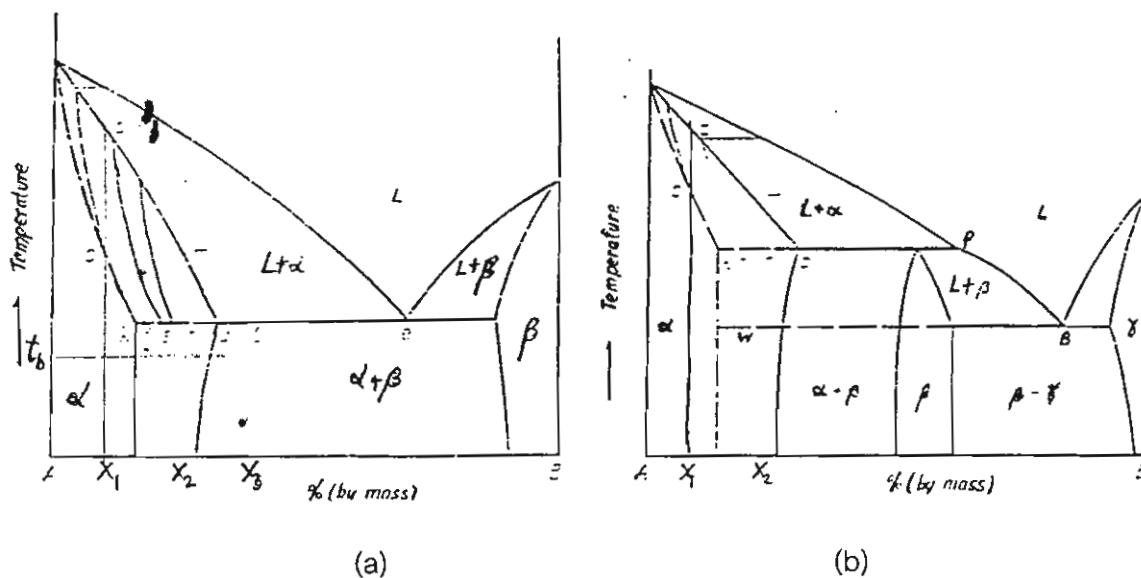
รูปที่ 4.1 แสดงการแข็งตัวภายใต้สภาวะที่ไม่สมดุล

$A'bdkB'$ ----Non-equilibrium Solidus Line

$A'acfB'$ ----Equilibrium Solidus Line

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในสภาวะไม่สมดุลเส้นการแข็งสมบูรณ์ (Solidus Line) ที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะต่ำกว่าเส้นการแข็งสมบูรณ์ที่เกิดจากสภาวะสมดุล การเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะมีผลต่อผลึกของแข็งที่จะกลายเป็นเดนไดรต์ โดยกิ่งก้านของเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณส่วนผสมของธาตุผสมต่ำกว่ากิ่งก้านเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ณ จุดของแข็งที่ต่ำกว่า

ผลกระทบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ผลต่อการเกิดเฟสต่าง ๆ ของโลหะหลังเกิดการแข็งตัวโดยสมบูรณ์แล้ว เช่น ผลต่อปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic) และเพอริเทคติก (Peritectic)



รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นภายใต้การแข็งตัวของสภาวะไม่สมดุลของ
ปฏิกิริยายูเทคติก (รูปที่ 4.2 (a)) และเพอริเทคติก (4.2 (b))

จากแผนภาพดังกล่าวจะพบว่า เฟสที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดการแข็งตัวของระบบที่สภาวะสมดุลและไม่สมดุล โดยในระบบยูเทคติกที่ X_2 เมื่อเกิดการแข็งตัวของสภาวะสมดุลจะเกิดของแข็งเฟสเดียว (α) แต่เมื่อเกิดการแข็งตัวของสภาวะไม่สมดุลจะเกิดของแข็งสองเฟสที่มีโครงสร้างเป็นยูเทคติก ($\alpha + \beta$) และระบบเพอริเทคติกที่ X_2 ก็จะทำให้เกิดในลักษณะคล้ายกันกับระบบยูเทคติก

กล่าวโดยสรุปการเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะก่อให้เกิดผลดังนี้

1. การแยกตัวของเดนไดรต์หรือคอร์ริง
2. จุดการแข็งตัวสิ้นสุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม
3. เฟสที่จะเกิดขึ้นจากโลหะหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงไปจากที่ควรจะเป็น เช่น จากเฟสเดียว กลายเป็น สองเฟสหรือหลายเฟส

4. อัตราส่วนผสมในเฟสที่สองจะเพิ่มขึ้นสำหรับโลหะผสมแบบ Hetero-phase ภายใต้สภาวะสมดุล

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในโลหะผสมเมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียว

ในขณะเกิดผลึกที่สภาวะไม่สมดุลจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1 ลดความเหนียว ในกรณีที่มีเฟสที่เปราะ เช่น การแยกตัวของเดนไดรต์ โดยปกติแล้วจะทำให้เกิดความเปราะขึ้น และมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ บริเวณขอบ หรือผิวของเดนไดรต์

2 เกิด Galvanic Microcouple ที่มีสาเหตุจากความแตกต่างของส่วนผสมบริเวณแกนกลาง และขอบของเดนไดรต์ ดังนั้นการแยกตัวของเดนไดรต์ในสารละลายของแข็งจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ ซึ่งจะส่งผลให้มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบ Electrochemical ต่ำ และผุกร่อนได้ง่าย

3 Lineage Structural ที่เกิดจากการขึ้นรูป ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะมีผลกระทบจากวัฏจักรเริ่มต้นที่มีลักษณะ ไม่เหมือนกัน ทุกทิศทุกทาง (Anisotropy) จนมีส่วนไปกระทบต่อระบบผลึกและทำให้เกิด Fish-scale Fracture นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการแตกหักประเภท Hot Tearing อีกด้วย

4 จุดหลอมเหลวของโลหะผสมต่ำกว่าที่ควรจะเป็น โดยเฉพาะบริเวณระหว่างแขนของเดนไดรต์ เพราะบริเวณนี้ส่วนใหญ่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุผสมสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างครั้งที่สอง

เกรนที่หยาบในโลหะผสมประเภทที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง การทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้เกรนหยาบใหญ่ขึ้น เช่น การทำการอบเป็นเนื้อเดียวของเหล็กผสมที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเกรนอสเทนไนต์ที่หยาบ ซึ่งเกรนที่หยาบนี้จะมีผลกระทบต่อการขึ้นรูปในขั้นตอนการผลิตอื่น

การทำเกรนให้เล็กลงไปในโลหะผสมที่ผ่านการขึ้นรูปมา เช่น Al-Mg หรือ Al-Zn-Mg การทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะทำให้ขนาดของเกรนเล็กลง 33-36% โดยประมาณ ซึ่งอาจจะเกิดจาก Polygonization หรือ Recrystallization ก็ได้

การโตของเฟส ในโลหะผสมที่มีหลายเฟสในสภาวะสมดุล ในขณะที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียว เฟสที่ไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์จะรวมตัวเกาะกลุ่มกันบริเวณขอบเกรน เช่น Mg_2Si ซึ่งไม่สามารถเป็นสารละลายของแข็งได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เฟสเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลในสภาพใช้งาน

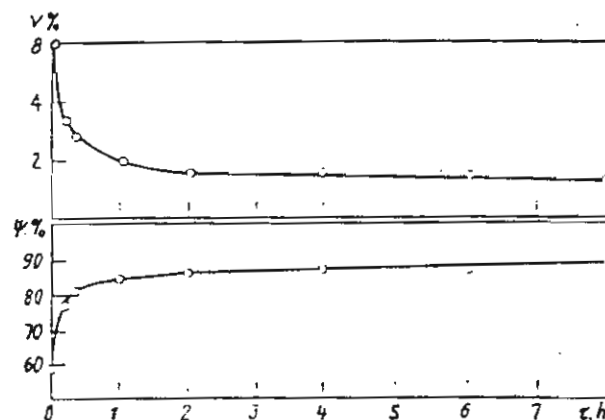
Heterogenization เกิดได้จาก 2 สาเหตุคือ

1. การแยกตัวของเฟสที่ไม่สมดุลในสารละลายของแข็งที่ไม่อิ่มตัว

2. เกิดตกผลึกของเฟสอื่นในสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวด โดยความแข็งที่เกิดในช่วงหลังของขั้นตอนการเย็นตัว โดยเลือกใช้อัตราการเย็นตัวที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานมีความแข็งขึ้นเนื่องจาก Martensitic Hardening

4.1.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะผสมเมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียว

โลหะผสมในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ เช่น โลหะผสมเกรด II16 ที่ผ่านการทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 500°C แล้วขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 400°C ผลที่ได้จะปรากฏดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าถ้าอัตราการละลายของเฟสที่เปราะมีมากก็จะทำให้คุณสมบัติความเหนียวของชิ้นงานมีมากขึ้น โดยสามารถดูได้จากค่าอัตราการยืดตัว (Relative Elongation) อัตราการลดขนาด (Relative Reduction) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม จะเพิ่มขึ้น 1.5-3 เท่า เมื่อผ่านการทำการอบเป็นเนื้อเดียว



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการลดขนาด (ϕ) กับเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว (t)

และเปอร์เซ็นต์การละลายของส่วนผสม (V)

โลหะผสมที่จะต้องผ่านการขึ้นรูป การทำการอบเป็นเนื้อเดียว จะช่วยทำให้สามารถลดจำนวนครั้งในการอบอ่อนให้น้อยลง โดยที่การลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน หรืออัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน และเพิ่มความสามารถการดึงในงานที่ต้องใช้กรรมวิธี Deep Drawing

คณะผู้วิจัยขอนำเสนอขั้นตอนการวิจัย และผลที่ได้ ตามลำดับต่อไปนี้

4.2 ระเบียบและวิธีในการทำวิจัย

4.2.1 วัตถุประสงค์

ในการเตรียมตัวอย่างทดลอง ทองคำ เงิน และทองแดงที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นเป็นโลหะมีความบริสุทธิ์ 99.9% ขึ้นไป โดยทองคำที่ใช้จะมีลักษณะรูปทรงเป็นแท่ง ส่วนเงิน และทองแดงอยู่ในลักษณะที่เป็นเม็ด ค่าความบริสุทธิ์ของโลหะที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 แสดงความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะในวัตถุประสงค์แต่ละชนิด

ชนิดของโลหะ	ค่าความบริสุทธิ์
ทองคำ (Au)	99.99%
เงิน (Ag)	99.9%
ทองแดง (Cu)	99.9%

4.2.2 วิธีดำเนินการทดลองและขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมและตรวจสอบแท่งทองคำก่อน และหลังการหล่อ

นำทองคำ เงิน และทองแดงที่มีลักษณะที่เป็นแท่ง และเม็ดมาชั่งตามน้ำหนักส่วนผสมที่กำหนดไว้ คือ 58.5 wt% Au-16.5 wt.% Ag -25.0 wt.% Cu หลังจากนั้นนำมาหลอม เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานทดสอบ อย่างไรก็ตามจากการทดลองกับทองคำกะรัตชุดแรกที่ผ่านมาการหลอมด้วยความร้อนจากเปลวไฟของ หัวพันไฟ (torch) แล้ว นำน้ำโลหะที่ได้เทลงในแบบเหล็ก พบว่าแท่งทองคำมีส่วนผสมทางเคมีผิดไปจากที่ต้องการมากคือ แท่งทองคำที่ผลิตได้ เมื่อนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีมีค่าเนื้อทองอยู่ที่ระดับ 16 กระรัต โดยส่วนผสมทางเคมีมีค่าเท่ากับ 66.7Au-15.1 wt.% Ag-18.2 wt.% Cu ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การนำหัว Torch เพื่อใช้ในการหลอมไม่เหมาะสมที่จะใช้ผลิตชิ้นงานทดสอบ แม้ว่าจะเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ใช้กันมาตั้งแต่ดั้งเดิมจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ชิ้นงาน 16 กระรัตดังกล่าว ก็สามารถนำมาใช้ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมต่อการอบเป็นเนื้อเดียว เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับทองคำ 14 กระรัต ทองคำผสมชุดที่สองผลิตขึ้นโดยใช้วิธีการหลอมด้วย เตาไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำภายใต้การปกคลุมด้วยก๊าซอาร์กอน แล้วเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบปูนที่รองรับอยู่ด้านล่าง และชิ้นงานทดลองที่ได้จะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมมีฐานกรวย

กลม ดังรูปที่ 4.2 โดยสภาวะที่ใช้ในการหลอมทองคำ 14 กระรัต โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวของทองคำชนิดนี้มีค่าประมาณ 900°C อุณหภูมิเหน้าโลหะ 982°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ปูน 410°C (ขณะเหน้าโลหะ) และ 145°C (ขณะชุบน้ำ) เย็นตัวในเตา 2 นาที และเย็นตัวนอกเตา 7 นาที

หลังจากที่ได้ชิ้นงานหลอมมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การตัดส่วนที่เป็นฐานซึ่งเป็นทางเข้าน้ำโลหะ ออก และแบ่งแท่งทองคำที่เหลือออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี และตรวจดูโครงสร้างจุลภาคแท่งทองคำทั้งสองพร้อมทั้งวัดค่าความแข็ง

ส่วนผสมทางเคมีของทองคำผสมตรวจสอบด้วยวิธี Fire Assay และ Gravimetric จากบริษัท Bangkok Assay Office ได้ค่าส่วนผสมทางเคมีดังนี้

ตาราง 4.2 แสดงผลการตรวจวัดส่วนผสมทางเคมีของทองคำ 14 กระรัตที่ใช้ในการทดลอง

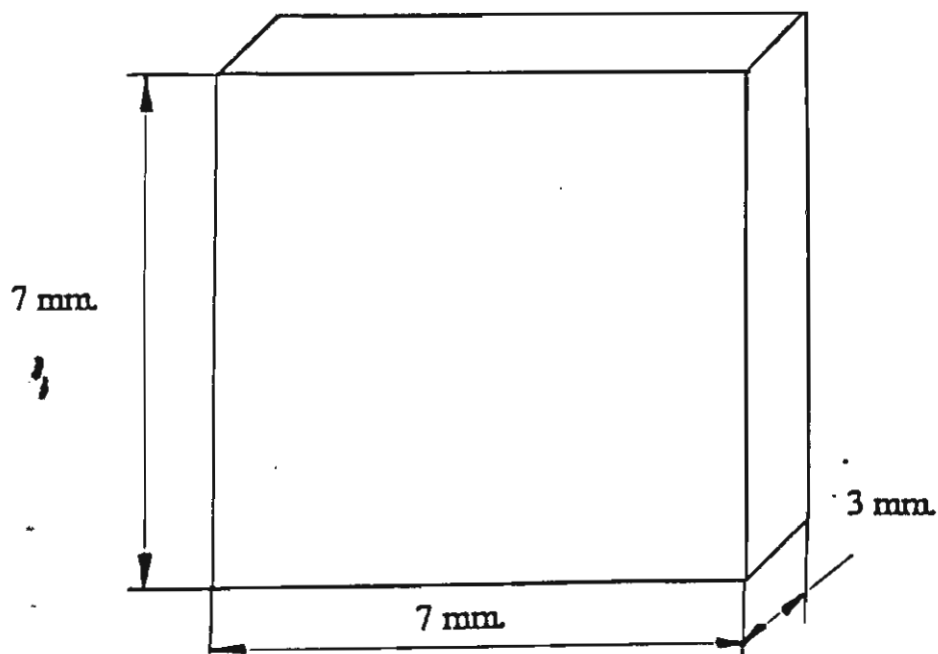
ตำแหน่ง	Au (wt.%)	Ag (wt.%)	Cu (wt.%) balance
ปลายแท่ง	58.80	14.51	26.69
โคนแท่ง	59.30	14.59	26.11
ค่าเฉลี่ย	59.05	14.55	26.40



รูปที่ 4.4 แสดงแท่งทองคำ 14 กระรัต ที่ได้จากการหลอมด้วยเตาเหนียวไฟฟ้า ชุดที่ 2

การเตรียม และตรวจสอบทองคำผสมเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการอบเป็นเนื้อเดียว

จากแท่งทองคำที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน นำส่วนหนึ่งมาตัดเป็นชิ้นงานเล็ก ๆ โดยขนาดของชิ้นงานที่ทำการทดลองมีขนาด ดังรูปที่ 4.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลการอบเป็นเนื้อเดียวต่อโครงสร้างจุลภาคและหาเวลาที่เหมาะสมในการอบเป็นเนื้อเดียว ซึ่งจะกล่าวกระบวนการและวิธีการอบต่อไป



รูปที่ 4.5 แสดงภาพจำลองของขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองอบเป็นเนื้อเดียว

เวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวขึ้นอยู่กับ การแพร่ของอะตอมแต่ละชนิดในโครงสร้างเดนไดรต์ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ โครงสร้างจุลภาคของทองคำ 16 และ 14 กระรัต ที่ผ่านการหล่อจะมีลักษณะโครงสร้างแบบเดนไดรต์ จากการวัด ระยะห่างของแขนเดนไดรต์ ลำดับที่ 2 (Secondary Dendrite Arm Spacing) โดยวัดจากกึ่งกลางแขนเดนไดรต์ถึงกึ่งกลางแขนเดนไดรต์ถัดไปเพื่อใช้ในการคำนวณ ระยะเวลาการอบเป็นเนื้อเดียวโดยประมาณ มีค่าดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 แสดงระยะห่างแขนเดนไดรต์ในทองคำกระรัตที่ใช้ในการทดลอง

กระรัต	บริเวณปลายแท่ง (มม.)	บริเวณโคนแท่ง (มม.)	ค่าเฉลี่ย (มม.)
16	0.021	0.022	0.022
14	0.040	0.050	0.045

จากการตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมีบริเวณตำแหน่งแซนเดนไดรท์ และช่องระหว่างแซนเดนไดรท์ โดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีแบบ EDX ได้ค่าส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 แสดงค่าส่วนผสมทางเคมีของเดนไดรท์ และช่องระหว่างเดนไดรท์

กะรัต	เดนไดรท์			ช่องว่างแซนเดนไดรท์		
	Au (wt%)	Ag (wt%)	Cu (wt%)	Au (wt%)	Ag (wt%)	Cu (wt%)
16	64.12	11.53	24.35	72.52	18.42	9.06
14	51.49	18.70	29.80	41.85	36.53	21.62
กะรัต	เดนไดรท์			ช่องว่างแซนเดนไดรท์		
	Au (at.%)	Ag (at.%)	Cu (at.%)	Au (at.%)	Ag (at.%)	Cu (at.%)
16	40.0	12.5	47.5	54.0	25.0	21.0
14	29.0	19.0	52.0	23.9	37.5	38.6

การคำนวณหาระยะเวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียว สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการคำนวณตามสมการของดาร์คเคน (Darken's Law) และกราฟสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองของ M. Badai (1969) โดยระยะเวลาอบเป็นเนื้อเดียวของทองคำ 16 กะรัตจะมีค่าประมาณ 20-50 นาที และทองคำ 14 กะรัตจะมีค่าประมาณ 1-2 ชั่วโมง จึงสามารถกำหนดเวลาในการทดลองได้ดังนี้

เวลาที่ใช้ในการอบ 16 กะรัต	10, 20, 30, 40, 60, 120 นาที
14 กะรัต	60, 90, 120, 150, 180, 240, 360 นาที
อุณหภูมิอบเป็นเนื้อเดียว	800°C
ก๊าซปกคลุม	3% H ₂ + N ₂ balance
อุณหภูมิการชุบ	น้ำ + น้ำแข็ง 0 ± 2°C

หมายเหตุ : การยึดจับชิ้นงานทำได้โดยการใช้ลวดทนความร้อนพันกับชิ้นงานทดสอบและสอดเข้าไปบริเวณกึ่งกลางของเตาอบ

การขึ้นรูปเย็นด้วยการรีด (Cold rolling)

นำแท่งทองคำที่ผ่านและไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว มาขึ้นรูปเย็น ด้วยการรีดให้อยู่ในรูปเส้นลวด โดยใช้เครื่องรีดมาที่นิยมใช้อยู่ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับในประเทศ และทำการเก็บตัวอย่างที่ผ่านการรีดทุก ๆ ช่วง 2 ร่องรีด โดยใช้อัตราการลดขนาด (%RA) 16, 32, 47, 57, 65, 71, 78, 82, 85, 88 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการรีดอย่างต่อเนื่องจนเริ่มเกิดความเสียหายบนเส้นลวด เนื่องจากการรีดนี้เป็นการศึกษาผลของการอบเป็นเนื้อเดียว ดังนั้นการรีดลดขนาด จึงไม่ทำการอบอ่อนในช่วงระหว่างการขึ้นรูป



รูปที่ 4.6 แสดงเครื่องรีดลดขนาดเป็นเส้นลวดที่ใช้ในการทดลอง

การอบอ่อน (Annealing)

ชิ้นงานที่ผ่านการรีดเป็นเส้นลวดจนมีอัตราการลดขนาดที่ 88% R.A. หรือ ขนาด 2 x 2 x 3 มม. จะนำมาอบอ่อน เพื่อลดความเครียดในเนื้อวัสดุ ในขั้นตอนนี้ คณะผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของการอบอ่อนต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ตลอดจนเป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาผลของการอบเพิ่มความแข็งต่อไป

สภาวะที่ใช้ในการอบอ่อนมีดังนี้

เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน	30 นาที
อุณหภูมิอบอ่อน	650°C
ก๊าซปกคลุม	3% H ₂ + N ₂ balance
อุณหภูมิการชุบ	น้ำ + น้ำแข็ง ใกล้เคียง 0 ± 2°C

การอบเพิ่มความแข็ง (Age hardening)

ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้ว จะนำมาอบเพิ่มความแข็งเพื่อต้องการดูปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงาน โดยทำการศึกษาดูโครงสร้างจุลภาค และความแข็งหลังจากการอบ

สภาวะที่ใช้ในการอบเพิ่มความแข็งมีดังนี้

เวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มความแข็ง	60 นาที
อุณหภูมิ การอบเพิ่มความแข็ง	350°C
ก๊าซปกคลุม	3% H ₂ + N ₂ balance
อุณหภูมิการชุบ	น้ำ + น้ำแข็ง ใกล้เคียง 0 ± 2°C

4.2.3 ระเบียบ และวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี

ตรวจค่าส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX (Energy Dispersive X-Ray) เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600-1200 แล้วขัดมันด้วยผงเพชร ขนาด 6 -1/4 µm. กัดด้วยสารละลาย 10% KCN + 10% (NH₄)₂S₂O₃ (เจือจางด้วยน้ำ) หรือ Conc. HCl + Conc. HNO₃ อัตราส่วน (3:1)

การตรวจสอบขนาดเกรน

ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบขนาดเกรน ต้องเตรียมชิ้นงานโดยกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลาย 10%KCN+10% (NH₄)₂S₂O₃ วัดขนาดด้วยวิธี Lineal Intercept หรือ Heyn ตามมาตรฐาน ASTM ที่ E 112

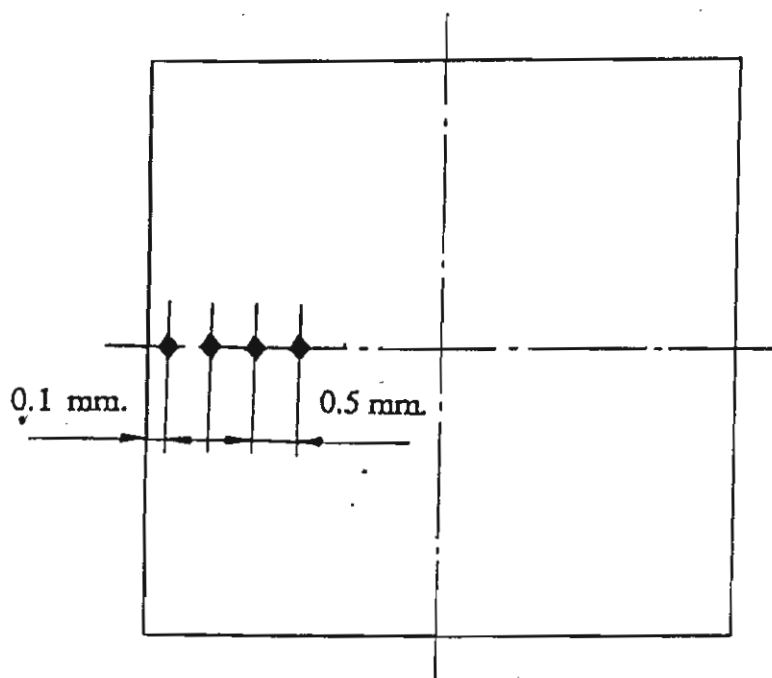
การตรวจวัดค่าความแข็ง

ค่าความแข็งของชิ้นงานตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนักกด 300 กรัม เวลา 20 วินาที วัดระยะอินเดนท์ทั้ง 2 แกน คำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ หน่วย (Pa) จากสมการ

$P =$ น้ำหนักกด (กิโลกรัม)

$a =$ ระยะอินเดนท์ (มิลลิเมตร)

วิธีการวัดความแข็งของผิวชิ้นงานที่ผ่านการรีดทำได้โดยวางชิ้นงานทดสอบบนรองวางวัดความแข็ง ส่วนการวัดความแข็งบริเวณส่วนในของชิ้นงาน จะทำการวัดบนภาคตัดขวางของชิ้นงาน โดยกำหนดให้รอยวัดแรกห่างจากผิวชิ้นงาน 0.1 มม. รอยวัดต่อ ๆ ไปห่างจากรอยที่วัดก่อนหน้านั้น ทุก ๆ 0.5 มม. ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะวิธีการวัดค่าความแข็งชิ้นงานทดสอบ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของทองคำที่ผ่านการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ ต้องทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยมีวิธีการเตรียม การขัดหยาบ การขัดละเอียดเหมือนกับในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ดังที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม สารเคมีที่ใช้แต่ละชนิดส่งผลต่อการแสดงโครงสร้างจุลภาคในลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

10% KCN + 10% $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$

1-6 นาที

แสดงขอบเกรน

Conc. HCl + Conc. HNO_3 อัตราส่วน (3:1)

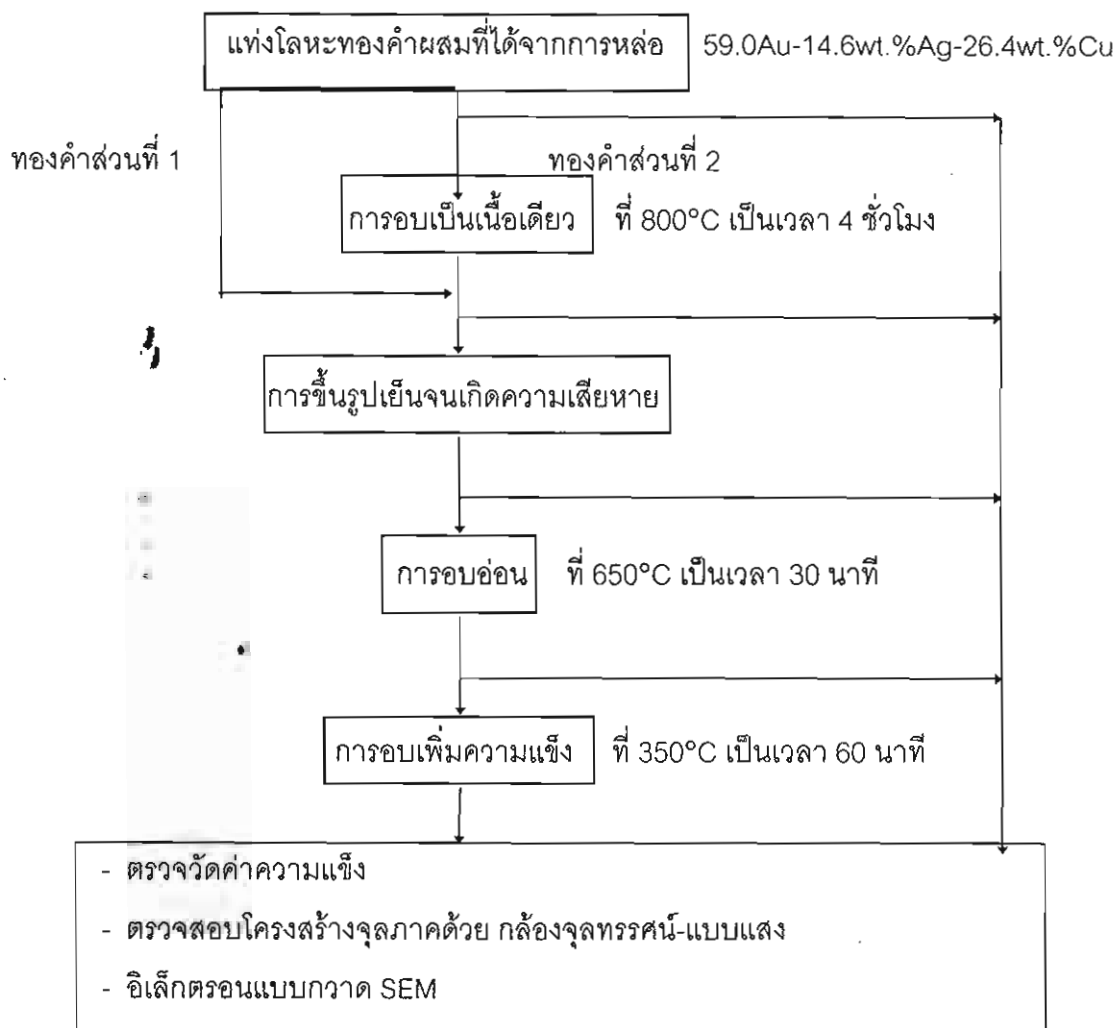
1-3 วินาที

แสดงรายละเอียดในเกรน

30% (Conc. HCl + Conc. HNO₃) อัตราส่วน (3:1) ในน้ำ

แสดงรายละเอียดในเกรน

4.2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

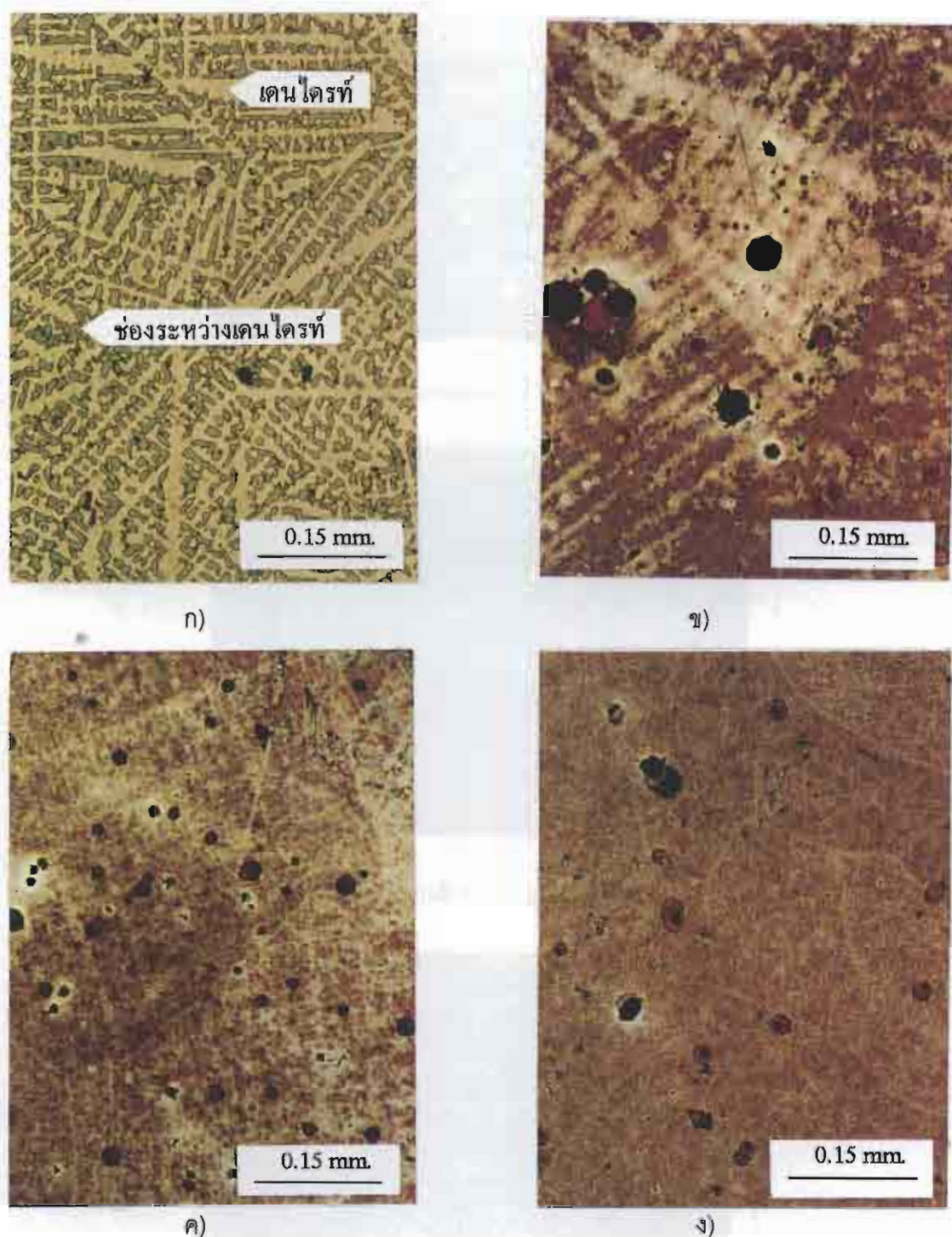


4.3 รายงานผลการทดลองและอภิปรายผล

4.3.1 อิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อทองคำกะรัต

ชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากแท่งทองคำ 16 กะรัต ที่ได้จากการหล่อหลอมด้วยหัวพันไฟ และแท่งทองคำ 14 กะรัต ที่ได้จากการหล่อหลอมด้วยเตาเหนียวนำไฟฟ้า จะมีลักษณะดังที่กำหนดในหัวข้อที่กล่าวมา จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ได้จากการหลอมมีโครงสร้างเป็นแบบเดนไดรต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างปกติที่พบได้จากการหล่อโลหะผสม ตำแหน่งที่เป็นเดนไดรต์มีส่วนผสมทางเคมีที่สามารถระบุได้ว่ามีทองแดงอยู่มาก ในขณะที่ตำแหน่งช่องระหว่างแขนเดนไดรต์พบว่ามีธาตุเงินเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูง ทั้งทองคำ 14 และ 16 กะรัต เมื่อตรวจสอบจากแผนภูมิสมดุลเฟสของทองคำกะรัตพบว่าสอดคล้องกันกับแผนภูมิ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นก่อน จะเติบโตเป็นเดนไดรต์ซึ่งส่วนผสมทางเคมีจะมีทองแดงมาก รูปที่ 4.8 ก.) และ 4.8 ข.) เป็นรูปแสดงโครงสร้างจากงานหล่อของทองคำ 16 และ 14 กะรัตที่ได้จากการทดลอง และพบความแตกต่างของรูปร่างเดนไดรต์ โดยเดนไดรต์ในเนื้อทองคำ 14 กะรัต จะมีลักษณะอ้วนป้อมกว่าซึ่งน่าจะเป็นผลจากทองคำ 14 กะรัต ผ่านการหล่อด้วยแบบปูนจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้ากว่าทอง 16 กะรัตที่หล่อลงในแบบที่ทำจากเหล็ก ดังนั้นเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในทอง 14 กะรัต มีระยะเวลาในการขยายตัวและเติบโตได้มากกว่า

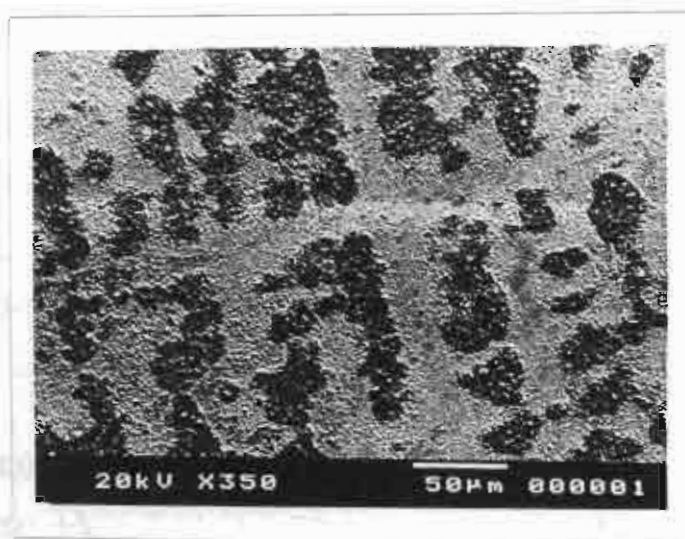
เมื่อนำชิ้นงานทดสอบทองคำ 16 กะรัต มาผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน คือ ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ และนำไปผ่านการกัดด้วยกรดผสมเจือจาง 30% ที่ผลิตขึ้นจากกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ เข้มข้นในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 หลังจากนั้นตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะในชิ้นทดสอบที่ผ่านการหล่อ ค่อย ๆ ถูกขจัดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นเมื่อใช้เวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวที่ประมาณ 30-40 นาที ดังภาพที่ 4.8 ค) และ ง) และขนาดเกรนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 0.63 มม. ที่เวลาอบ 10 นาที เป็น 1.35 มม. ที่เวลาอบ 240 นาที ในกรณีที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุ เงิน และทองแดง ในทองคำ 16 กะรัต อย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วพื้นที่ของชิ้นงานทดสอบที่ใช้เวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว 40 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูปที่ 4.9



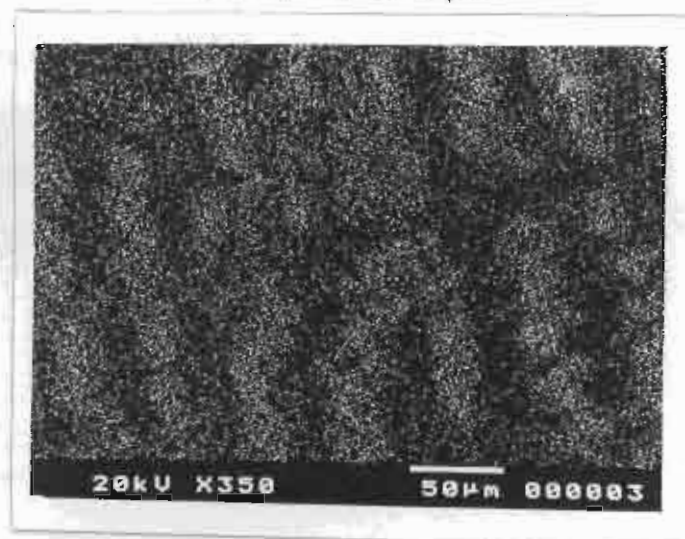
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทองคำ 16 กระรัต กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30 %

ก) งานหล่อ
ค) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 30 นาที

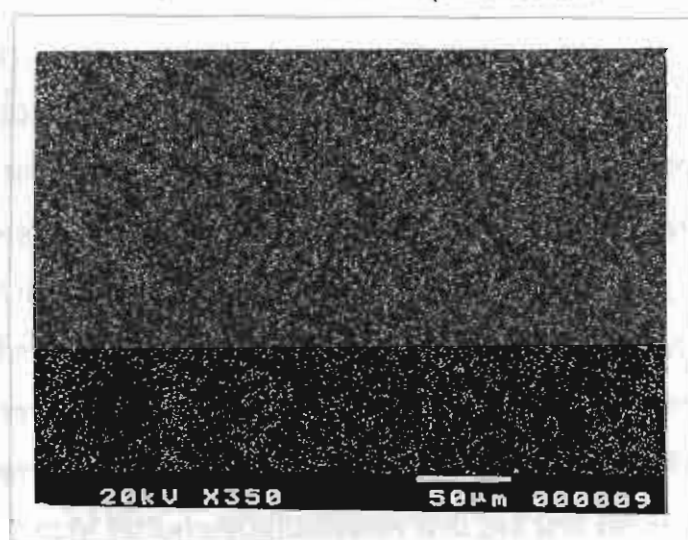
ข) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 20 นาที
ง) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 40 นาที



ก) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค



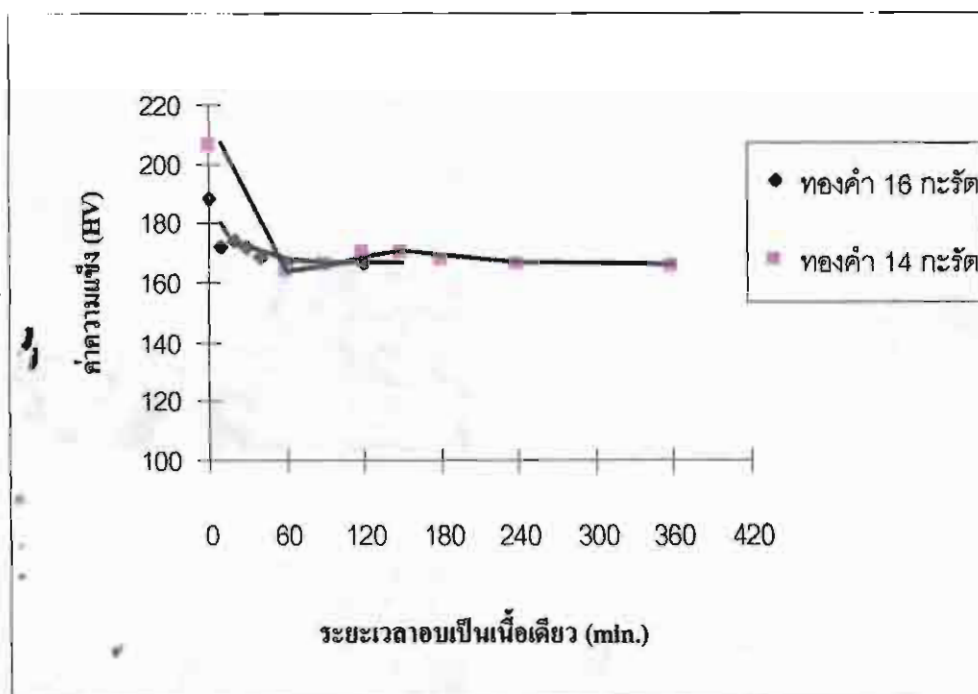
ข) การกระจายตัวของธาตุเงินเมื่อเริ่มต้น



ค) การกระจายตัวของธาตุเงินเมื่อ 40 นาที

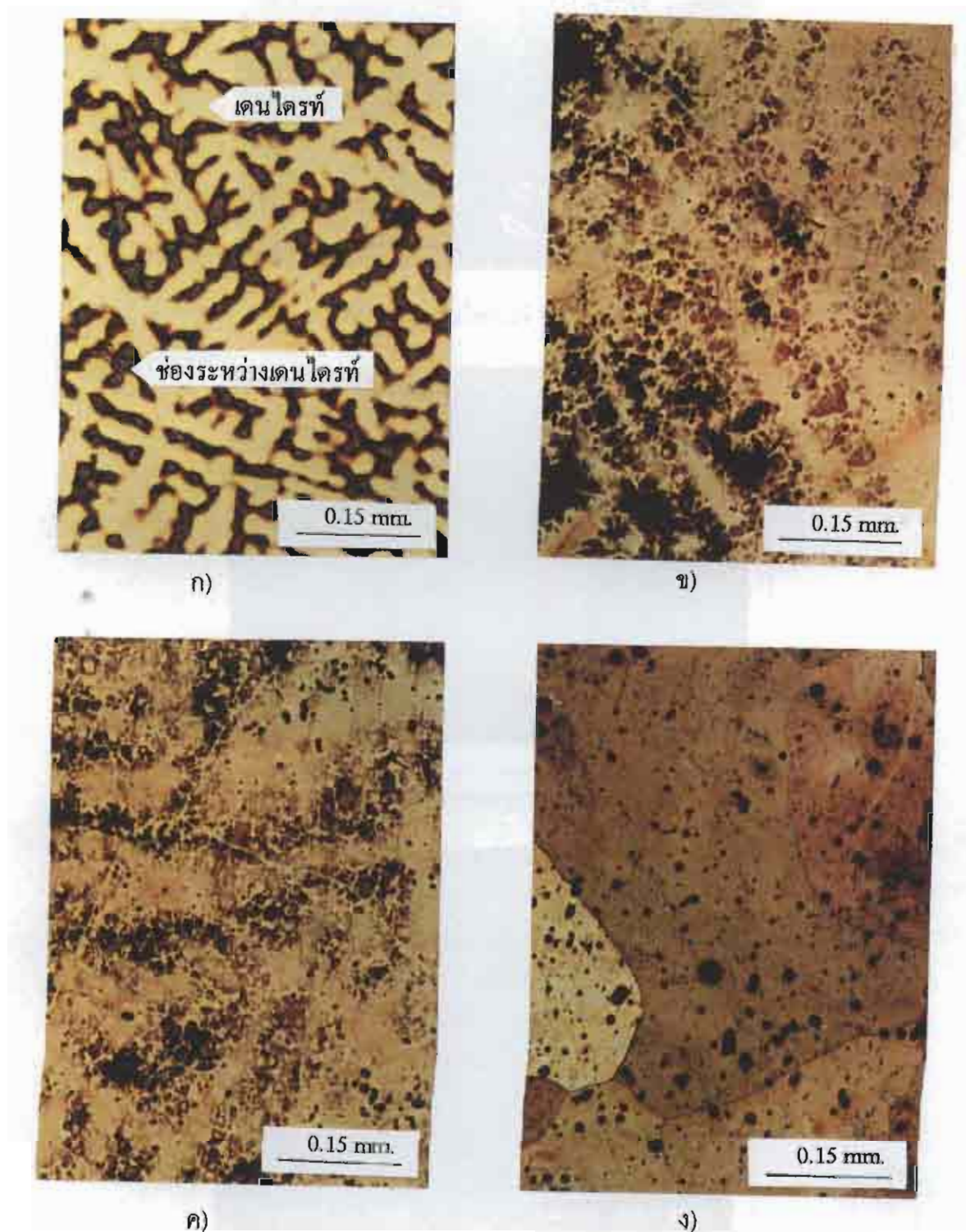
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของธาตุเงินของทองคำ 16 กระรัต ในสภาพหล่อและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว ที่เวลา 40 นาที ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping)

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของทองคำ 16 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว พบว่าค่าความแข็งลดลงเมื่อระยะเวลาอบนานขึ้น โดยขึ้นงานในสภาพหล่อก่อนการอบเป็นเนื้อเดียว มีค่าความแข็งเฉลี่ย เท่ากับ 187 HV และลดลงเหลือประมาณ 169 HV ที่เวลาอบ 40 นาที จากนั้นค่าความแข็งเริ่มคงที่อยู่ในช่วง 166-169 HV ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปที่ระยะเวลาการอบเป็นเนื้อเดียวต่าง ๆ กัน

เมื่อนำชิ้นงานทดสอบจากแท่งทองคำ 14 กระรัต มาทำการอบเป็นเนื้อเดียวในระยะเวลา ต่าง ๆ เริ่มจาก 60 90 120 150 180 240 และ 360 นาที ตามลำดับ แล้วนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกัดด้วยกรดเจือจาง 30 % จากกรด HCl + HNO₃ เข้มข้นในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 มาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบในสภาพหล่ ค่อย ๆ ถูกขจัดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นเมื่อเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวที่ประมาณ 240 นาที ดังรูปที่ 4.11 และขนาดเกรนเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้เวลาในการอบนานขึ้น เช่น ขนาดเกรนจาก 0.76 มม. ที่เวลาอบ 60 นาที ขยายใหญ่เป็น 1.16 มม. ที่เวลาอบ 240 นาที และจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุ เงิน และทองแดง ในชิ้นงานทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว นาน 240 นาที มีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับรูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานในระยะต่าง ๆ ของทองคำ 14 กระรัต

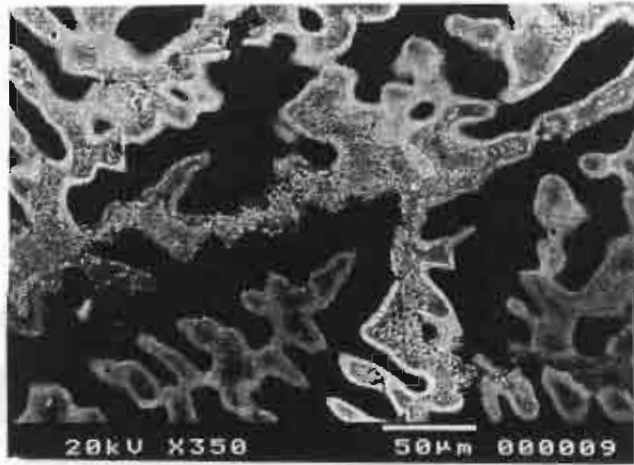
กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%

ก) งานหล่อ

ค) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 120 นาที

ข) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 90 นาที

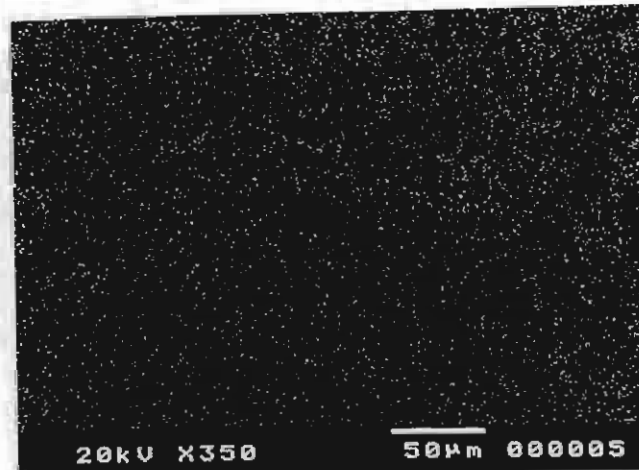
ง) อบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 240 นาที



ก) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค



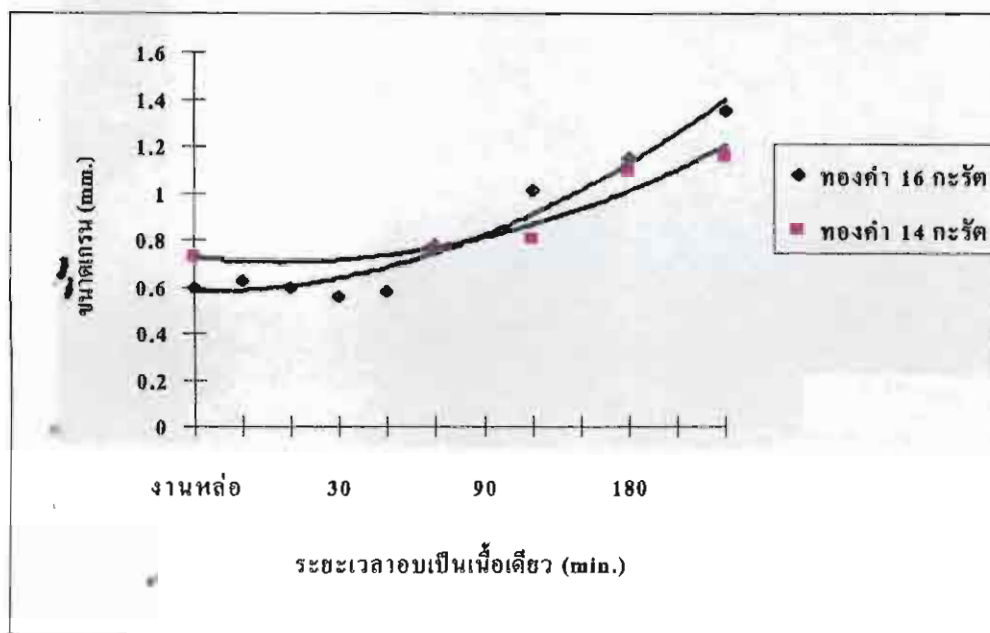
ข) การกระจายตัวของธาตุเงินเมื่อเริ่มต้น



ค) การกระจายตัวของธาตุเงินเมื่อ 240 นาที

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของธาตุเงินในทองคำ 14 กระรัตในสภาพหล่อและสภาพผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 240 นาที ด้วยเทคนิคการทำแผนภาพ (Mapping)

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว พบว่าค่าความแข็งลดลงเมื่อระยะเวลาอบนานขึ้น โดยชิ้นงานสภาพหล่อก่อนการอบเป็นเนื้อเดียวมีค่าความแข็งเฉลี่ย เท่ากับ 210 HV และลดลงเหลือประมาณ 168 HV ที่เวลาอบประมาณ 120 นาที จากนั้นค่าความแข็งเริ่มคงที่ในช่วง 166-169 HV ดังรูปที่ 4.10

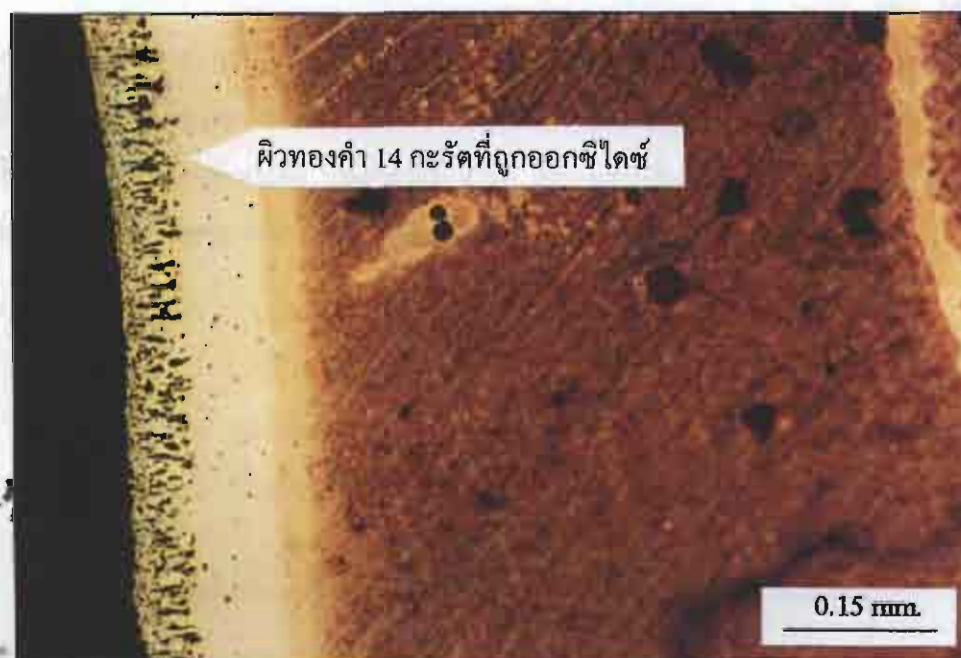


รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนเมื่อระยะเวลาการอบเป็นเนื้อเดียว เปลี่ยนไป ในทองคำ 14 กระรัต และ 16 กระรัต

ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวทั้ง 14 กระรัต และ 16 กระรัต มีลักษณะเป็นรูพรุนจากการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจนภายในเตาอบที่ถูกปกคลุมด้วยก๊าซผสมระหว่างไนโตรเจน และไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่กำหนด ผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าไม่สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันในขั้นตอนการอบเป็นเนื้อเดียวได้ด้วยวิธีนี้ และเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมของผิวที่ถูกออกซิไดซ์ ในทองคำ 14 กระรัตได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตาราง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบส่วนผสมที่ผิวชิ้นงานที่อบ และไม่อบเป็นเนื้อเดียว

ทองคำ 14 กระรัต	Au (wt%)	Ag (wt%)	Cu (wt%)
อบเป็นเนื้อเดียว	29.75	61.79	8.44
ไม่อบเป็นเนื้อเดียว	55.94	26.27	17.79



รูปที่ 4.14 ผิวทอง 14 กระรัตที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%

จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่าระยะห่างของแซนเดนไดรต์มีผลมากต่อการกำหนดระยะเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว ความแตกต่างของระยะห่างของแซนเดนไดรต์ในทองคำ 16 กระรัตกับทองคำ 14 กระรัตที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นผลจากกรรมวิธีการผลิตอย่างเห็นได้ชัด โดยทองคำ 16 กระรัตที่หลอมด้วยเปลวไฟ และเย็นตัวในแบบเหล็กมีระยะห่างของแซนเดนไดรต์สั้นกว่าทองคำ 14 กระรัตที่หลอมด้วยเตาเหนียวน้ำ และเย็นตัวในแบบปูน ประมาณ 2 เท่าตัว แต่ระยะเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวแตกต่างกันถึงประมาณ 5-6 เท่าตัว ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้ประมาณเวลาอบเป็นเนื้อเดียว ($\tau = L^2/\pi^2 D_g$) โดยค่าระยะห่างของแซนเดนไดรต์กับช่องระหว่างแซนเดนไดรต์ (L) เป็นค่าตัวแปรตามที่มีค่ายกกำลังสองเพียงตัวเดียวในสมการ

แผนภูมิค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปกับเวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวของทองคำกระรัตที่ใช้ในการทดลอง ดังในรูปที่ 4.10 แสดงถึงความร้อนที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวลดค่าความแข็งของชิ้นงานอย่างรวดเร็วซึ่งก็คือการลดความเค้นภายในวัสดุที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหล่อ และค่าความแข็งเริ่มคงที่เมื่อชิ้นงานมีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น

ทองคำ 14 กระรัตและ 16 กระรัต ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีค่าความแข็งหลังการอบเป็นเนื้อเดียวที่ใกล้เคียงกันอาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันไม่มากนัก

นอกจากนี้ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของตัวกลางการชุบของโลหะเมื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิการอบเป็นเนื้อเดียว โดยทำการทดลองอบเป็นเนื้อเดียวกับทองคำ 16 กระรัต และ 14 กระรัต ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 40 นาที และ 240 นาที ตามลำดับ แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายในเตา หรือที่เรียกกันว่า Furnace cool หลังจากนั้นทำการวัดค่าความแข็ง จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานทองคำกระรัต (ดูตารางที่ 4.6) ที่ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาอย่างช้า ๆ จะมีค่าความแข็งสูงมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวเป็นเฟสใหม่ และการเรียงตัวอย่างมีระเบียบของอะตอมเกิดขึ้น

ตาราง 4.6 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของทองคำ 14 กระรัต และ 16 กระรัตที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวแล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา

	ค่าความแข็งเฉลี่ย HV (300 g.)
ทองคำ 16 กระรัต	211
ทองคำ 14 กระรัต	255

โครงสร้างจุลภาคของทองคำ 16 กระรัต และทองคำ 14 กระรัต มีลักษณะเป็น 2 เฟส ดังรูปที่ 4.15 จากแผนภูมิสมมูลเฟสของ Katuhiro Yasuda แสดงให้เห็นว่าเฟสที่เป็นพื้นฐานคือ เฟสที่มีทองแดงผสมอยู่มาก (Cu-Rich Phase, AuCu II) และเฟสที่แทรกตัวอยู่คือ เฟสที่มีเงินผสมอยู่มาก (Ag-Rich Phase, α_2) รูปที่ 4.16



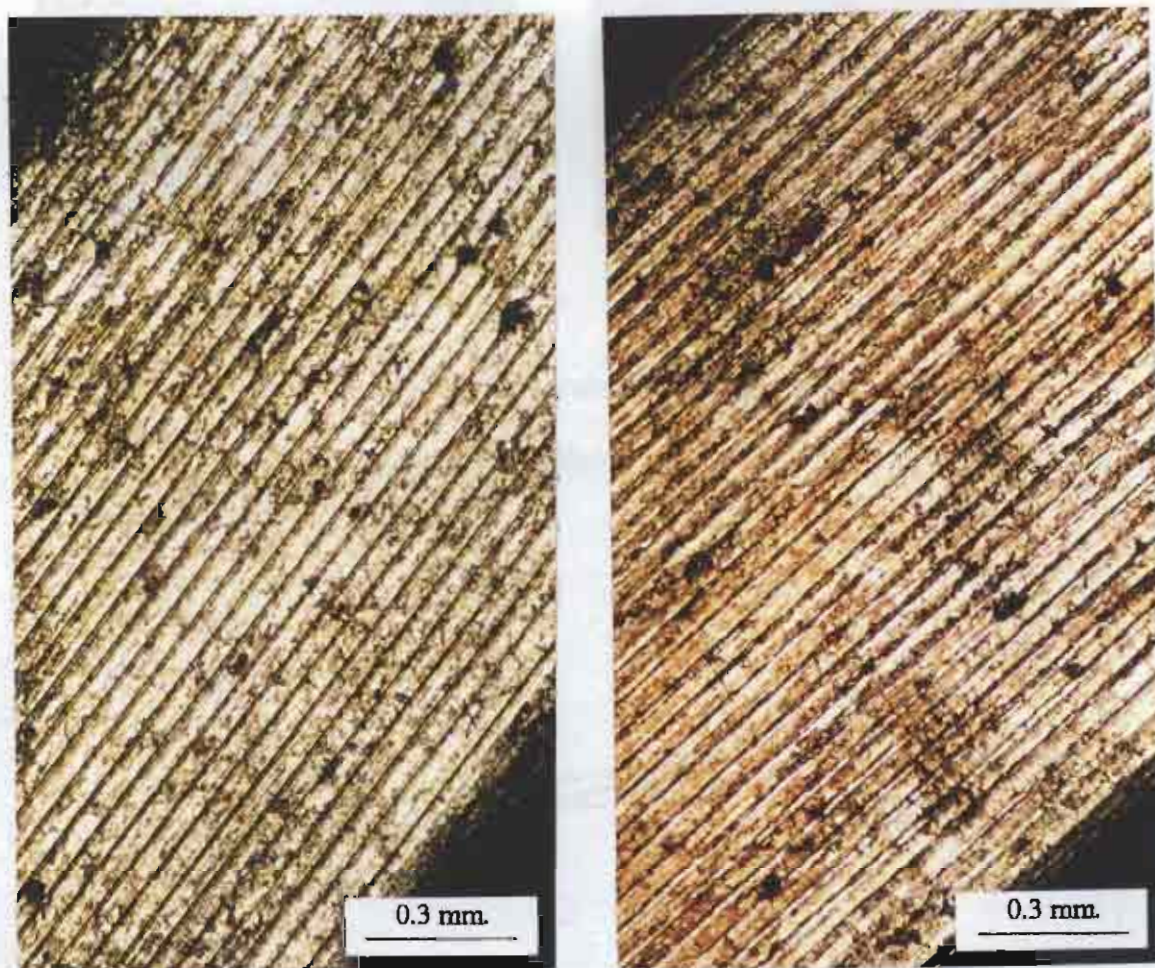
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคทองคำ 14 กระรัต ผ่านอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C แล้ว
เย็นตัวภายในเตา กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%



รูปที่ 4.16 แสดงเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทองคำที่อบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C แล้ว
ปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา กัดด้วยสารละลาย $\text{KCN} + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$

4.3.2 อิทธิพลของการรีดต่อชิ้นงานที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

จากการทดลองรีดทองคำ 14 กระรัต ด้วยเครื่องรีดจนได้เส้นลวดที่มีอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดประมาณ 88% แล้วนำมาตรวจสอบสภาพผิวหลังการรีด ปรากฏว่าไม่พบความเสียหายบนผิวของชิ้นงานทั้ง 2 ดังรูปที่ 4.17 อย่างไรก็ตามเมื่อนำชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยกัดด้วยกรดเจือจาง 30% จากกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ เข้มข้นในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 พบว่าโครงสร้างที่ปรากฏอยู่ยังคงเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรท์ ดังรูปที่ 4.18 และค่าความแข็งชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีความสม่ำเสมอกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



ก)

ข)

รูปที่ 4.17 แสดงผิวของทองคำ 14 กระรัตที่ผ่านการรีดที่ปริมาณลดพื้นที่หน้าตัด 88%

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

ข) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว



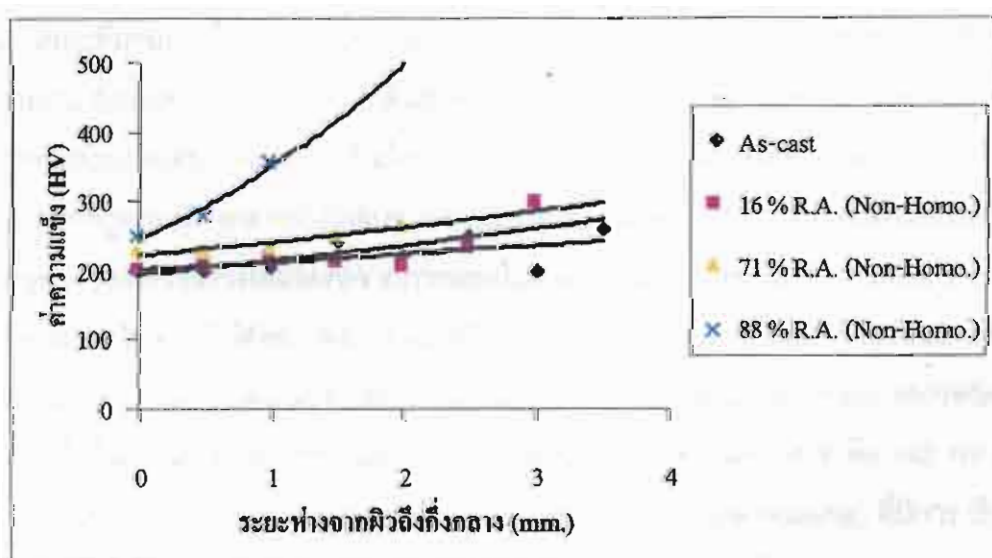
ก)

ข)

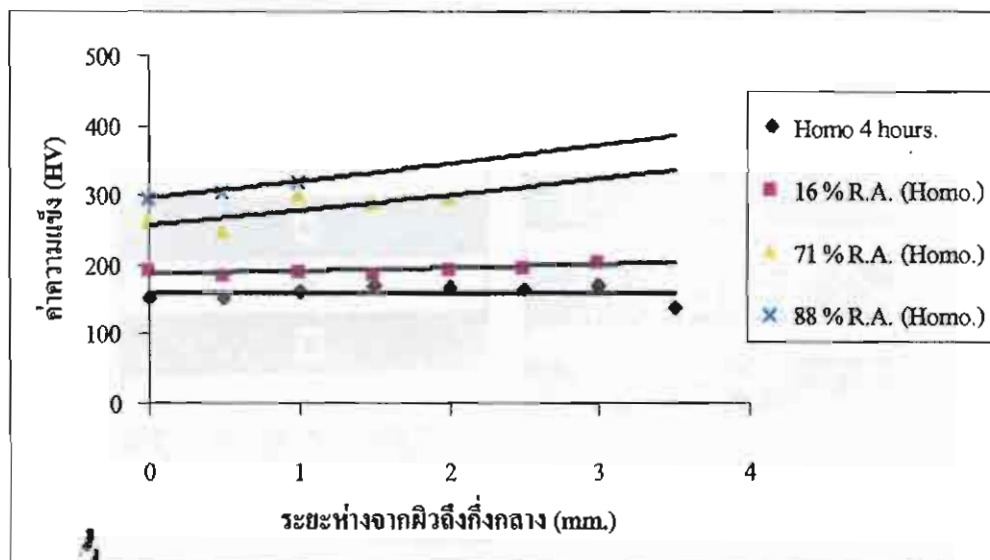
รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของค่า 14 กระรัต ที่ผ่านการรีด 88%

ก) ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

ข) ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

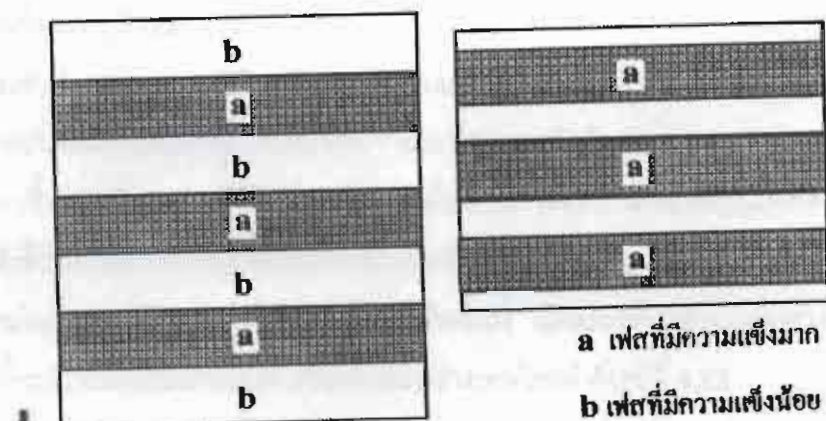


รูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งของค่า 14 กระรัตที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจากขอบถึงกึ่งกลางชิ้นงาน



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งของค่า 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจากขอบถึงกึ่งกลางชิ้นงาน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้ อัตราการลดขนาดมีค่าสูง เช่น 88% ค่าความแข็งบริเวณผิวชิ้นงานจะมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน สิ่งนี้เป็นผลมาจากความเครียดที่บริเวณผิว เป็นลักษณะที่เรียกกันว่า ความเครียดแบบ Redundant ซึ่งจะมีค่าความเครียดสูงกว่าเนื่องจากบริเวณผิวมีการเปลี่ยนรูปโดยมีความเสียหายมาเกี่ยวข้อง ขณะที่ความเครียดบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็นความเครียดในลักษณะที่สม่ำเสมอ ที่รู้จักกันดีว่าคือ ความเครียดแบบ Homogenous ดังนั้นจึงเป็นที่รู้กันว่าโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปในลักษณะลาก ดึง หรือรีดขึ้นรูป จะมีความเครียดบริเวณผิวสูงกว่าใจกลางของชิ้นงาน ดังนั้นค่าความแข็งโดยปกติแล้วที่บริเวณผิวจะสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าความแข็งที่ผิว และกึ่งกลางชิ้นงานที่มีอยู่สูงมาก ปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นอาจจะอธิบายได้โดยผลของกรรมวิธีการผลิตแบบรีดขึ้นรูปรวมผสมกับ ลักษณะของโครงสร้างเดนไดรต์จากการหล่อไม่สามารถกระจายความเค้น (Stress Distribution) สู่วัสดุที่อยู่ลึกลงไปจากผิวได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างของชิ้นงานที่มี 2 เฟส คือเดนไดรต์ และช่องระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกัน และจากการตรวจวัดค่าความแข็งพบว่าส่วนที่เป็นเดนไดรต์ มีค่าความแข็งสูงกว่าส่วนที่เป็นช่องระหว่างเดนไดรต์ คือ 143 HV และ 110 HV ตามลำดับ โครงสร้างดังกล่าวคล้ายโครงสร้างในวัสดุผสม (Composite Material) ที่มีการเรียงตัวของเนื้อวัสดุ 2 ชนิด ที่มีสมบัติวัสดุแตกต่างกัน สลับกันเป็น ชั้น ๆ ดังรูปจำลองที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงแบบจำลองโครงสร้างในวัสดุผสมเมื่อได้รับแรงภายนอก

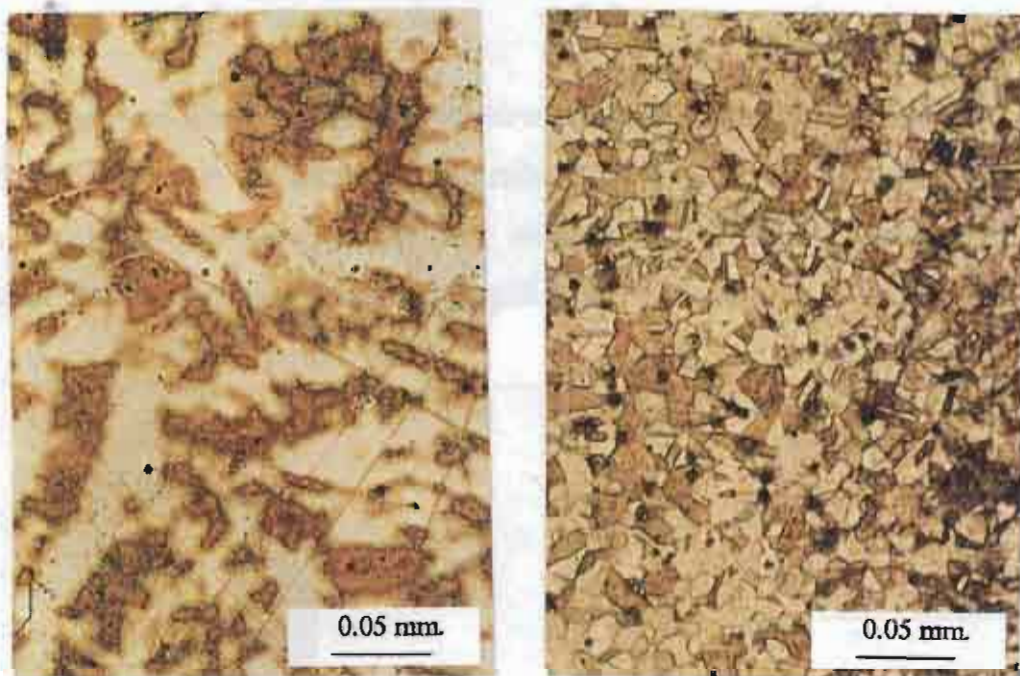
จากการรื้อชิ้นงานทองคำ 16 กระรัต ที่หลอมด้วยหัวพ่นไฟ (Torch) เกิดการร้าวที่ผิวของชิ้นงานอย่างชัดเจนที่ปริมาณลดพื้นที่หน้าตัดประมาณ 25% จากการตรวจดูด้วยกล้องขยาย 20 เท่า พบว่าชิ้นงานมีความไม่สม่ำเสมอของส่วนผสมอย่างเห็นได้ชัดคือ สามารถพบความแตกต่างได้จากสีชิ้นงาน สันนิษฐานว่าเกิดจากขั้นตอนการหล่อแท่งชิ้นงานที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงผิวที่เกิดความเสียหายจากการรื้อ ชิ้นงานทองคำ 16 กระรัต ที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

4.3.3 อิทธิพลของการอบอ่อนต่อชิ้นงานรีดที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านการรีดเป็นเส้นลวดที่มีขนาด 2.2×2.3 มม. หรือมีปริมาณการลดพื้นที่ 88% มาอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ขนาดเกรนหลังการอบอ่อนชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีค่าประมาณ 0.022 มม. และ มีความแข็งประมาณ 169 HV ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวขนาดเกรนมีค่าประมาณ 0.012 มม. และมีค่าความแข็งประมาณ 161 HV จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการรีดแล้วอบอ่อนโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวเมื่อกัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ ปรากฏให้เห็นโครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์ และเมื่อกัดด้วยสารละลาย $\text{KCN} + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ ปรากฏโครงสร้างที่เป็นเกรนในชิ้นงานเดียวกัน แสดงว่าเกรนที่เกิดขึ้นนี้ แต่ละเกรนมีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกันขึ้นอยู่กับว่าเกรนเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นเดนไดรต์ หรือช่องระหว่างเดนไดรต์ ดังรูปที่ 4.23



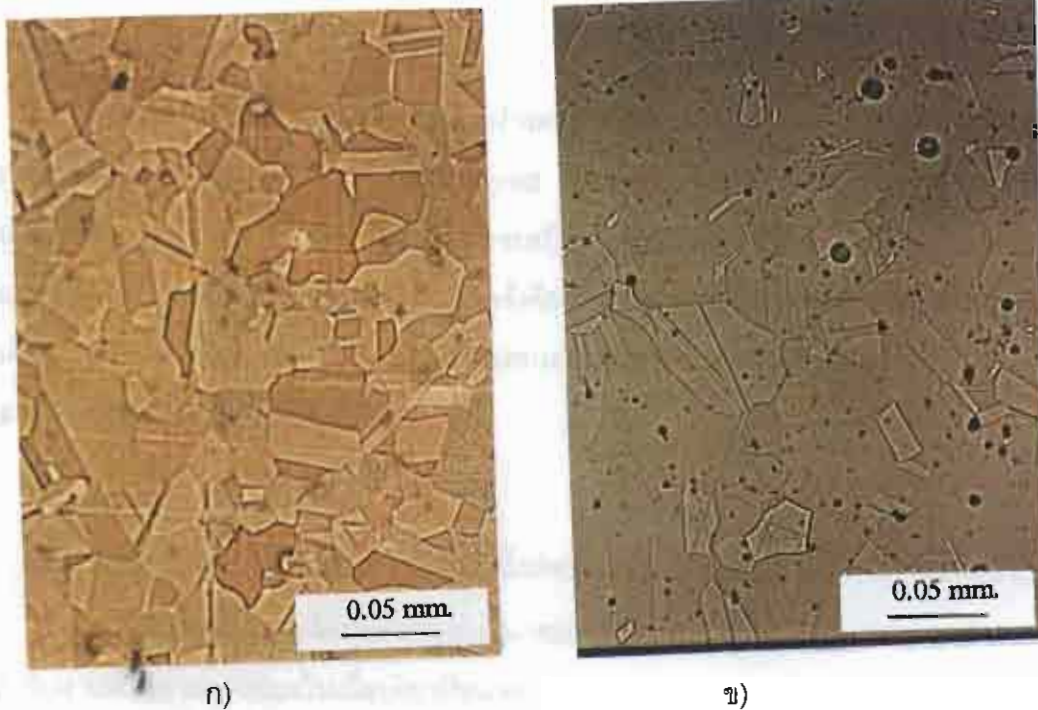
ก)

ข)

รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการรีดและอบอ่อน ซึ่งผลิตขึ้นจากโลหะทอง 14 กระรัต ที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

ก) กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

ข) กัดด้วยสารละลาย $\text{KCN} + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$

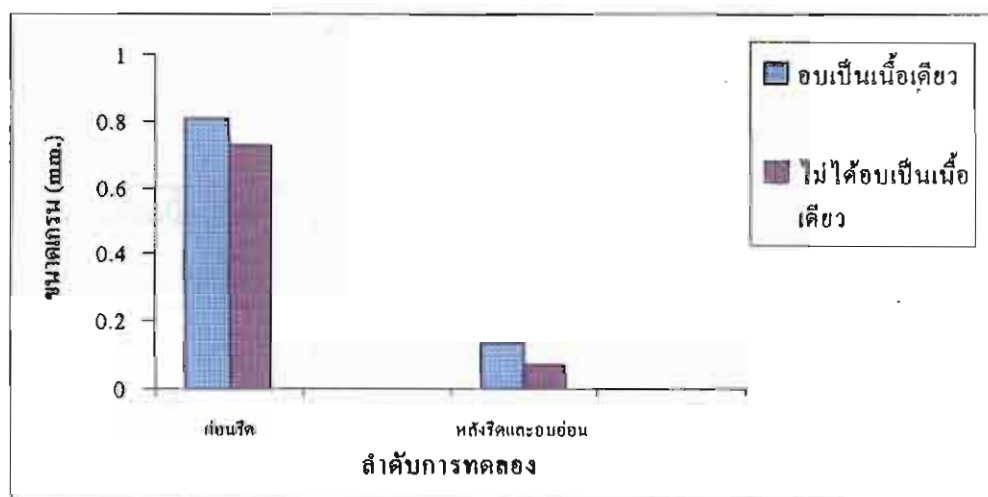


รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของ 14 กะรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและผ่านการรีด และอบอ่อน

ก) กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

ข) กัดด้วยสารละลาย $\text{KCN} + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$

ขนาดเกรนที่เล็กลงประมาณ 98% จากขนาดเกรนเริ่มต้น ทั้งชิ้นงานที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว จากการอบอ่อนซึ่งทำให้เกิดการเกิดเกรนใหม่ (Recrystallization) แสดงว่าการอบเป็นเนื้อเดียวก่อนการรีดไม่มีผลต่อการอัตราการเกิดเกรนใหม่ แต่ขนาดเกรนสุดท้ายที่ไม่เท่ากันมีผลมาจากขนาดเกรนเริ่มต้นที่ต่างกัน เห็นได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของทองคำ 14 กะรัต ในขั้นตอนการรีด

ค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสองที่ผ่านการอบอ่อนมีความแตกต่างกันไม่มาก แสดงถึงผลของการอบอ่อนสามารถลดพลังงานสะสม (Stored energy) ภายในชิ้นงานทั้งสองได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านกับไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว พบว่าค่าความแข็งหลังการอบอ่อนมีค่าลดลงมาอยู่ที่ระดับประมาณ 167 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งก่อนทำการขึ้นรูป (หรือหลังอบเป็นเนื้อเดียว) แสดงว่าเวลา 30 นาที ที่ใช้ในการอบอ่อนเพียงพอแล้วต่อการลดความแข็งในชิ้นงาน เพื่อที่จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานต่อไปอีกได้

4.3.4 ผลของการอบเพิ่มความแข็งต่อชิ้นงานที่ผ่าน และไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมาอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีขนาดเกรนประมาณ 0.013 มม. และมีค่าความแข็งประมาณ 254 HV ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีขนาดเกรนประมาณ 0.024 มม. และมีค่าความแข็งประมาณ 260 HV ขนาดเกรนหลังการอบเพิ่มความแข็งโตกว่าขนาดเดิมประมาณ 8% สำหรับชิ้นงานที่ไม่อบเป็นเนื้อเดียว และ 9% สำหรับชิ้นงานที่อบเป็นเนื้อเดียว และจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่กัดด้วยกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ พบว่ามีการตกผลึก (Precipitate) ที่บริเวณขอบเกรนทั้งสองตัวอย่างชัดเจน เมื่อตรวจสอบผลสมทางเคมีพบว่าส่วนที่ตกผลึกออกมาปริมาณของเงินมาก และส่วนที่เป็นเนื้อภายในเกรนมีปริมาณเนื้อทองแดงมาก ซึ่งเป็นไปตามแผนภูมิสมดุลของเฟส ที่อุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ 350°C ความสามารถในการละลายของเงินในสารละลายของแข็งจะลดลง โดยเฟสที่เกิดขึ้นนี้คือ α_2 (Ag-Rich Phase)

ตาราง 4.7 แสดงค่าส่วนผลสมทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็ง

	Au (wt.%)	Ag(wt.%)	Cu(wt.%)
ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว (ภายในเกรน)	39.17	25.74	35.10
เฟสที่เกิดขึ้นใหม่ (บริเวณขอบเกรน)	17.00	62.77	20.20
ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว (ภายในเกรน)	43.50	22.63	33.90
เฟสที่เกิดขึ้นใหม่ (บริเวณขอบเกรน)	20.10	59.26	20.62



ก)



ข)

รูปที่ 4.26 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเมื่ออบเพิ่มความแข็งหลังผ่านการรีดเย็นและการอบอ่อน กัดด้วยกรด $\text{HCl}+\text{HNO}_3$ (3:1) เจือจาง 30%

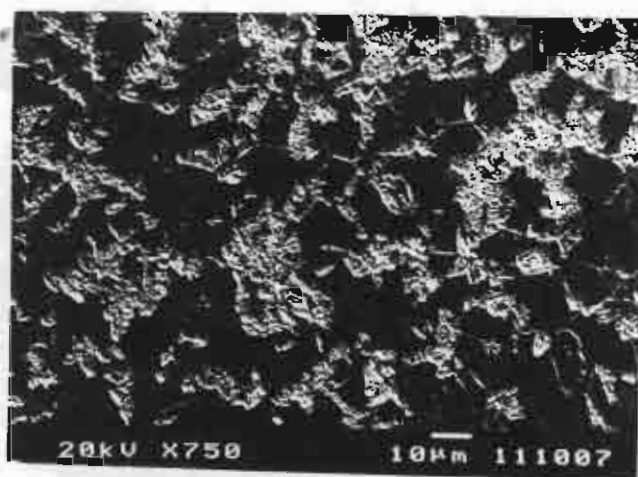
ก) ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

ข) ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงถึงค่าความแข็งของชิ้นงานที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งน่าจะมีผลจากปริมาณของเฟส α_2 ที่ตกผลึก (Precipitated Phase) ตรงตำแหน่งบริเวณขอบเกรนมีปริมาณไม่เท่ากัน สิ่งนี้อาจจะเป็นผลมาจากปริมาณขอบเกรน และ ความไม่สม่ำเสมอของส่วนผสมทางเคมีในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว และจากการทดลองในครั้งนี้ พบว่าการอบเพิ่มความแข็งของค่าที่ผ่านการรีดเย็นและอบอ่อนมาแล้ว สำหรับทองคำ 14 กระรัตที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีความแข็งต่ำกว่าทองคำที่ผ่านอบเป็นเนื้อเดียวเพียงประมาณ 2 %



ก)



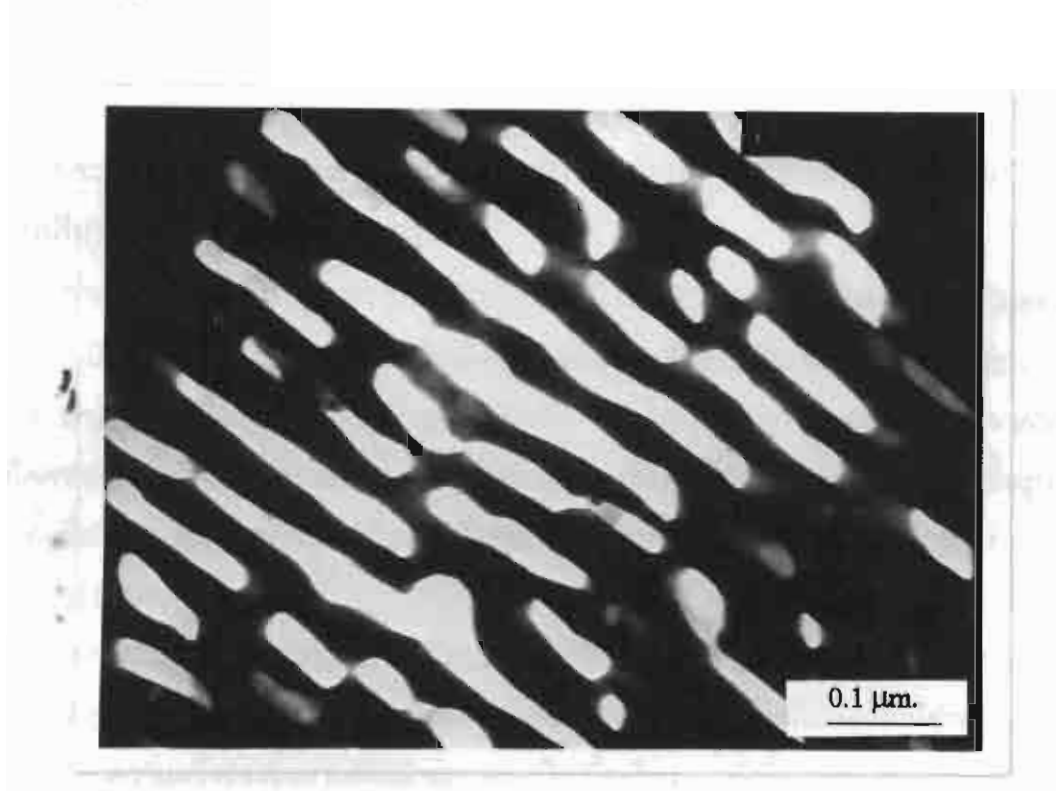
ข)

รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของทองคำ 14 กระรัต เมื่อ
 อบเพิ่มความแข็ง หลังผ่านการรีดเย็น และการอบอ่อน กัดด้วยสารละลาย KCN+(NH₄)₂S₂O₃
 เจือจาง 10%

ก) ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

ข) ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรงไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าบริเวณขอบเกรนมีโครงสร้างแบบเป็นชั้น ๆ (Lamellar Structure) แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือจึงไม่สามารถระบุได้ว่าโครงสร้างดังกล่าวเป็นของเฟสใด ระหว่าง AuCu II กับ α_2 ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว อบเพิ่มความแข็งแรง การรีดเย็น และการอบอ่อน

4.4 สรุปผลการวิจัยในหัวข้ออิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียว

1. เวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวจากการทดลองวิจัยจะมีค่าประมาณ 2 เท่า ของค่า τ (Relaxation Time) ที่ได้จากการคำนวณ
2. การอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800°C ในเตาอบชุบที่ปกคลุมด้วยก๊าซ $3\% \text{H}_2 + \text{N}_2$ balance ไม่เพียงพอที่จะใช้ป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่ผิวชิ้นงาน และผิวของโลหะทองคำสมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีปริมาณของทองแดงลดต่ำลงอย่างมาก
3. การอบเป็นเนื้อเดียวทองคำ 14 กระรัตที่อุณหภูมิ 800°C นาน 4 ชั่วโมง แล้วชุบ (Quench) ในน้ำเย็นอุณหภูมิใกล้ 0°C ทันที สามารถทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวในเนื้อทองคำกระรัตได้จริง
4. การอบเป็นเนื้อเดียวก่อนการขึ้นรูปเย็นทำให้ค่าความแข็งแรงก่อนการรีดลดลง นอกจากนี้ยังมีผลทำให้เกิดความแข็งแรงอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อทำการขึ้นรูปเย็นพบว่าโลหะทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการขึ้นรูป (Work Hardening)
5. การอบเป็นเนื้อเดียวทองคำ 14 กระรัต มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเป็นเส้นลวดก่อนการอบอ่อน ทำให้ค่าความแข็งแรงสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานมากขึ้น แต่ไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการรีดเป็นผลมาจากอิทธิพลของการขึ้นรูปเย็น
6. ในกรณีนี้ชิ้นงานทองคำ 14 กระรัตที่ผ่านการรีดเป็นเส้นที่อัตราการลดขนาด 88% มาแล้ว การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วชุบในน้ำเย็น สามารถลดความแข็งแรงในชิ้นงานลงได้จริงโดยเกิดปรากฏการณ์การเกิดเกรนใหม่ขึ้น โดยไม่สูญเสีย ความเป็นเนื้อเดียวไป
7. การอบเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 60 นาที แล้วชุบในน้ำเย็น ชิ้นงานทองคำ 14 กระรัต ที่ผ่านการขึ้นรูป เย็น และอบอ่อนมาก่อน ทำให้เกิดการตกผลึกเป็นเฟสใหม่บริเวณขอบเกรน ส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นมีปริมาณของธาตุเงินสูง และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานสูงขึ้น 53% กับชิ้นงานที่ ผ่านการอบ เป็นเนื้อเดียว และ 56% กับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว
8. การอบเพิ่มความแข็งแรงทองคำที่ผ่านการรีดเย็น และอบอ่อนมาแล้ว ทองคำกระรัตที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าทองคำกระรัตที่อบเป็นเนื้อเดียวประมาณ 2%

ผลสรุปข้างต้นจะเห็นได้ว่าการอบเป็นเนื้อเดียวในชิ้นงานทองคำ 14 กระรัต และ 16 กระรัตที่มีส่วนผสมทางเคมีของเงินและทองแดงดังกล่าว สามารถนำมาใช้เพื่อก่อให้เกิดเนื้อวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันได้และมีค่าความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของการอบเป็นเนื้อเดียวต่อความสามารถการขึ้นรูปยังไม่เกิดผลที่เห็นได้ชัดเจนนัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะ หัวข้อวิจัยที่น่าสนใจและควรทำการศึกษาต่อไปในอนาคต มาในรายงานฉบับนี้ด้วย

1. ควรทำการศึกษาการอบเป็นเนื้อเดียวของโลหะทอง 14 กระรัตที่มีปริมาณทองแดงผสมอยู่สูงกว่าที่ได้ศึกษาไปแล้ว เพราะเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะและส่งผลให้โลหะแตกในระหว่างการหล่อและการขึ้นรูปเป็นเฟสที่มีธาตุทองแดงผสมอยู่สูง

2. ควรทำการศึกษาการอบเป็นเนื้อเดียวกับทองคำ 18 กระรัต สีชมพู (Pink Gold) ที่มีปริมาณธาตุทองแดงในเนื้อโลหะสูง เนื่องจากเฟส AuCu เป็นเฟสที่พบในโลหะทองที่มีธาตุผสมหลักคือ ทองแดง และเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงสูงและเปราะ

3. ควรทำการศึกษาการอบเพิ่มความแข็งแรงโดยเน้นถึงระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองอาจจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว สังเกตได้จากปริมาณของเฟส α_2 มีจำนวนมาก ในขณะที่ปริมาณของเฟส α_2 ในชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวมีปริมาณน้อยมาก ทำให้ไม่ได้ความแข็งแรงสูงสุด

4. ควรทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการเย็นตัวของโลหะในแบบปูน ต่อ คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างงานหล่อมักมีลักษณะแตกต่างกัน และอาจจะทำให้การอบเป็นเนื้อเดียว เป็นกรรมวิธีที่จำเป็นต้องนำมาใช้แก้ไขในกรณีที่อัตราการเย็นตัวของโลหะในแบบปูนช้าเกินไป นอกจากนี้ยังมีเหตุผลสนับสนุนกรณีนี้ก็คือ ค่าความแข็งที่มีค่าสูงขึ้นมากในการทดลองทองคำ 14 และ 16 กระรัต ที่ทิ้งให้เย็นตัวในเตาจากอุณหภูมิของการอบเป็นเนื้อเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ควรศึกษาอัตราการเย็นตัวในลักษณะเป็นขั้นบันได

5. ในการป้องกันผิวมิให้เกิดการออกซิเดชัน จากการทดลองพบว่าก๊าซ $H_2 + N_2$ ไม่มีประสิทธิผลเพียงพอต่อการป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นสิ่งที่ควรแก้ไขคือ การปกคลุมผิวของชิ้นงานด้วยแผ่นทองบริสุทธิ์ เพื่อลดการเกิดออกซิเดชันลง

บทที่ 5

พฤติกรรมความแข็งแรงของโลหะทองคำ 18 กระรัต ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูป

โลหะผสมทองคำ 18 กระรัต มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในทางทันตกรรม , เครื่องประดับอัญมณี และ ในทางวิศวกรรม เนื่องจากโลหะผสมทองคำ 18 กระรัต สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงได้ด้วยการบ่มเพิ่มความแข็งแรง (Aging) ซึ่งทำให้โลหะผสมสามารถทนการขีดข่วนได้ดี และสามารถลดความหนาของชั้นงานลงได้ โดยยังคงมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน นอกจากนั้นโลหะผสมทองคำ 18 กระรัต ยังมีคุณสมบัติต้านทานการหมอง (tarnish) ได้ดี เมื่อเทียบกับโลหะผสมทองคำที่มีค่ากระรัตต่ำ ๆ เช่น โลหะผสมทองคำ 10 กระรัต และ 14 กระรัต นอกจากนั้นโลหะผสมทองคำ 18 กระรัต ยังมีสีสวยงาน สามารถปรับเปลี่ยนสีได้ ตั้งแต่สีเหลืองอมเขียว สีเหลือง จนถึงสีเหลืองแดง ตามส่วนผสมทางเคมี

K. Yasuda และคณะ⁽¹⁻²⁾ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบ่มเพิ่มความแข็งแรง (Age Hardening) ของโลหะผสมทองคำ Au-Cu-Ag 18 กระรัต 16 กระรัต และ 14 กระรัต ที่มีปริมาณ Cu:Ag เป็น 65 : 35 และโลหะผสมทองคำที่ใช้ในทางทันตกรรม ที่มีส่วนผสมของ Pt , Pd , และ Zn แต่อย่างไรก็ตาม งานศึกษาดังกล่าวจำกัดอยู่ที่ส่วนผสมบางส่วนผสมเท่านั้น นอกจากนั้น ในการศึกษาการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมทองคำ Au-Cu-Ag ดังกล่าว ยังไม่มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการบ่ม อีกด้วย ในขณะที่งานศึกษา⁽³⁻⁷⁾ อื่น ๆ เน้นการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ซึ่งส่วนใหญ่ จะศึกษาในโลหะผสมที่เป็น Binary alloy (เช่น Au-Cu , Au-Ag , Au -Pd) เท่านั้น

ในการวิจัยนี้ จะทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความแข็งแรงของโลหะผสมทองคำ 18 กระรัต ในขั้นตอนการบ่มเพิ่มความแข็งแรง โดยมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี , อุณหภูมิในการบ่ม , รวมทั้งเวลาในการบ่มด้วย นอกจากนั้น ยังจะศึกษาถึงพฤติกรรมความแข็งแรงของโลหะผสมในขั้นตอนการขึ้นรูปเย็น ก่อนการอบชุบทางความร้อนด้วย

5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากลไกความแข็งแรงของทองคำผสมในระบบ ทองคำ-ทองแดง-เงิน ที่มีปริมาณของทองคำ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูปเย็น
2. เพื่อศึกษาผลของส่วนผสมทางเคมีต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมทองคำ
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมทองคำที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและการขึ้นรูปเย็น

5.2 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาโลหะผสมทองคำ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยให้อัตราส่วนของเงินต่อทองแดง เป็น 1:4 (5%wt Ag), 2:3 (10%wt Ag), 3:2 (15%wtAg) และ 4:1 (20%wt Ag) โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม ด้วยการทำ Solution treatment ที่ 800 °C นาน 1 ชั่วโมง และ Age hardening ที่อุณหภูมิ 150 , 200 , 270 , 300 และ 350 °C
3. ศึกษาผลของการขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมที่เตรียมได้จากข้อ 1.

5.3 การปรีทัศน์วรรณกรรม

ในทางทันตกรรม, เครื่องประดับอัญมณี และทางวิศวกรรม นอกจากจะต้องการสีที่สวยงามของโลหะผสมทองคำที่ใช้แล้ว คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงก็คือ คุณสมบัติทางกล กล่าวคือความแข็งแรง และความแข็งแรงของโลหะผสมทองคำดังกล่าวด้วย ความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรง (Hardenability) ของโลหะผสมทองคำจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในโลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน 14 กระรัต (58.3 %Au) ต้องการปริมาณเงินในช่วง 10-32 % ส่วนโลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน 10 กระรัต (41.7 %Au) ต้องการปริมาณเงินในช่วง 12-47 % ในขณะที่โลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน 18 กระรัต (75 %Au) ต้องการปริมาณเงินที่น้อยกว่า 20 % เพื่อให้โลหะผสมดังกล่าว สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการบ่ม⁽⁸⁻⁹⁾ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการบ่ม ซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณีคือ 1) การตกตะกอนของเฟสที่มีทองแดงสูง (Cu-rich) หรือเฟสที่มีเงินสูง (Ag-rich) และ 2) การเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (disordered) ไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (ordered) ทั้งนี้ขึ้นกับส่วนผสมของโลหะผสมและอุณหภูมิในการบ่ม การเข้าใจโลหะวิทยาของโลหะผสมทองคำจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมส่วนผสมและอุณหภูมิในการบ่ม เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความแข็งแรงตามที่ต้องการ

5.3.1 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมทองคำ (Phase Equilibrium Diagram)

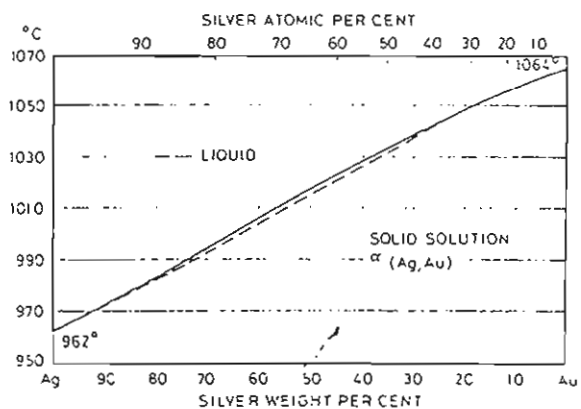
Binary Phase Diagram

รูปที่ 5.1 ถึง 5.3 แสดง Binary Phase Diagram ของ Au-Ag, Cu-Ag และ Au-Cu ตามลำดับ ⁽¹⁰⁾ จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่า Au และ Ag ละลายกันได้อย่างสมบูรณ์ในสถานะของเหลวและของแข็งในทุกส่วนผสม ส่วน Cu และ Ag (รูปที่ 5.2) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก จะเกิดการแยกเฟสเป็นเฟสที่มีเงินสูง (Ag-rich) และเฟสที่มีทองแดงสูง (Cu-rich) ในช่วงส่วนผสมที่อยู่ในช่วง immiscibility ส่วนระบบของ Au-Cu (รูปที่ 5.3) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น solidus จะได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็ง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (disordered structure) ในทุกส่วนผสม แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงมาเรื่อยๆ จนถึง 410 °C โลหะผสมที่มีปริมาณ Cu ประมาณ 24.4 % จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Ordered structure) ชนิด AuCu II และเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 358 °C จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ในทำนองเดียวกัน โลหะที่มีปริมาณทองแดง 49.2 % ที่อุณหภูมิเหนือ 390 °C จะได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็ง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 390 °C จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ชนิด AuCu₃

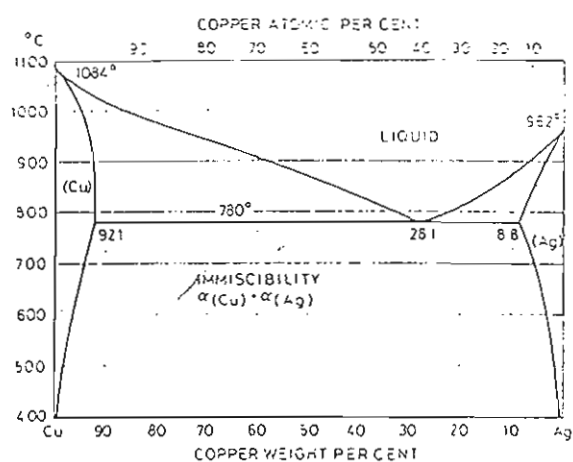
Ternary Phase Equilibrium Diagram

รูปที่ 5.4 แสดง ternary diagram ของระบบ Au-Cu-Ag ในรูป 3 มิติ ⁽¹¹⁾ เส้นประในรูปเป็นเส้นที่แบ่งระหว่างพื้นที่ของสารละลายของแข็ง α (Au-Cu-Ag) กับพื้นที่ที่เป็น immiscibility คือเกิดการแยกเฟสเป็น 2 เฟสเป็น α_1 (Au-Ag) และ α_2 (Au-Cu) จากรูปจะเห็นว่าพื้นที่ที่ประกอบด้วย 2 เฟส จะมีพื้นที่กว้างขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

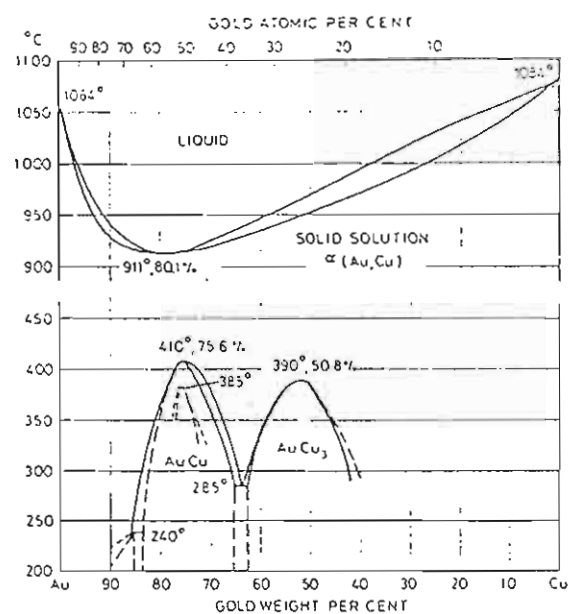
รูปที่ 5.5 ⁽¹⁰⁾ แสดงเส้น liquidus ของระบบ Au-Cu-Ag ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิ liquidus ต่ำสุดคือ บริเวณที่มีปริมาณ Cu ประมาณ 28 % ตั้งแต่จุดที่มี Ag ประมาณ 72 % และ Au 0 % จนถึงจุดที่มี Ag ประมาณ 35 % และ Au ประมาณ 35 %



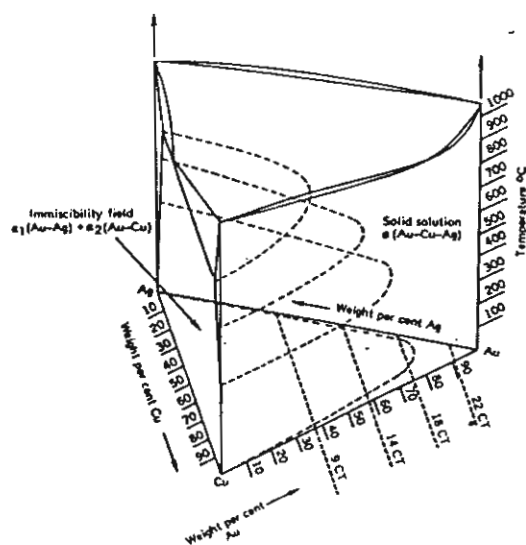
รูปที่ 5.1 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Au-Ag



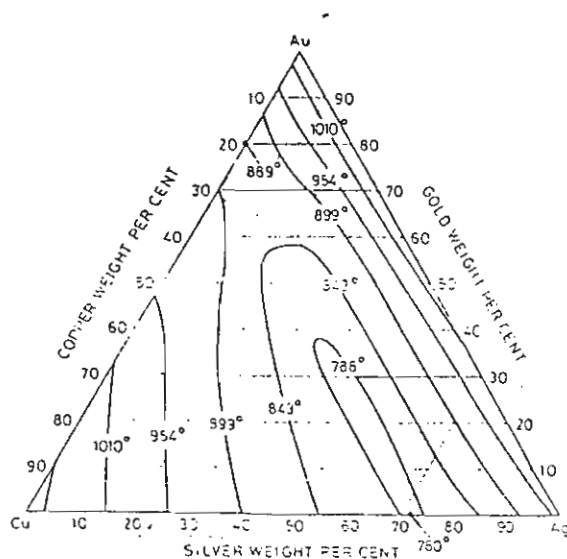
รูปที่ 5.2 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Cu-Ag



รูปที่ 5.3 แสดง Binary Phase Diagram ของระบบ Au-Cu



รูปที่ 5.4 แสดง Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป 3 มิติ



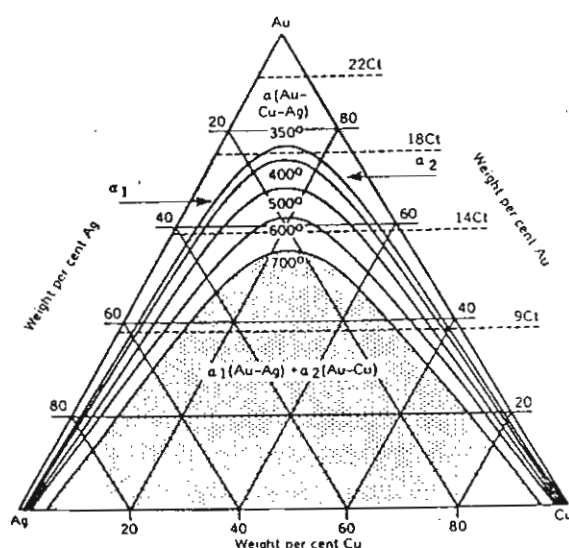
รูปที่ 5.5 Ternary Diagram แสดงเส้น Liquidus ของระบบ Au-Cu-Ag

ดังได้แสดงในรูปที่ 5.4 แล้วว่า พื้นที่ที่ประกอบด้วย 2 เฟส จะขยายพื้นที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลง รูปที่ 5.6⁽¹⁰⁾ แสดงเส้นแบ่งระหว่างพื้นที่ที่ประกอบด้วย 2 เฟสดังกล่าว กับพื้นที่ที่เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว ที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 5.6 จะเห็นเช่นเดียวกันว่า บริเวณที่ประกอบด้วย 2 เฟส จะขยายกว้างมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง อย่างไรก็ตาม ternary diagram ในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6 แสดงเฉพาะบริเวณที่โลหะผสมละลายเข้ากันเป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว กับบริเวณที่โลหะผสมแยกตัวเป็น 2 เฟส เท่านั้น

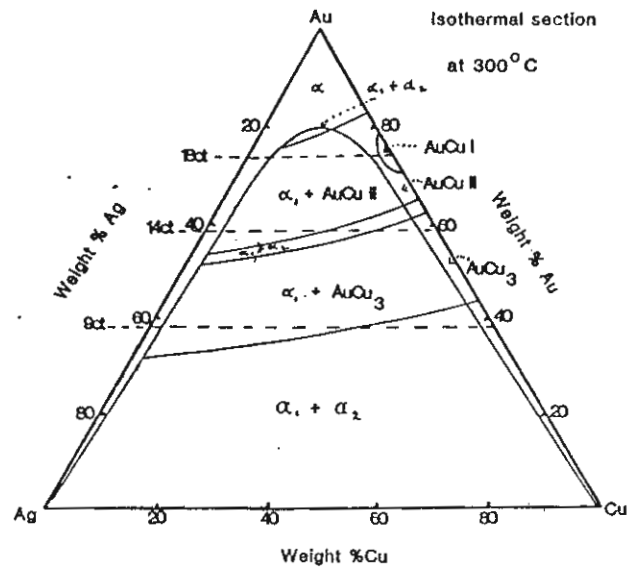
แต่ไม่ได้แสดงถึงบริเวณที่มีเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ Mark Grimwade ⁽¹¹⁾ ได้นำข้อมูลจากงานศึกษาของ Yasuda ⁽²⁾ และงานศึกษาของ Susz และคณะมาแสดงในรูป ternary diagram ที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.7

รูปที่ 5.8 แสดงภาพตัด phase diagram ของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18 กระรัต (75 %Au) 14 กระรัต (58.3% Au) และ 10 กระรัต (41.7% Au) จากรูปแสดงให้เห็นว่าในระบบ Au-Cu-Ag 14 กระรัต และ 10 กระรัต จะปรากฏ immiscibility gab ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแยกเฟสเป็น 2 เฟสคือ α (Cu-Au) และ α (Ag- Au) โดยที่อุณหภูมิเหนือ miscibility gab จะเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยสารละลายของแข็งเฟสเดียว นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า โลหะผสม 10 กระรัต มีบริเวณที่ประกอบด้วยสารละลายเฟสเดียวในช่วงแคบกว่าโลหะผสม 14 กระรัต เนื่องจากอุณหภูมิของ miscibility gab ของโลหะผสม 10 กระรัต มีค่าสูงกว่าส่วนในโลหะผสม 18 กระรัต นอกจากจะประกอบด้วย immiscibility gab แล้วยังประกอบด้วยบริเวณที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบชนิด AuCu อีกด้วย ความแตกต่างดังกล่าวนี้เองจึงทำให้โลหะผสม 18 กระรัต มีพฤติกรรมความแข็งแรงต่างออกไปจากโลหะผสม 10 กระรัต และ 14 กระรัต

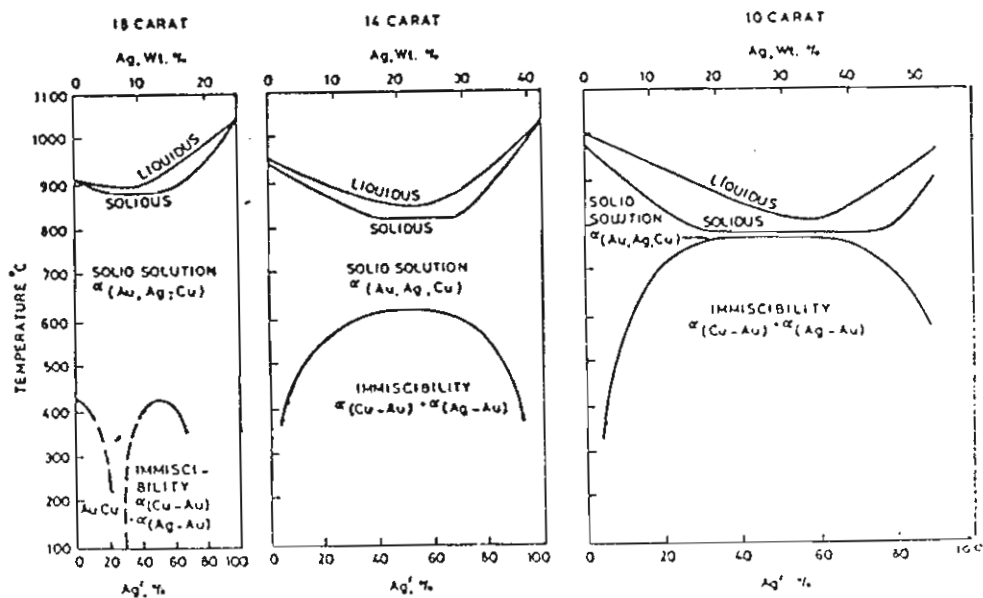
โลหะผสม 10 กระรัต และ 14 กระรัต จะต้องมีปริมาณเงิน 12-47 % และ 10-32 % ตามลำดับ เพื่อให้โลหะผสมดังกล่าวสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้จากการตกตะกอน (Precipitation hardening) ที่อุณหภูมิในช่วง immiscibility gab ดังแสดงใน phase diagram แต่สำหรับทอง 18 กระรัต โดยเฉพาะที่ปริมาณเงินต่ำๆ โลหะผสมสามารถแข็งขึ้นได้ด้วยการเปลี่ยนเฟสจากสารละลายของแข็ง ที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ด้วยการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต



รูปที่ 5.6 Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป Isothermal section แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็นสารละลายเฟสเดียว กับบริเวณที่มีสองเฟส ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 5.7 Ternary Diagram ระบบ Au-Cu-Ag ในรูป Isothermal section ที่อุณหภูมิ 300 °C แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็นสารละลายเฟสเดียว , บริเวณที่มีสองเฟส และบริเวณที่เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ



รูปที่ 5.8 แสดง Phase Diagram ของระบบ Au-Cu-Ag ที่ ส่วนผสม 18 , 10 และ 14 กะรัต

5.3.2 โครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Ordered structure)

โครงสร้างผลึกของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Ordered structure)

โครงสร้างที่เป็นระเบียบ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ในตำแหน่งที่ไม่แน่นอนในโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวใหม่ ในตำแหน่งที่แน่นอน รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดง unit cell ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ และโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ชนิดต่างๆ ที่พบในระบบ Au-Cu การจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (รูปที่ 5.9 a) จะเป็นแบบ fcc. โดยแต่ละตำแหน่งจะมีโอกาสเป็นอะตอมของ Au หรือ Cu ตามสัดส่วนของจำนวนอะตอมของธาตุนั้นๆ ส่วนในกรณีของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu_3 (รูปที่ 5.9 b) ตำแหน่งมุมของ unit cell จะเป็นอะตอมของ Cu โครงสร้างผลึกของ AuCu_3 จะเป็นแบบ fcc. เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ

โครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu เกิดได้ 2 แบบ คือ AuCu I และ AuCu II โครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu I (รูปที่ 5.10 a) สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการทำให้เย็นตัวจากอุณหภูมิสูงอย่างช้าๆ หรือโดยการอบความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ต่ำกว่า 385°C (สำหรับส่วนผสมที่ประกอบด้วยอะตอมของ Au และ Cu เท่ากัน (equiatomic)) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ fct. ซึ่งมีอัตราส่วน c/a ประมาณ 0.93 โดยมีอะตอมของ Cu เรียงตัวอยู่ในระนาบ (200) ส่วน AuCu II (รูปที่ 5.10b) สามารถเกิดได้โดยการอบความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ในช่วง $385-410^\circ\text{C}$ (สำหรับส่วนผสมที่ประกอบด้วยอะตอมของ Au และ Cu เท่ากัน (equiatomic)) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ orthorhombic โดยมี $b=10.02a$ และมีอัตราส่วน c/a ประมาณ 0.92

Thermodynamics ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ⁽¹²⁻¹³⁾

ถ้าพิจารณาสารละลายชนิด binary ที่ประกอบด้วยอะตอม A และอะตอม B จะประกอบด้วยพันธะ (bond) 3 ชนิด ได้แก่

- 1) พันธะระหว่างอะตอม A-A ซึ่งมีพลังงานเป็น ϵ_{AA}
- 2) พันธะระหว่างอะตอม B-B ซึ่งมีพลังงานเป็น ϵ_{BB}
- 3) พันธะระหว่างอะตอม A-B ซึ่งมีพลังงานเป็น ϵ_{AB}

พลังงานภายใน (Internal Energy) ของสารละลาย (E) ขึ้นกับจำนวนพันธะ P_{AA} , P_{BB} และ P_{AB} ตามสมการ

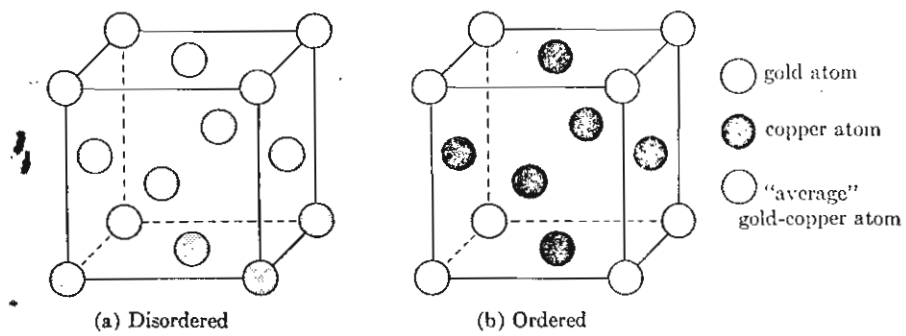
$$E = P_{AA} \epsilon_{AA} + P_{BB} \epsilon_{BB} + P_{AB} \epsilon_{AB} \quad \text{_____ (1)}$$

ก่อนที่อะตอมจะเกิดการรวมกัน จะประกอบด้วยพันธะระหว่าง A-A และพันธะระหว่าง B-B เมื่อเกิดการรวมกันจะเกิดพลังงานพันธะระหว่าง A – B ขึ้น พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลงไปคำนวณได้จาก

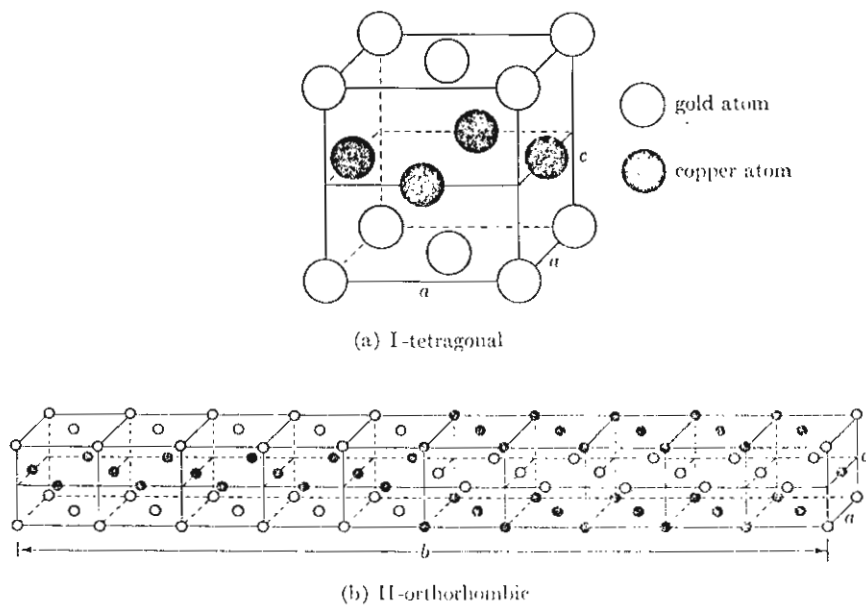
$$\Delta H_{\text{mix}} = P_{AB} \epsilon \quad \text{_____} (2)$$

โดย ϵ คือผลต่างระหว่างพลังงานของพันธะ A-B กับค่าเฉลี่ยของพลังงานของพันธะ A-A และ B-B

$$\epsilon = \epsilon_{AB} - \frac{1}{2}(\epsilon_{AA} + \epsilon_{BB}) \quad \text{_____} (3)$$



รูปที่ 5.9 แสดง Unit cell ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ และโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu_3



รูปที่ 5.10 แสดง Unit cell ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu ชนิดต่าง ๆ

สำหรับสารละลายในอุดมคติ (Ideal Solution) ค่าพลังงานพันธะ $\epsilon_{AA} = \epsilon_{BB} = \epsilon_{AB}$ คือ $\epsilon = 0$, $\Delta H_{\text{mix}} = 0$ สารละลายที่ได้จะรวมตัวกันแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (complete random) จำนวนพันธะระหว่างอะตอม A-B ต่อโมลจะเท่ากับ

$$P_{AB} = N_a z X_A X_B \quad (4)$$

สำหรับสารละลายจริงที่เบี่ยงเบนไปจากสมการในอุดมคติไม่มากนัก สมการที่ (4) ยังคงใช้ได้ เพราะฉะนั้น

$$\Delta H_{\text{mix}} = P_{AB} \epsilon = N_a z X_A X_B \epsilon \quad (5)$$

$$\Delta H_{\text{mix}} = \Omega X_A X_B \quad (6)$$

โดย $\Omega = N_a z \epsilon$

$N_a = \text{Avogadro's Number}$

$Z = \text{จำนวนอะตอมต่อพันธะ}$

เราเรียกสารละลายจริงที่ยังใช้กับสมการ (5) และ (6) ได้ว่า Regular Solution

สารละลายระหว่าง Au-Cu ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และสารละลายระหว่าง Cu-Ag ที่เกิด immiscibility gap เป็นตัวอย่างของสารละลายที่เบี่ยงเบนจากสารละลายอุดมคติ ซึ่งเรียกสารละลายเหล่านี้ว่า สารละลายจริง (Real Solution)

ในสารละลายจริงนั้น ค่า ϵ และ Ω จะไม่เท่ากับศูนย์ การเรียงตัวของอะตอมจะเรียงตัวในตำแหน่งที่จะทำให้ค่า free energy ต่ำสุด ซึ่งค่า free energy กำหนดด้วยสมการ

$$G = H - TS \quad (7)$$

ในกรณีที่ค่า $\epsilon < 0$ ระบบจะพยายามลดพลังงานภายใน ดังสมการที่ (1) และ (2) ด้วยการเพิ่มพันธะระหว่างอะตอม A-B นั่นคือ อะตอมชอบที่จะจับพันธะกับอะตอมต่างชนิดกัน สารละลายที่ได้จะเป็นสารละลายที่เป็นระเบียบ (ordered) ดังแสดงในรูปที่ 5.11(a) ในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ $\epsilon > 0$ ระบบจะพยายามลดพลังงานภายในด้วยการเพิ่มจำนวนพันธะระหว่างอะตอม A-A และ B-B นั่นคืออะตอมพยายามที่จะจับพันธะกับอะตอมชนิดเดียวกันเอง ทำให้อะตอมมีแนวโน้มที่จะแยกตัวมาเกาะกลุ่มกัน (clustering) ดังรูปที่ 5.11(b) สารละลายที่มีพฤติกรรมแบบนี้จะเกิด immiscibility ที่อุณหภูมิต่ำ

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความเป็นระเบียบ (ordering) หรือระดับการเกาะกลุ่ม (clustering) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า entropy (S) หรือ randomness ของระบบลดลง การลดลงของพลังงานภายใน H ด้วยการ ordering หรือ clustering จึงต้องสัมพันธ์กับค่า S ที่จะทำให้ค่า free energy ; G ในสมการที่ (7) มีค่าต่ำที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ระดับความเป็นระเบียบ (ordering) หรือระดับการเกาะกลุ่ม (clustering) จะลดลงเนื่องจากความสำคัญของค่า entropy (ดูได้จากพจน์ TS) ต่อค่า free energy มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นดังในสมการที่ (7)