

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 โลหะทองคำผสม หรือทองคำกะรัต

##### 2.1.1 ทองคำบริสุทธิ์

ธาตุทองคำมีสูตรทางเคมี คือ Au มีโครงสร้างแบบ F.C.C. (Face Centred Cubic) สมบัติเฉพาะต่างๆ ทางฟิสิกส์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของทองคำ เงิน และ ทองแดง

	ทองคำ (Au)	เงิน (Ag)	ทองแดง (Cu)
เลขอะตอม	79	47	29
น้ำหนักอะตอม	196.9665	107.8682	63.546
โครงสร้างผลึก	F.C.C.	F.C.C.	F.C.C.
สี	เหลือง	ขาว	แดง
ความถ่วงจำเพาะ	19.32	10.5	8.96
ความหนาแน่นที่ 20°C	19320 kg/m <sup>3</sup>	10500 kg/m <sup>3</sup>	8960 kg/m <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1064.4°C	960°C	1083°C
จุดเดือด	2920°C	2195°C	2600°C

##### 2.1.2 ทองคำกะรัต

ทองคำกะรัตมีความนิ่มสูงกว่าทองคำบริสุทธิ์ เนื่องจากความแข็งแรงทนทานสูงกว่า นอกจากนี้ยังสามารถเลียนแบบสีของทองคำบริสุทธิ์ได้ด้วยปริมาณส่วนผสม จึงทำให้ทองคำกะรัตเข้ามามีบทบาทแทนที่ทองคำบริสุทธิ์ในเครื่องประดับ และการกำหนดปริมาณส่วนผสมในทองคำกะรัตยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอนตายตัว โรงงานผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดส่วนผสมที่เป็นเอกลักษณ์ของตัวเองเป็นส่วนมาก ดังเช่นตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของทองคำกะรัตในโรงงานแห่งหนึ่งของประเทศอเมริกา ดังนี้

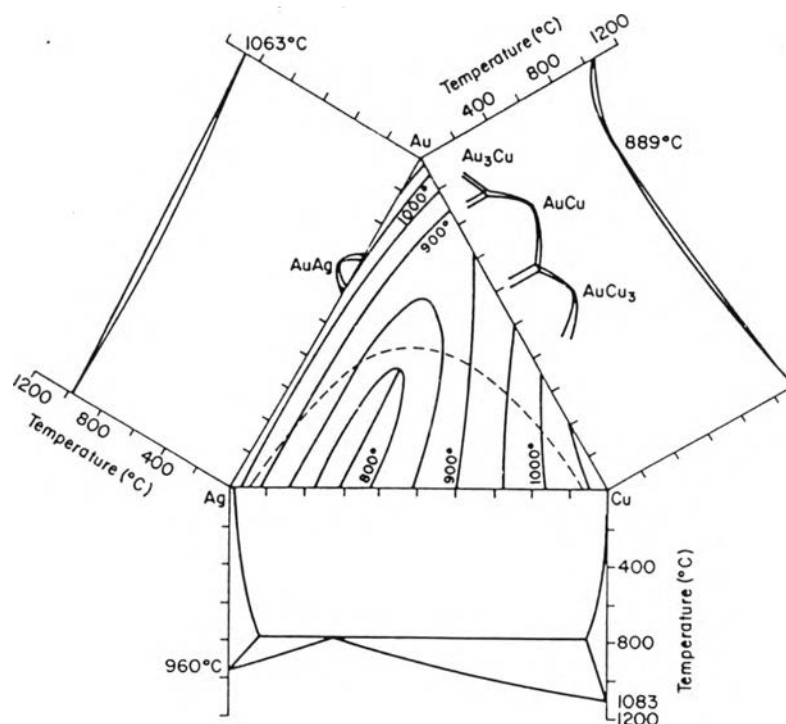
ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของทองคำระดับของโรงงานแห่งหนึ่ง  
 ในประเทศอเมริกา<sup>(4)</sup>

เกรด	สี	Au (wt.%)	Ag (wt.%)	Cu (wt.%)	Zn (wt.%)	Ni (wt.%)
18	Yellow	75.00	15.00	10.00		
18		75.00	13.00	12.00		
18	White	75.00		2.23	5.47	17.80
18	Green	75.00	22.50	2.50		
18	White	75.00	5.00	20.00		
13.5		56.25	5.30	31.50	6.95	+
14		58.33	5.00	30.80	6.93	+
13.5	Yellow	56.25	8.75	30.65	4.35	
14		58.33	8.31	29.19	4.17	
13.5		56.25	4.20	32.80	6.15	
14		58.33	4.00	31.24	6.43	
13.5		56.25	9.62	28.45	5.63	
14		58.33	16.50	24.97	0.20	
13.5		56.25	22.26	21.18	0.31	
14		58.33	21.20	20.17	0.30	
14			24.78	16.75	0.14	
13.5		56.25	10.50	31.15	2.10	
14		58.33	10.00	29.67	2.00	1.05
13.5		56.25	7.83	27.92	6.95	1.00
14		58.33	7.46	26.58	6.63	11.36
13.5	White	56.25		23.13	9.21	10.80
14		58.33		22.10	8.77	9.00
13.5		56.25		29.00	5.75	8.55
14		58.33		28.32	4.80	5.87
13.5		56.25	3.18	26.62	8.08	12.82
13.5		56.25		24.63	6.30	12.21
14		58.33		23.47	5.99	
13.5	Green	56.25	36.70	6.80	0.25	
14		58.33	32.50	8.97	0.20	
14		58.33	35.00	6.47	0.20	
13.5	Red	56.25	2.20	41.53		
14		58.33	2.08	39.59		
9.5	Yellow	39.60	12.08	42.28	6.04	+
10		41.70	11.66	40.81	5.83	+
9.5		39.60	5.80	45.30	9.30	
10		41.70	5.50	43.80	9.00	
9.5		39.60	6.82	49.65	3.93	
10		41.70	6.60	48.00	3.70	
9.5	White	39.60	4.40	36.75	11.15	8.10
9.5		39.60		34.00	8.70	17.70
10		41.70		32.83	8.40	17.08
10		41.70		29.15	12.12	15.05++
9.5	Green	39.60	50.65	9.40	0.35	
10		41.70	48.90	9.05	0.35	
9.5	Red	39.60	3.03	57.37		
10		41.70	2.82	35.48		

หมายเหตุ : + 0.02% Boron/Cu and 0.03% Silicon/Cu เป็นตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer)  
 ในการหล่อ  
 ++ 1.97% Co เป็นตัวปรับขนาดเกรนให้เล็กลงในการหล่อ

### 2.1.2.1 ทองคำกะรัตในระบบทองคำ เงิน และทองแดง

จากการศึกษาอิทธิพลธาตุผสมหลัก เงิน และทองแดงด้านโลหะวิทยา ในช่วงปี ค.ศ. 1954-1958 ทำให้ทราบถึงขอบเขตการละลายของแต่ละธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน สามารถแสดงแผนภูมิสมมูลเฟสในระบบ 3 ธาตุ ได้ดังภาพที่ 2.1 และ 2.2



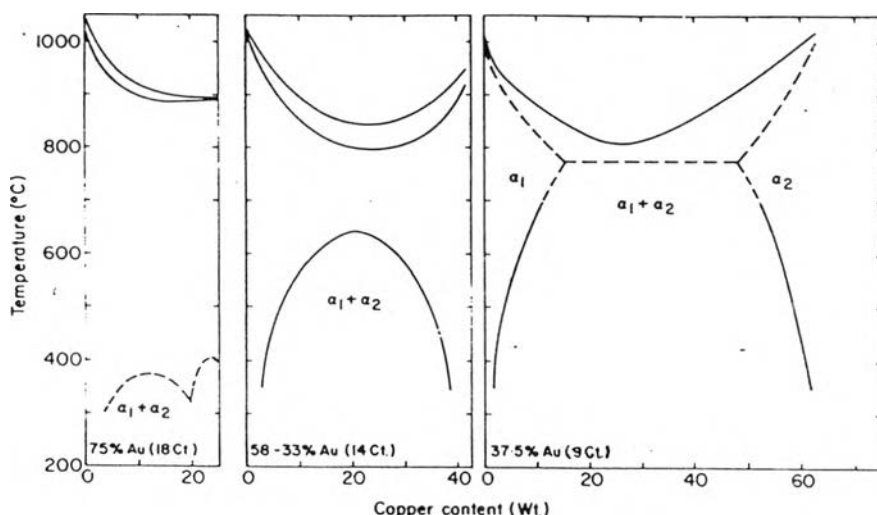
ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสทองคำกะรัตในระบบ 3 ธาตุของ ทองคำ เงิน และทองแดง<sup>(10)</sup>

จากภาพที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสโลหะผสมในระบบ 2 ธาตุระหว่างทองคำ และเงิน แสดงบริเวณของแข็งเฟสเดียวที่เกิดขึ้นได้เส้นอุณหภูมิแข็งตัวสมบูรณ์ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 200°C ในช่วงส่วนผสมที่มีธาตุเงินระหว่าง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดการแยกตัวเป็นเฟสที่ 2 คือ AuAg เนื่องจากขอบเขตของการละลายที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิลดลง



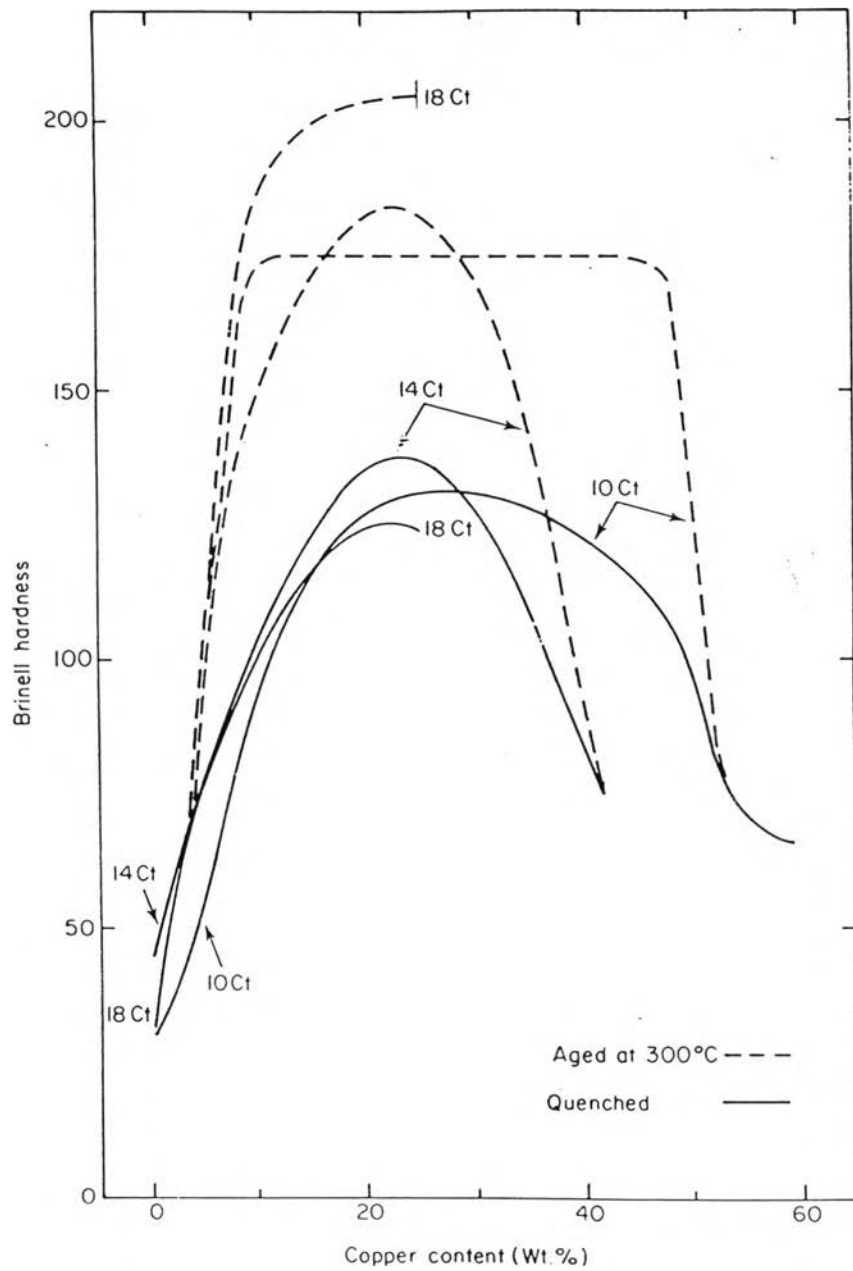
## 2.1.2.1.1 ทองคำ 22 ,20 และ 18 กระรัต

ทองคำ 22 และ 20 กระรัต เมื่อเปรียบเทียบด้านความแข็งแล้วโดยทั่วไปจะค่อนกว่าทองคำ 18 กระรัต แต่ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนผสม การเกิดเฟสที่ 2 ในสภาพของแข็งเป็น  $\alpha_1$  ที่มีส่วนผสมเงินมาก และ  $\alpha_2$  ที่มีส่วนผสมของทองแดงมาก ดังภาพที่ 2.3 ภาพซ้ายมือแสดงถึงการเกิดเฟสที่ 2 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $400^{\circ}\text{C}$  ในทองคำ 18 กระรัต ทำให้มีบริเวณที่เป็นสารละลายของแข็งที่กว้าง ภาพกลางแสดงถึงการเกิดเฟสที่ 2 ที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  ทำให้บริเวณที่เกิดสารละลายของแข็งแคบลงในทองคำ 14 กระรัต และภาพขวามือแสดงถึงการไม่เกิดสารละลายของแข็งของทองคำ 9 กระรัต



ภาพที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางแผนภูมิสมมูลเฟสในระบบ 3 ชาติของทองคำกระรัตต่างๆ<sup>(4)</sup>

การศึกษาของ Wise<sup>(5)</sup> และ Sterner-Rainer<sup>(6)</sup> แสดงค่าความแข็งของทองคำกระรัตต่างๆ หลังผ่านการอบเพิ่มความแข็ง ดังภาพที่ 2.4 และตารางแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปต่อปริมาณส่วนผสมธาตุทองแดง ดังตารางที่ 2.3 ตามลำดับ จากกราฟและตารางดังกล่าวแสดงถึงความแข็งของทองคำกระรัตที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของทองแดงในเนื้อทองคำกระรัตเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าทองแดงมีส่วนสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ทองคำกระรัต แต่ถ้าปริมาณของทองแดงในเนื้อทองคำกระรัตมากเกินไป ค่าความแข็งจะลดลงเนื่องจากไม่เกิดการแยกเฟสของเนื้อโลหะซึ่งเป็นตัวการทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.4 แสดงกราฟค่าความแข็งของทองคำกระจัดชนิดต่างๆ เมื่ออบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 300°C (4)

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งต่อปริมาณส่วนผสมทองแดงในทองคำ 18 กระรัต<sup>(4)</sup>

สีของทองคำกระรัต	ปริมาณทองแดง (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความแข็ง HB ที่ 15 R.A.%	ค่าความแข็ง HB ที่ 30 R.A.%	ค่าความแข็ง HB ที่ 60 R.A.%
Deep Red	25.0	143	178	202
Orange red	21.4	156	177	205
Reddish Yellow	16.7	166	176	197
Bright Yellow	12.5	148	160	182
Greenish Yellow	8.3	141	149	176
Yellowish Green	3.6	114	127	138
Pale Yellow Green	0.0	69	78	93

หมายเหตุ : R.A.% (ปริมาณการลดพื้นที่หน้าตัด)

#### 2.1.2.1.2 ทองคำ 16 และ 14 กระรัต

ทองคำ 14 กระรัตเป็นที่นิยมในตลาดสูงกว่า ทองคำ 16 กระรัต

เนื่องจากค่าความแข็งที่สูงขึ้นจากการอบเพิ่มความแข็ง ทองคำในกลุ่มนี้นิยมผสมสังกะสีเพื่อเปลี่ยนแปลงสี และสมบัติในการทำงาน (Working Property) เนื่องจากสังกะสีช่วยลดการแตกหักในขณะรีด หรือขึ้นรูป และยังช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนให้สูงกว่าทองคำกระรัตที่ไม่ผสมสังกะสี และจากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณทองแดงต่อความแข็งที่เปลี่ยนไปในทองคำ 14 กระรัต ดังตารางที่ 2.4 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งอย่างรวดเร็วของทองคำที่มีปริมาณทองแดงผสมอยู่มาก ในปริมาณการลดพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากันของทองคำ 14 กระรัต

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งต่อปริมาณส่วนผสมทองแดงในทองคำ 14 กระรัต<sup>(4)</sup>

สีของทองคำกระรัต	ปริมาณทองแดง (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความแข็ง HB ที่ 15 R.A.%	ค่าความแข็ง HB ที่ 30 R.A.%	ค่าความแข็ง HB ที่ 60 R.A.%
Deep Red	41.5	132	152	185
Orange red	35.6	142	167	204
Reddish Yellow	31.1	162	183	207
Orange Yellow	27.7	147	159	173
Dark Yellow	24.9	154	166	181
Yellow	20.7	156	171	186
Light Yellow	16.6	176	189	215
Greenish Light Yellow	13.8	169	182	206
Light Green	5.9	139	157	182
Pale Green	0.0	105	118	139

หมายเหตุ : R.A.% (ปริมาณการลดพื้นที่หน้าตัด)

การศึกษาของ W.S Rapson <sup>(4)</sup> ทำการทดสอบความแข็งของทองคำ 14 กระรัต ที่มีค่าส่วนผสมเป็น Au-16.15wt.%Ag-24.97wt.%Cu-0.20wt.%Zn ที่มีความสัมพันธ์กันปริมาณการขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความแข็งของทองคำ 14 กระรัต ต่อปริมาณการขึ้นรูป <sup>(4)</sup>

ปริมาณการขึ้นรูป	15%	30%	60%
ค่าความแข็ง (HB)	154	166	181

### 2.1.2.1.3 ทองคำ 10 9 และ 8 กระรัต

ทองคำที่มีกระรัตต่ำจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำ และความแข็งที่สูงมาก และยังเป็นโลหะที่เกิดแตกร้าวในสภาวะการกัดกร่อนผสมความเค้น (Stress-Corrosion Cracking) ได้ง่ายอีกด้วย ทองคำในกลุ่มนี้ต้องการสังกะสีช่วยป้องกันการแยกเฟสเมื่อต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน แต่การเติมสังกะสีจะทำให้ยากในการเชื่อมประสานเนื่องจากความแตกต่างของจุดหลอมเหลวของโลหะผสมกับโลหะพื้น โดยทองคำกระรัตในกลุ่มนี้นิยมใช้ทำสปริง หรือคลิบ

### 2.1.3 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ

ทองคำบริสุทธิ์ (Pure Gold) ในทางการค้าหมายถึง ทองคำที่มีค่าความบริสุทธิ์ใกล้เคียง 100% โดยมาตรฐานสากลจะยอมรับโลหะทองคำว่าเป็นทองคำบริสุทธิ์เมื่อมีเนื้อทองคำในโลหะมากกว่า 99.5% ขึ้นไป และเมื่อโลหะทองคำมีเนื้อทองคำมากกว่า 99.99% จะเรียกทองคำชนิดนี้ว่า ทองคำที่พิสูจน์ (Proof Gold)

ค่าความบริสุทธิ์ (Fineness) หมายถึง ปริมาณทองคำที่มีอยู่ในเนื้อโลหะ โดย เทียบต่อ 1000 ส่วน

ค่า กระรัต (Carat) หมายถึง หน่วยวัดที่ใช้บอกปริมาณของทองคำในเนื้อโลหะ โดย แทนค่าโลหะที่มีทองคำผสมอยู่ 100 % มีค่าเท่ากับ 24 กระรัต

Hall-Marking หมายถึง หน่วยวัดที่ใช้แสดงปริมาณทองคำ โดยแสดงเป็นตัวเลขทศนิยม โดยกำหนดให้ทองคำบริสุทธิ์ 100% มีค่าเท่ากับ 1.000 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Fineness 1000



บาท หมายถึง หน่วยวัดน้ำหนักของทองคำในประเทศไทย โดยทองคำหนัก  
1 บาท มีค่าเท่ากับ 15.244 กรัม

ค่าความบริสุทธิ์ของทองคำสามารถแบ่งได้ตามหน่วย กระรัต โดยส่วนใหญ่แบ่ง  
เป็น 7 ชนิดหลัก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยวัดความบริสุทธิ์ทองคำ

ปริมาณทองคำในเนื้อ โลหะ	ปริมาณเนื้อทองคำ (% โดยน้ำหนัก)	ความบริสุทธิ์	กระรัต
990/1000	99.9	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	257	9
333/1000	33.3	333	8

## 2.2 อิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้เติมลงในทองคำ

การเติมโลหะชนิดอื่นลงในทองคำได้มีมานานแล้วก็เพื่อเปลี่ยนสมบัติเฉพาะต่างๆ เพื่อให้  
เหมาะสมกับการนำใช้งาน คือ ทองคำบริสุทธิ์มีค่าความแข็งต่ำทำให้มีความสามารถคงรูปน้อย เมื่อนำ  
มาขึ้นรูปแล้วทำให้เกิดความเสียหายได้โดยง่าย และอีกเหตุผลหนึ่งที่สำคัญก็คือ ต้องการ เปลี่ยน  
แปลงสีของทองคำให้เปลี่ยนไป เช่น ผสมเงิน (Ag) เพื่อให้สีของทองคำมีสีเหลืองอ่อนลง หรือเติม  
ทองแดง (Cu) ให้ทองคำมีสีแดงมากขึ้น และยังมีโลหะอีกหลายชนิดที่ใช้ ได้แก่ สังกะสี (Zn) ,  
เหล็ก (Fe) ,แพลตินัม (Pt) ได้มีการแบ่งแยกโลหะที่ผสมเป็น 2 ชนิด คือ ธาตุผสมหลัก (Major  
Alloying Element) และ ธาตุผสมรอง (Minor Alloying element) โดยแบ่งแยกตามสัดส่วนของ  
ปริมาณการใช้ โดยปกติ ธาตุผสมรองจะมีปริมาณในการใช้ประมาณไม่เกินกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดย  
น้ำหนัก

ตารางที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของธาตุผสมต่างๆ ที่ใช้เติมในโลหะทองคำ<sup>(4)</sup>

ธาตุผสม	ผลดี	ผลเสีย
เงิน Ag	เพิ่มความแข็ง มีอิทธิพลน้อยกว่าทองแดง	สีอ่อนลง หรือขาวขึ้น เพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน
ทองแดง Cu	เพิ่มความแข็ง	สีจะแดงมากขึ้น
ซิลิกอน Si	ปรับปรุงการไหลของโลหะหลอมเหลว ลดการเกิดทองแดงออกไซด์ที่ผิวชิ้นงาน	โลหะที่ได้จะเปราะเมื่อเติมมากเกินไป
เหล็ก Fe	ใช้ร่วมกับธาตุแมงกานีส Mn ทำให้ได้ทองคำสีขาว ใกล้เคียงกับการใช้ธาตุนิกเกิล Ni	0.3-0.5 wt.% ทำให้เกรนโค และหยาบ 25.0 wt.% ทำให้ทองคำมีสีเทา
โครเมียม Cr		0.3-0.5 wt.% ทำให้เกรนโค และหยาบ
สังกะสี Zn	น้อยกว่า 0.2 wt.% ลดการเกิดออกไซด์ชั้นของ ทองแดง 1-2 wt.% ปรับปรุงผิวให้เงางาม เติมปริมาณเท่ากับ เงิน และทองแดงช่วยลดการแตก หักขณะรีด	
ตะกั่ว Pb	เพิ่มความแข็ง	เกินกว่า 0.01 wt.% เกิดการแตกหักแบบเปราะ
โบรอน B	ให้ผลเหมือนซิลิกอน ที่ปริมาณใช้ที่เท่ากัน	
นิกเกิล Ni	เพิ่มความแข็ง สีของทองคำจะอ่อนลง ใช้ผสมทำทองคำสีขาว	สีจะอ่อนลงอย่างรวดเร็ว มีผลต่อผิวหนังทำให้เกิดอาการแพ้
ฟอสฟอรัส P	ลดการเกิดออกไซด์ชั้นที่ตีที่สุด	เกิด hot shortness เมื่อเติมมากเกินไป
โคบอลต์ Co	มากกว่า 8.4 wt.% ปรับขนาดเกรนเล็กลง	
รูทีเนียม Ru	0.001-0.1 wt.% ปรับขนาดเกรนเล็กลง	
แพลตินัม Pt	เพิ่มความแข็งเมื่อทำ ageing treatment สีของทองคำจะอ่อนลง	
อิริเดียม Ir	0.001-0.1 wt.% ปรับขนาดเกรนเล็กลง ในการหล่อ หลอม และการอบอ่อน	
ไทเทเนียม Ti	น้อยกว่า 1 wt.% เพิ่มความแข็งเมื่อทำ ageing - treatment ในทองคำ fineness 990	
แคลเซียม Ca	น้อยกว่า 1 wt.% เพิ่มความแข็งในทองคำ 99.9 %	

ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ธาตุผสมหลักที่ใช้เติมลงไปในทองคำมีเพียง 2 ชนิด คือ เงิน (Ag) และทองแดง (Cu) ที่มีโครงสร้างอะตอมแบบเดียวกันกับทองคำ คือ F.C.C. โดยมีสมบัติทางฟิสิกส์ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.1

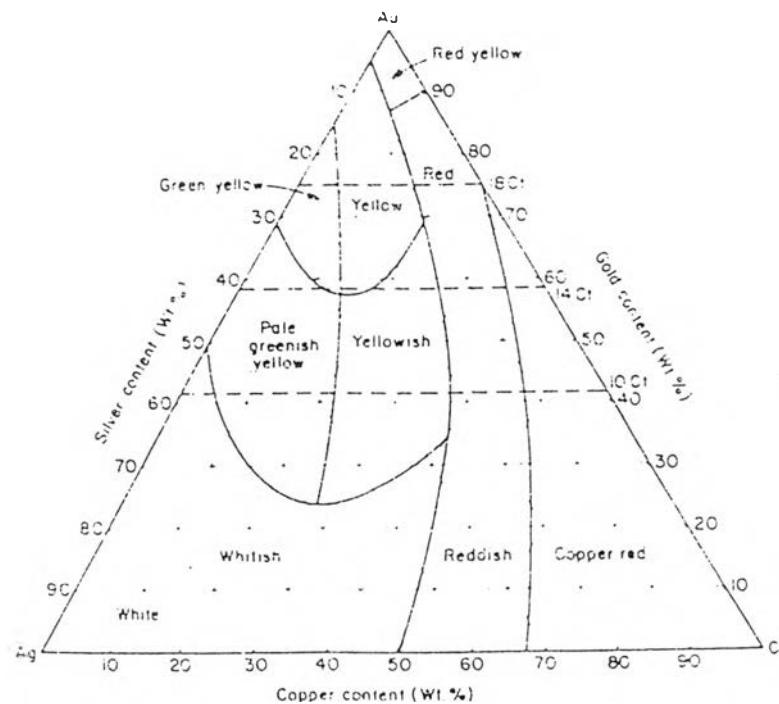
การจำแนกปริมาณของโลหะทองคำผสมจะใช้หน่วยที่เรียกว่า กะรัต โดยทองคำบริสุทธิ์ 100% จะเทียบเท่ากับทองคำ 24 กะรัต ตัวอย่าง เช่นทองคำ 18 กะรัต จะหมายถึงโลหะทองคำผสมชนิดนี้มีทองคำอยู่ 75% โดยน้ำหนัก และมีโลหะอื่นผสมอยู่อีก 25% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของทองคำกะรัตในอุตสาหกรรมของแอฟริกาใต้ <sup>(4)</sup>

กะรัต	สี	Au (wt.%)	Ag (wt.%)	Cu (wt.%)	Zn (wt.%)
22	Reddish	91.66		8.34	
22	Yellow	91.66	6.2	2.14	
22	Pale Yellow	91.66	8.34		
22	Deep Yellow	91.66	1.23	7.11	
18	Rich Yellow	75.00	9.00	16.00	
18	Yellow	75.00	20.00	5.00	
9	Reddish Yellow	37.50	12.48	46.58	3.50
9	Yellowish Red	37.50	5.50	53.50	3.50

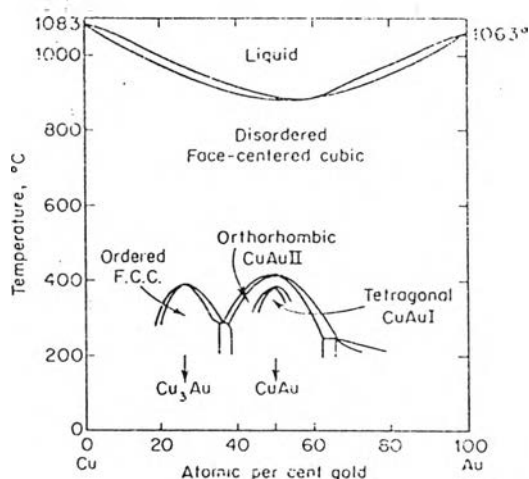
### 2.2.1 อิทธิพลของเงิน และทองแดง ในโลหะทองคำผสม

ทองคำกะรัตที่ประกอบด้วยทองคำ ,เงิน และทองแดงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม การผลิตตัวเรือนเครื่องประดับประกอบอัญมณีทั่วไป เนื่องจากธาตุผสม เงิน และ ทองแดง สามารถ ทำให้ทองคำมีสีที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ เหลืองขาว เขียว และแดง



ภาพที่ 2.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของทองคำกะรัต และสีที่เกิดขึ้น

โลหะผสมระหว่างทองคำกับทองแดง จากแผนภูมิสมมูลจะเห็นว่าเมื่อโลหะผสมทองคำที่อุณหภูมิต่ำลง ขอบเขตของการละลายของทองแดงในโลหะผสมจะลดน้อยลง ทำให้เกิดเฟสใหม่ที่แยกตัวออกมา เช่น เฟส ของ  $Au_3Cu$ ,  $AuCu$  และ  $AuCu_2$  ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ในโลหะผสมทองคำและทองแดง



ภาพที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางแผนภูมิสมมูลเฟสที่เกิดขึ้นจากโลหะผสมระหว่างทองคำและทองแดง <sup>(11)</sup>

### 2.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสในทองคำกะรัตในระบบ ทองคำ เงิน และทองแดง

ที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับทองคำผสมเงิน และทองแดง จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็ง เฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น  $AuCu$  I และ  $AuCu$  II ซึ่ง เป็นเฟสที่เรียงตัวอย่างมีระเบียบ (Ordered Phase) โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ส่วน  $AuCu_2$  และ  $AuCu$  ยังมีการศึกษากันไม่มากนัก

การศึกษาอิทธิพลของเฟสที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมทองคำ ,เงิน และทองแดงของ B.D. Razuvaeva และคณะ <sup>(7)</sup> ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเรียงตัวอย่างระเบียบ (Atomic Ordering) และการลดลงส่วนผสม (Decomposition) ในสารละลายของแข็ง (Solid Solution) เนื่องจากขอบเขตของการละลายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ต่อคุณสมบัติทางกลของทองคำ 18 กระรัต ที่มีส่วนผสมของเงิน และทองแดงแตกต่างกันระหว่าง 5.0-21.3% และ 20.0-3.7% โดยนำหนักตามลำดับ ผลสรุปที่ได้ก็คือ

- โลหะผสมทองคำ เงิน และทองแดง 18 กระรัต ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ จากการปรับส่วนผสมเมื่อโลหะผสมอยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid Solution)

- สมบัติทางกล เช่น ค่าความแข็ง จะเปลี่ยนไปเมื่ออะตอมในเนื้อโลหะผสมเกิดการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ

- ช่วงเกิดการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ (Ordering) จะลดลงเมื่อผสมเงินเพิ่มลงไป และใช้เวลาน้อยลงในการเกิด

- การเพิ่มเงินลงในส่วนผสมของโลหะผสมทองคำ ,เงิน และทองแดง จะช่วยขจัดการเกิดการแตกร้าวตามขอบเกรนเมื่อเกิดการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ

- ปรากฏการณ์การแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรน (Embrittlement) สามารถลดลงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยทำให้เกิดการเรียงตัวอย่างไม่มีระเบียบ (Disordering)

- ปรากฏการณ์การแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรนที่มีสาเหตุจากสารมลทิน เช่น ซิลิกอน และ ตะกั่ว ไม่สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน

ในรายงานผลการศึกษาโลหะวิทยาของโลหะทองคำผสมในโลหะผสมเครื่องประดับ ได้แสดงพารามิเตอร์  $Ag'$  ดังสมการที่ 2.1

$$Ag' = Ag \text{ wt. \%} / (Ag \text{ wt. \%} + Cu \text{ wt. \%}) \dots\dots\dots(2.1)$$

จากสมการข้างต้นสามารถแบ่งกลุ่มของโลหะทองคำผสมที่มีส่วนผสม ของทองคำ เงิน และทองแดง ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1. ค่า  $Ag'$  อยู่ในช่วง 0-10% และ 90-100%

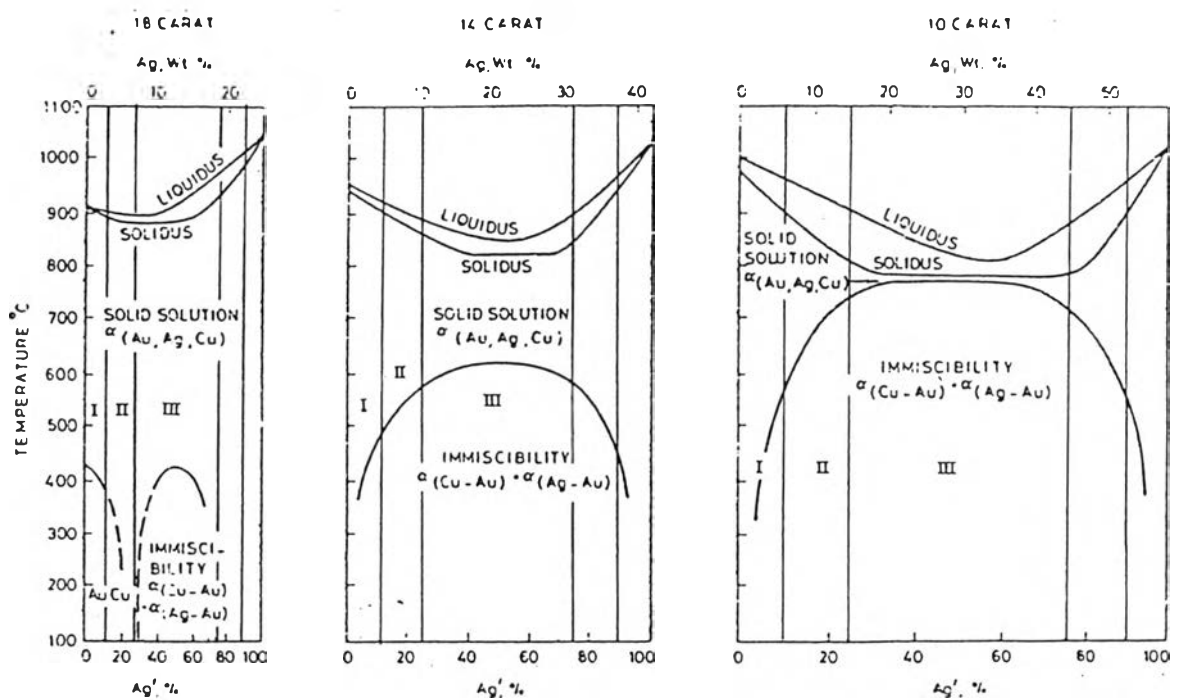
โลหะทองคำผสมที่อยู่ในกลุ่มนี้จะมีความเป็นเนื้อเคียวตลอดทุกช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้นแข็งตัว (Solidus Line) โลหะทองคำผสมกลุ่มนี้จะมีความแข็งลดลงเมื่อทำการอบอ่อนแต่ไม่สามารถอบเพิ่มความแข็งได้สมบูรณ์

กลุ่มที่ 2. ค่า Ag' อยู่ในช่วง 10-25% และ 75-90%

โลหะทองคำผสมที่อยู่ในกลุ่มนี้จะเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิสูงกว่า ช่องว่างขอบเขตของการละลาย (Immiscibility Gap) และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ ในสภาวะสมดุลจนถึงอุณหภูมิห้องเฟส  $\alpha$  (Ag-Au) จะตกผลึก (Precipitate) จากเฟสทองคำผสมส่วนที่มีทองแดงผสมอยู่มาก และเฟส  $\alpha$  (Cu-Au) ในเฟสทองคำผสมส่วนที่มีเงินผสมอยู่มาก ทองคำกลุ่มนี้จะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อทำการอบอ่อน และสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบเพิ่มความแข็งแรง

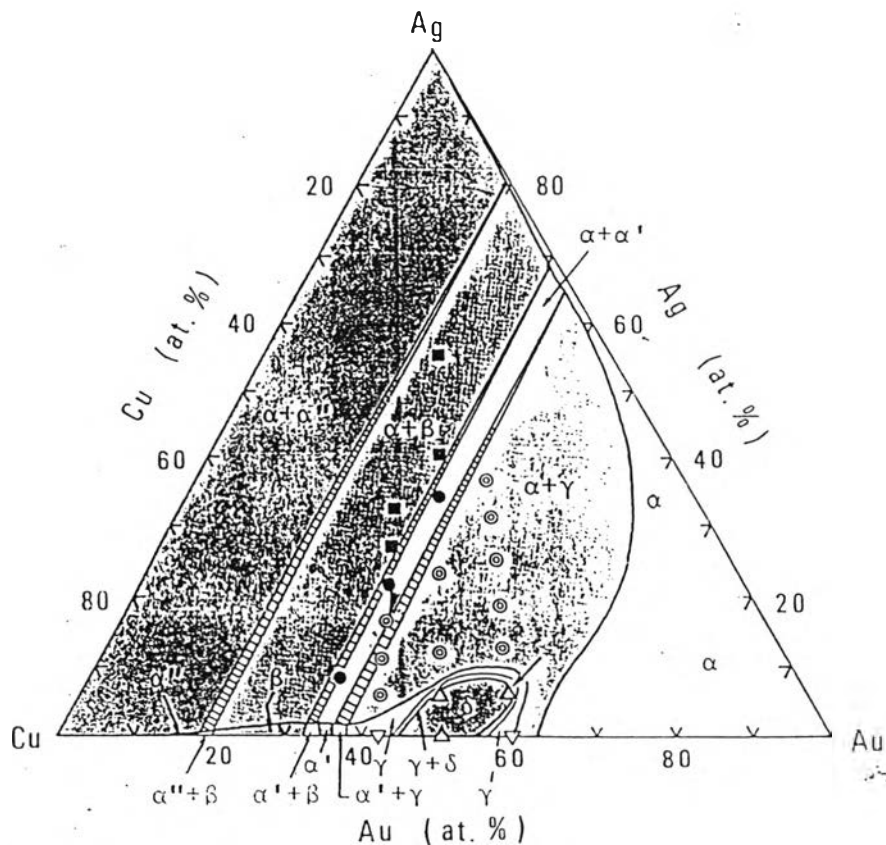
กลุ่มที่ 3. ค่า Ag' อยู่ในช่วง 25-75%

โลหะทองคำผสมที่อยู่ในกลุ่มนี้จะเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิสูงกว่า ช่องว่างขอบเขตของการละลาย และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ ในสภาวะสมดุลจนถึงอุณหภูมิห้องจะเกิดการแตกตัวแยกเป็น 2 เฟส คือ เฟส  $\alpha_1$  และเฟส  $\alpha_2$  ทองคำกลุ่มนี้จะมีความแข็งแรงมากกว่าทองคำกลุ่มที่ 2 เมื่อทำการอบอ่อน และจะมีความแข็งแรงเมื่อเย็นตัวในอากาศ เนื่องจากยากที่จะทำการชุบ (Quench) และทองคำกลุ่มนี้ง่ายต่อการอบเพิ่มความแข็งแรง ได้มีการแสดงภาพสมดุลเฟสของทองคำกลุ่มต่างๆ



ภาพที่ 2.7 แสดงภาพตัดขวางแผนภูมิสมดุลเฟสของทองคำกะรัตในกลุ่มต่างๆ

จากรายงานการวิจัยการอบเพิ่มความแข็ง และการเปลี่ยนแปลงเฟสในโลหะทันตกรรมทองคำผสมของ Yamaichi และคณะ<sup>(8)</sup> ได้แสดงตารางการเปลี่ยนแปลงเฟสของทองคำ 18, 16 และ 14 กระรัตไว้จากอุณหภูมิ 700°C จนถึงอุณหภูมิจุดหลอมในตารางที่ 2.9 และยังได้แสดง ภาพตัดขวางของแผนภูมิเฟสที่ 300°C ดังแสดงในภาพที่ 2.8



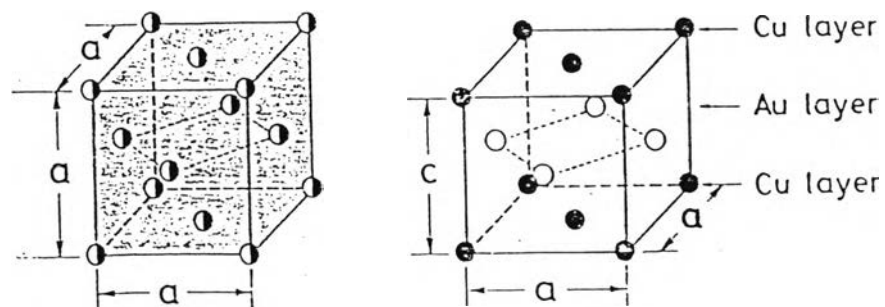
ภาพที่ 2.8 แสดงภาพตัดขวางของแผนภูมิเฟสของทองคำกระรัตในระบบ 3 ธาตุ ที่ 300°C<sup>(8)</sup>

- $\alpha$  Au-Rich Disordered Phase       $\alpha', \alpha''$  Cu-Rich Disordered Phase
- $\beta$  AuCu<sub>3</sub> Ordered Phase               $\gamma$  AuCu II Ordered Phase
- $\delta$  AuCu I Ordered Phase

ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเฟสของทองคำ 18 16 และ 14 กระรัต<sup>(12)</sup>

ทองคำ 18 กระรัต Au-35.7at.%Cu- 11.2at.%Ag	AuCu I (fct) stair-step fashion of twin platelets ต่ำกว่า 330°C	$\alpha$ (fcc) disordered solid solution สูงกว่า 330°C		
ทองคำ 16 กระรัต Au-43.2at.%Cu- 13.8at.%Ag	AuCu I + AuCu II (fct) (orthorhombic) twin platelets (APB) ต่ำกว่า 320°C	AuCu II + $\alpha_2$ ordered lamellar ระหว่าง 320-380°C	$\alpha_1$ + $\alpha_2$ (fcc) (fcc) lamellar structure	$\alpha$ (fcc) disordered สูงกว่า 520°C
ทองคำ 14 กระรัต Au-49.7at.%Cu- 15.8at.%Ag	AuCu II + $\alpha_2$ ordering + modulated structure (APB) ต่ำกว่า 360°C	$\alpha_1$ + $\alpha_2$ modulated structure lamellar structure		$\alpha$ disordered สูงกว่า 560°C

จากตารางที่ 2.9 แสดงถึงลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสของทองคำกระรัตต่างๆ ที่ส่วนผสมทางเคมีต่างกันออกไป เฟส AuCu I และเฟส AuCu II เป็นเฟสที่พัฒนามาจาก เฟส  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  โดยเฟส AuCu I พัฒนามาจากเฟส  $\alpha_2$  โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอมใหม่เป็นแบบ F.C.T (Face Centred Tetragonal) โครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นโครงสร้างที่เรียงตัวอย่างมีระเบียบ (Ordered Structure) จากการศึกษาของ Hirabashi และ Weiaamann ด้วย TEM พบว่ามี การเรียงตัวเป็นแบบ twin lamellar ในชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง ซึ่งสามารถแสดงการจัดวาง อะตอม ดังภาพที่ 2.9

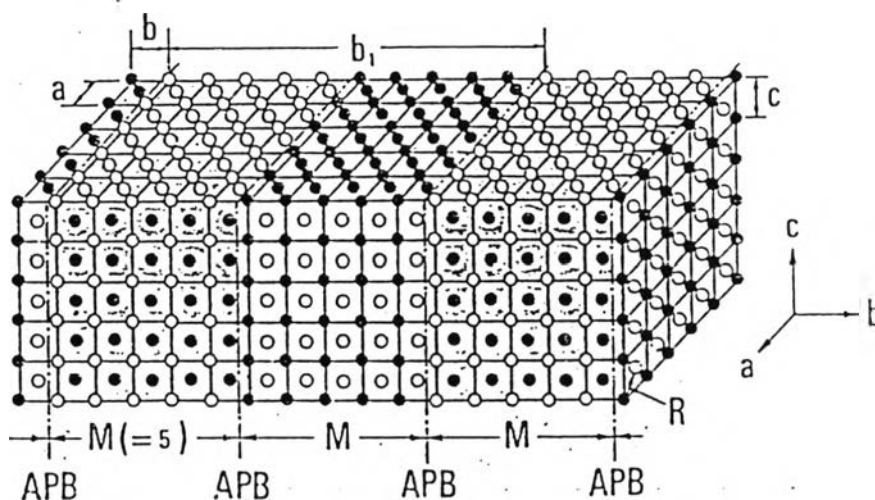


ก.) เฟสที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ( $\alpha$ )    ข.) เฟสที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (AuCu I)

ภาพที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงอะตอมของเฟส AuCu I ในโลหะผสมทองคำกับทองแดง<sup>(12)</sup>



เฟส AuCu II เป็นเฟสที่พัฒนามาจากเฟส  $\alpha_1$  โดยมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นแบบ Orthorhombic โครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่นี้ก็เป็นโครงสร้างที่มีการเรียงตัวอย่างมีระเบียบ แบบ Long-Period Superlattice ซึ่งสามารถแสดงการจัดวางอะตอมคิงภาพที่ 2.10 ซึ่งจะประกอบด้วย โครงสร้างแบบ AuCu I 10 หน่วยเซลล์ (Unit Cell) ถูกแทรกกลางด้วยโครงสร้างที่อะตอมทองคำ (แทนด้วยวงกลมสีขาว) ถูกแทนที่ด้วยอะตอมของทองแดง (แทนด้วยวงกลมสีดำ) จำนวน 5 หน่วยเซลล์ ในทิศทาง b เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ โดยมีบริเวณที่เชื่อมต่อกันเรียกว่า แอนติเฟสแบนด์ริ (Anti Phase Boundary หรือ APB)



ภาพที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงอะตอมของเฟส AuCu II ในโลหะผสมทองคำกับทองแดง

### 2.3 การอบเป็นเนื้อเดียว (Homogenization)

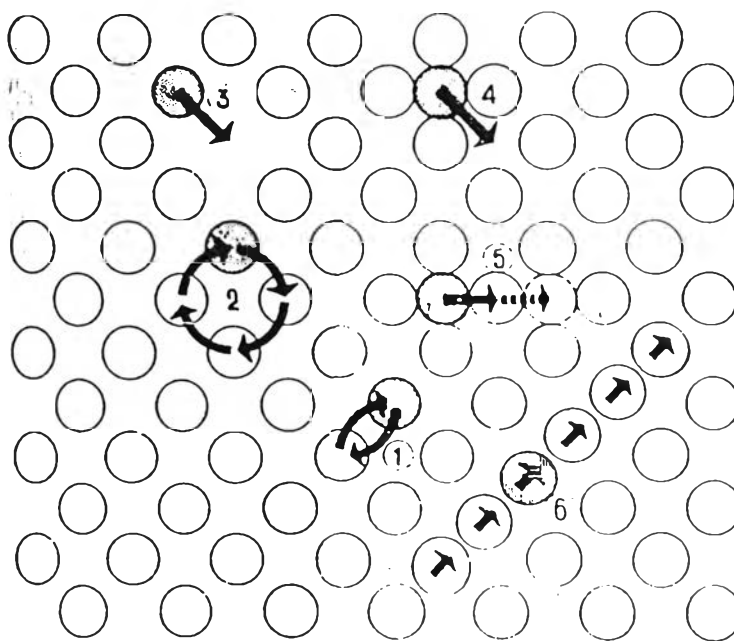
การอบเป็นเนื้อเดียวเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของโลหะที่ผ่านการหล่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้น สมบัติที่ไม่ดีซึ่งเกิดขึ้นจากการหล่อ อันได้แก่ โครงสร้างที่เป็นแบบเดนไดรต์ ความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีจากผิวนอกจนถึงแกนกลางของเดนไดรต์ ข้อเสียดังกล่าวจะเป็นข้อเสียของชิ้นงานเมื่อนำไปผ่านขั้นตอนการผลิตต่อไป

การอบเป็นเนื้อเดียวในโลหะจะอาศัยหลักการแพร่ของอะตอมในเนื้อวัสดุที่อุณหภูมิสูงซึ่งจะทำให้อะตอมเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอุณหภูมิปกติ โดยการแพร่ของอะตอมในโลหะ สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การแพร่โดยอาศัยการแทนที่ (Substitutional Diffusion) สามารถแบ่งย่อยออกเป็นการแทนที่กันเอง (Self Diffusion) และอาศัยช่องว่างในการแพร่ (Vacancy Diffusion)

## 2. การแพร่โดยอาศัยการแทรกที่ (Interstitial Diffusion)

โดยการแพร่จะเป็นรูปแบบใดขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ คือ การแพร่โดยอาศัยการแทนที่ที่อาศัยช่องว่างของอะตอมในการเคลื่อนที่ ส่วนการแพร่โดยอาศัยการแทรกตัวระหว่างอะตอมเกิดจากอะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าเคลื่อนที่แทรกตัวระหว่างอะตอมที่ใหญ่กว่า ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงลักษณะของการแพร่ในรูปแบบต่างๆ<sup>(13)</sup>

- 1) แบบแทนที่โดยตรง 2) แบบแทนที่เป็นวงจร 3) แบบแทนที่ช่องว่าง
- 4) แบบแทรกที่ 5) แบบผลักแทรกที่ 6) แบบครอเดียน (Crowdian)

เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีกระบวนการต่างๆ เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุโดยอาศัยกลไกการแพร่ดังนี้

1. เกรนใหญ่ และหยาบ (Grain Coarsening) เกิดขึ้นระหว่างการอบที่ใช้ระยะเวลาอันนานเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวของเกรนที่อยู่ใกล้เคียงจากการแพร่ของอะตอมบริเวณขอบเกรน
2. เกิดเกรนใหม่ (Recrystallization) เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปขึ้นก่อนการอบ

3. การตกผลึกของธาตุที่อิ่มตัวยิ่งยวด (Precipitation of Supersaturated Elements) เกิดขึ้นหลังการอบ ในช่วงการลดอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

4. การละลายของเฟสที่ไม่เสถียร (Dissolution of Unstable Phase) เกิดขึ้นขณะทำการอบในชิ้นงานที่มีเฟสไม่เสถียรเช่น การอบชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) มาก่อน

5. การเกิดออกซิเดชันของผิว (Surface Oxidation) การควบคุมบรรยากาศในการอบที่ไม่ดีพอจะทำให้เกิดการออกซิเดชันของผิวจากก๊าซออกซิเจน

6. ก๊าซไฮโดรเจนในเนื้อวัสดุลดลง (Hydrogen Degassing)

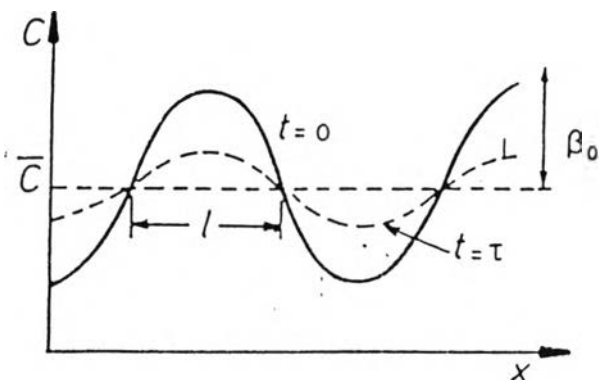
7. การหลอมเหลวเฉพาะจุด (Localized Melting) ชิ้นงานที่ไม่เป็นเนื้อเดียวบริเวณที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าบริเวณอื่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการหลอมเหลวของบริเวณนั้นก่อน

8. การเกิดโพรง หรือขยายตัวของโพรง (Pore Generation and Agglomeration)

ในการทำการอบเป็นเนื้อเดียวสิ่งที่สำคัญที่เป็นตัวแปร คือ ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดว่าเกิดความเป็นเนื้อเดียวของส่วนผสมในเนื้อโลหะแล้วหรือไม่ โดยถ้าระยะเวลาในการอบนานเกินไปจะทำให้ขนาดเกรนใหญ่ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติวัสดุ โดยปกติอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวจะอยู่ในช่วง 50-100°C ต่ำกว่าเส้นแข็งตัวสมบูรณ์ (Solidus Line) ตามแผนภูมิสมดุลของเฟส

### 2.3.1 การประมาณเวลาที่ใช้ออบเป็นเนื้อเดียว

เมื่อสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของค่าส่วนผสม หรือให้แทนค่าด้วย  $C_B$  มีการกระจาย ตัวเป็นเส้นโค้ง Sinusoidally ตามความยาวในหนึ่งมิติ ในที่นี้กำหนดให้อะตอม B กระจายตัวลดลง ตามความเข้มที่ลดลง โดยรวมทั้งบริเวณที่มีความโค้งเป็นลบ เช่นที่ระหว่าง  $X=0$  และ  $X=L$  ความเข้มจะลดลง และระหว่าง  $X=L$  และ  $X=2L$  ความเข้มจะเพิ่มขึ้น และความโค้งจะมีค่าเป็น 0 ที่  $X=0, L$  และ  $2L$  และเมื่อเวลาผ่านไปรูปแบบของความเข้ม จะเปลี่ยนไปตามเส้นประดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงเส้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อเวลาผ่านไปจากการแพร่  
ที่  $t=0$  สามารถเขียนสมการความเข้มข้นได้ดังนี้

$$C = \bar{C} + \beta_0 \sin(\pi X/L) \dots\dots\dots(2.1)$$

โดย  $\bar{C}$  แทนค่าส่วนผสมเฉลี่ย  $\beta_0$  แทนค่าแอมพลิจูดของความเข้มข้นเริ่มต้น และให้  $D_B$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

$$C = \bar{C} + \beta_0 \sin(\pi X/L) \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots(2.2)$$

โดย  $\tau$  แทนค่าคงที่ที่เรียกว่า Relaxation Time

$$\tau = L^2/\pi^2 D_B \dots\dots\dots(2.3)$$

ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของความเข้มข้นเมื่อเวลาผ่านไป  $\beta$  สามารถเขียนได้โดย  
แทนด้วย  $C$  ที่  $X = L/2$

$$\beta = \beta_0 \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots(2.4)$$

ปริมาณการลดลงของความสูงของยอดคลื่นขึ้นอยู่กับค่า Relaxation Time ( $\tau$ ) โดยเมื่อ  
เวลาผ่านไป  $t = \tau$  แล้ว  $\beta = \beta_0 / e$  ค่าความสูงของยอดคลื่นจะลดลงเท่ากับ  $1/2.72$  และเมื่อเวลา ผ่าน  
ไป  $t = 2\tau$  ค่าความสูงของยอดคลื่นจะลดลงเท่ากับ  $1/e^2$  จึงทำให้สามารถประมาณเวลาในการ อย  
เป็นเนื้อเดียวได้จากค่า  $\tau$

การหาค่า  $D_B$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$D_B = D_0 \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots(2.5)$$

สมการดังกล่าวเป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่แบบแทนที่กันเอง (Self Diffusion) ในกรณีที่การแพร่ไม่ได้เกิดในโลหะบริสุทธิ์สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยประมาณ (Interdiffusion Coefficient)  $D$  ดังสมการที่ 2.6

$$D = X_B D_A + X_A D_B \dots\dots\dots(2.6)$$

โดยที่

$$X_A + X_B = 1 \dots\dots\dots(2.7)$$

$D$  แทนค่า สัมประสิทธิ์การแพร่โดยประมาณ

$D_A$  แทนค่า สัมประสิทธิ์ของธาตุ A

$D_B$  แทนค่า สัมประสิทธิ์ของธาตุ B

$X_A$  แทนค่า สัดส่วนของจำนวนอะตอมของ ธาตุ A

$X_B$  แทนค่า สัดส่วนของจำนวนอะตอมของ ธาตุ B

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ธาตุ	$D_0$ ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ )	$Q$ ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ )	ชนิดของการแพร่
Au	10.7	176.9	Self Diffusion
Ag	40	184.6	Self Diffusion
Cu	31	200.3	Self Diffusion
AuในAg	26	191.1	Impurity Diffusion
CuในAg	120	193.6	Impurity Diffusion
AuในCu	69	208.7	Impurity Diffusion
AgในCu	63	195.3	Impurity Diffusion

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการแพร่แบบด้วยตัวเอง (Self Diffusion) จะอาศัยการแพร่ในเนื้อวัสดุชนิดเดียวกัน 2 ชั้นนำมาเชื่อมติดกัน โดยชั้นหนึ่งมีอะตอมที่ถูกอบด้วยรังสี และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการตรวจวัดปริมาณการแพร่ของอะตอมที่ปล่องรังสีนี้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการแพร่แบบใช้สิ่งแปลกปลอม (Impurity Diffusion) จะอาศัยการ

แพร่ของวัสดุต่างชนิดกัน 2 ชั้นนำมาเชื่อมติดกัน และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการตรวจวัดปริมาณการแพร่ของอะตอมที่แตกต่างกัน

การอบเป็นเนื้อเดียวจะเกิดขึ้นได้เมื่อระยะทางในการแพร่ไม่มากนักซึ่งหมายถึงขนาดของเดนไดรต์ หรือระยะห่างของแกนเดนไดรต์ จะต้องมีความไม่มากนัก

ในงานหล่อทั่วไปที่มีอัตราการเย็นตัวช้าๆ จะทำให้เซลล์มีขนาดใหญ่ หรือธาตุที่เป็นส่วนผสมบางตัวที่มีปริมาณการแพร่ต่ำก็จะทำให้ยากในการแพร่ เช่น เมื่อเปรียบเทียบงานหล่อที่มีขนาดของเกรน 30-60 ไมครอนกับ 5-10 ไมครอน ได้จากการหล่อแบบต่อเนื่อง และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กจะมีความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุมากกว่าเกรนที่มีขนาด 30-60 ไมครอน

การอบเป็นเนื้อเดียวโดยส่วนมากจะเป็นขั้นตอนแรกที่น่าำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาผ่านเพื่อทำให้ชิ้นงานมีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปผ่านขั้นตอนอื่นๆ ในกระบวนการผลิต เช่น การขึ้นรูปร้อน หรือการขึ้นรูปเย็น เพื่อสมบัติของชิ้นงานสำเร็จสุดท้ายที่ดีที่สุด