

## บทที่ 2

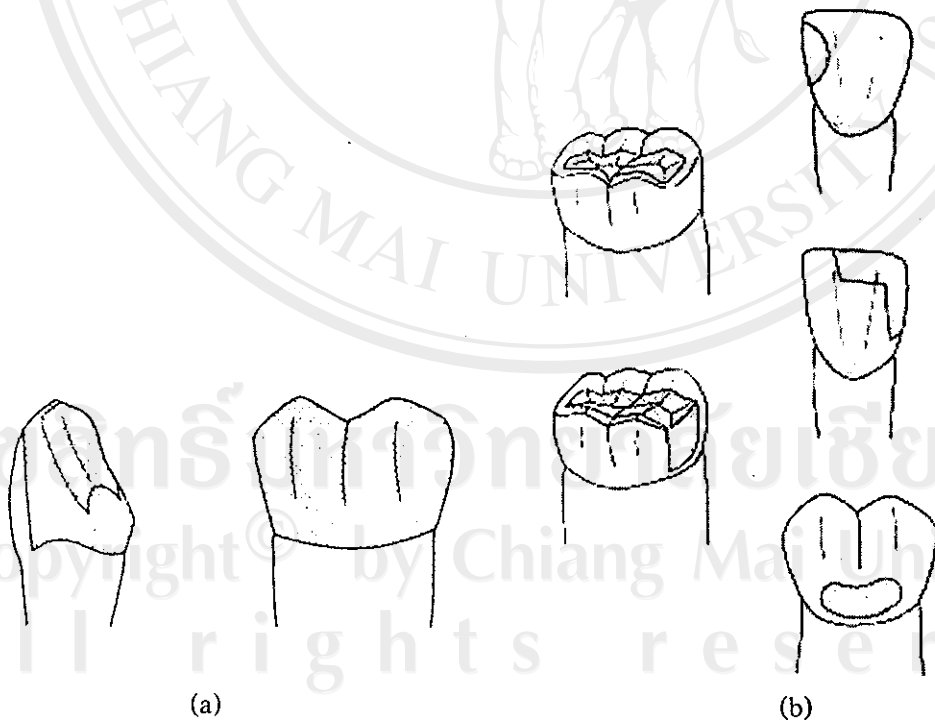
### ทฤษฎี

โลหะผสมที่ใช้ในงานทางทันตกรรมมีหลายชนิด ซึ่งมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันออกไป โลหะผสมทองคำถูกนำมาใช้ในงานทางทันตกรรมหลายประเภท เช่น นิยมใช้ทำฟันปลอม เช่น ใช้ทำเป็นอินเลย์(inlay) ครอบฟัน หรือสะพานฟัน เพราะทองคำเป็นโลหะที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศง่ายมีจุดหลอมตัวไม่สูงเกินไป สามารถหลอมด้วยเครื่องมือที่ใช้ทั่วไป และหาง่าย ทองผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมมี 3 ประเภทหลักคือ[4]

โลหะผสมทองคำปริมาณสูง(high-content gold alloys)

โลหะผสมยึดติดกับพอร์ซเลน(porcelain fused to metal alloys, PFM)

โลหะผสมทองคำปานกลาง(medium-content gold alloys)



ภาพ 2.1 แสดงครอบฟัน (a) และอินเลย์ (b) แบบต่างๆ[5]

โลหะผสมที่มีปริมาณทองเป็นส่วนผสมปริมาณสูงเป็นโลหะผสมทางทันตกรรมที่มีสมบัติพิเศษคือ ด้านการกัดกร่อน มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ(biocompatible) ทำการหลอม และหล่อได้ง่าย สามารถชดเชยการหดตัว มาตรฐานของทองผสมโดยสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา (American Dental Association, ADA)[6] ได้กำหนดทองผสมที่มีปริมาณทองสูงไว้ 4 ชนิด ได้แก่

- ชนิดที่ I (type I) : อ่อน ใช้หล่ออินเลย์ขนาดเล็ก (ใช้ในงานบูรณะฟัน และในวัสดุที่มีต้องการการใช้แรงน้อยๆ ในการขัดแต่ง)
- ชนิดที่ 2 (type II) : อ่อนปานกลาง ใช้หล่ออินเลย์ขนาดใหญ่ ครอบฟัน และสะพานฟัน ช่วงสั้นๆ (ใช้ในการบูรณะฟันและวัสดุที่ต้องการทนแรงเค้นปานกลางในการขัดแต่ง)
- ชนิดที่ 3 (type III) : แข็ง ใช้หล่อสะพานฟันช่วงยาวๆ (ใช้ในการบูรณะฟัน และวัสดุที่ต้องการทนแรงเค้นสูง)
- ชนิดที่ 4 (type IV) : แข็งมาก ใช้ในการหล่อโครงสร้างของเดนเจอร์ (ใช้ในการบูรณะฟัน และวัสดุที่ต้องการทนแรงเค้นสูง)

โดยชนิดที่ 3 และ 4 มีองค์ประกอบโดยประมาณคือ 70%Au-11%Ag-12%Cu และอื่นอีก 7% สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งได้เป็นอย่างดี

ตาราง 2.1 แสดงสมบัติของโลหะผสมทองคำชนิดต่างๆ[4]

Type	Au (% wt)	Brinell Hardness		Tensile Strength MPa	Elongation (%)		Fusion Temp (°C)
		Quench(Min-Max)	Hardness (Min)		Quench (Min)	Hardness	
I	82	40-75	-	-	18	-	930
II	78	70-100	-	-	12	-	900
III	78	90-140	-	-	12	-	900
IV	75	130	200	620	10	2	870

สมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดองค์ประกอบของโลหะผสมทองคำสำหรับทันตกรรมไว้ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 แสดงธาตุองค์ประกอบพื้นฐานของโลหะผสมทองปริมาณสูง[6]

\* ประเภทที่ใช้ในการทดลองนี้

Type	Au	Ag	Cu	Pt	Pd	Zn
I	20.2-95.8	8.4-12.0	1.6-6.2	0-1.0	0-3.6	0-1.2
II	73.0-83.0	6.9-14.5	5.8-10.5	0-4.2	0-5.6	0-1.4
III*	71.0-79.8	5.2-13.4	7.1-12.6	0-7.5	0-6.5	0-2.0
IV	62.4-71.9	8.0-17.4	8.6-15.4	0.2-8.2	0-10.1	0-2.7

ทองผสมสำหรับหล่อทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วยทองคำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักกับโลหะที่ผสมได้แก่ เงิน ทองแดง แพลทินัม(Platinum) พัลลาเดียม(Palladium) และสังกะสี อาจมีโลหะอื่นผสมอีกก็ได้<sup>①</sup> ซึ่งอัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบทำให้สมบัติของทองผสมแต่ละชนิดเปลี่ยนไป อิทธิพลของโลหะผสมต่างๆ ในทองผสม มีดังนี้[1]

**ทองแดง** – เพิ่มกำลังความแข็งแรง และความแข็งผิวให้สูงขึ้น ทองผสมจะมีสีออกแดงเล็กน้อย ลดอุณหภูมิการหลอมเหลว ถ้ามีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยต้านทานการกัดกร่อน[7]

**เงิน** – ช่วยการลดช่วงการหลอมเหลวให้ต่ำลง และให้มีสมบัติยึดตัวได้มากขึ้น

**แพลทินัม** – อุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้น เพิ่มกำลังความแข็งแรง ความแข็งผิวสูงขึ้นอีก ช่วยต้านทานการกัดกร่อน และทำให้สีทองอ่อนลง

**พัลลาเดียม** – มีคุณสมบัติคล้ายแพลทินัมแต่ราคาถูกกว่า

**สังกะสี** – ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ก่อนที่โลหะอื่นจะถูกออกซิไดซ์

นอกจากนั้น อาจเพิ่ม อิริเดียม(Iridium) โรเดียม(Rhodium) อินเดียม(Indium) หรือแทนทาลัม(Tantalum) ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส(nucleating agent) ได้เกรนละเอียดขึ้น และถ้ามีนิเกิล(Nikel) ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์จะช่วยเพิ่มกำลังความแข็งแรง)

โลหะผสมทั้งหลายที่ใช้ในโลหะผสมทองเหล่านี้มีสมบัติดังตาราง 2.3 ซึ่งสมบัติบางประการเหล่านี้จะใช้ในการพิจารณาความสามารถในการหลอม การหล่อ และความสามารถในการละลายเข้าด้วยกัน

ตาราง 2.3 สมบัติบางประการของโลหะผสม[2]

Element	Atomic number	Crystal system	Lattice Parameter(nm)	Atomic Mass (g.mol <sup>-1</sup> )	Density (Mg.m <sup>-3</sup> )	Melting Temp(°C)
Au	79	fcc	0.40786	196.97	19.302	1064
Cu	29	fcc	0.36151	63.54	8.93	1084
Pt	78	fcc	0.39231	195.09	21.45	1769
Ag	47	fcc	0.40862	107.86	10.49	961
Zn	30	hcp	a = 0.26648 c = 0.49470	65.38	7.133	420
Ir	77	fcc	0.384	192.9	22.65	2447

## 2.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อน หมายถึงกรรมวิธีที่ทำให้โลหะในสภาวะของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น และให้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง โดยที่โลหะนั้นยังอยู่ในสภาวะของแข็ง โดยการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ให้เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของโลหะนั้นให้เหมาะสมตามต้องการ[8]

ปัจจัยสำคัญในกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อน

1. ส่วนประกอบ หรือส่วนผสมของโลหะผสม - ปริมาณของโลหะในส่วนผสมที่ไม่เท่ากัน จะทำให้การทำกรรมวิธีทางความร้อนแตกต่างกัน
2. อุณหภูมิ - โลหะผสมแต่ละชนิดจะใช้อุณหภูมิในกรรมวิธีทางความร้อนแตกต่างกัน
3. เวลา - โลหะผสมแต่ละชนิดจะใช้เวลาไม่เท่ากัน รวมทั้งอัตราการเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง

กรรมวิธีทางความร้อนเป็นกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติอีกวิธีหนึ่งที่จำเป็น และนิยมนำมาใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติของโลหะ หลังจากผ่านกรรมวิธีความร้อนแล้วโลหะ และโลหะผสมนั้นอาจอ่อนตัวลงหรือแข็งตัวขึ้นจากเดิม การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากขนาดของเกรนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น เกรนโตขึ้นหรือเล็กลง ถ้าเกรนมีขนาดโตขึ้น จำนวนเกรนต่อหน่วยพื้นที่น้อยลงแรงยึดระหว่างเกรนก็จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้กำลังความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ถ้าขนาดเกรน

เล็กลง จำนวนเกรนต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นแรงยึดระหว่างเกรนมากขึ้น มีผลให้กำลังความแข็งแรงมากขึ้น และสาเหตุอีกประการหนึ่งเกิดจากสถานะไม่สมดุล(non equilibrium) ในสถานะของแข็งวัฏภาคที่ไม่สมดุลนี้พยายามกลับสู่สถานะสมดุล เมื่ออยู่ในสถานะสมดุล กลสมบัติของโลหะนั้นจะมีค่าสูงขึ้น นอกจากขนาดเกรนที่จะเปลี่ยนไปจากเดิมแล้ว สมบัติที่เปลี่ยนไปอาจเกิดจากการตกตะกอนของธาตุผสม ซึ่งตะกอนที่แยกวัฏภาคออกมาจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของแถบการเลื่อน

## 2.2 กรรมวิธีทางความร้อน

### ① การอบร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้[9]

1. การอบเป็นเนื้อเดียว(homogeneous)
2. การอบเพิ่มความแข็งแรง(treatment to increase strengthening)
3. การอบอ่อน(annealing treatment)

### 2.2.1 การอบเนื้อเดียว

การอบเนื้อเดียวของโลหะเจือหลังจากผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูป เป็นกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความสม่ำเสมอของโครงสร้างของโลหะเจือให้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน หรือการแปรรูปด้วยกระบวนการอื่นๆ ต่อไป สมบัติที่เป็นข้อบกพร่องที่พบบ่อยๆ ในงานหล่อขึ้นรูปโลหะ ส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างเดนไดรต์ และความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีระหว่างบริเวณแกนเดนไดรต์ และช่องว่างระหว่างเดนไดรต์

การอบเนื้อเดียวของโลหะเจือจะอาศัยหลักการแพร่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอม โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของอะตอมที่มีอุณหภูมิสูงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่ ณ อุณหภูมิปกติ ในการอบเนื้อเดียวระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดการเกิดเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมในเนื้อโลหะ ตัวอย่างเช่น หากอบด้วยอุณหภูมิที่สูง และระยะเวลาที่นานเกินไปจะทำให้ขนาดของเม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติของวัสดุ หรืออาจทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายเฉพาะจุดภายในเนื้อชิ้นงานได้ โดยปกติอุณหภูมิที่เลือกใช้สำหรับการอบเป็นเนื้อเดียวจะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเส้น โซลิดัส(solidus) ประมาณ 50-100°C ตามแผนภาพสมดุลของโลหะเจือ หรือถ้าเป็นโลหะเจือที่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ในสถานะสารละลายของแข็ง(terminal solid solution) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบจะอยู่ระหว่างเส้นโซลิดัส และโซลิวัส (solvus)

ขณะที่ทำการอบโลหะเจือให้เป็นเนื้อเดียวจะมีกระบวนการต่างๆ เกิดขึ้นมากมายอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากกลไกการแพร่ของอะตอมภายในเนื้อโลหะดังนี้

กระบวนการที่เกิดขึ้น

- เกรนใหญ่และหยาบ (grain coarsening) เกิดขึ้นเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบนานเกินไป ทำให้เกิดการรวมตัวของเกรนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจากการแพร่ของอะตอมบริเวณการคคผลึกของเกรนใหญ่ (recrystallization) เกิดกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ แปรรูปเย็นมาก่อนที่จะอบ

- การตกตะกอนของธาตุที่อิ่มตัวยิ่งยวด (precipitation of supersaturated element) ที่เกิดขึ้นหลังจากที่โลหะเจือผ่านการอบในช่วงการลดอุณหภูมิ ซึ่งทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

- การละลายของเฟสที่ไม่เสถียร (dissolution of unstable phase) เกิดขึ้นขณะทำการอบชิ้นงาน เช่น การอบชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสภาวะของเหลวกลายเป็นของแข็ง การเกิดออกซิเดชันที่ผิว (surface oxidation) ที่เป็นผลเนื่องจากการควบคุมบรรยากาศในการอบไม่ดีพอ ทำให้ผิวของชิ้นงานสัมผัสกับออกซิเจน

- การเกิดโพรงอากาศหรือรูพรุนภายในชิ้นงาน

- ก๊าซไฮโดรเจนในเนื้อวัสดุลดลง (hydrogen degassing)

- การหลอมเหลวเฉพาะจุด (localized melting) เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาอบมีโครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดบริเวณที่มีจุดหลอมละลายต่ำกว่าบริเวณอื่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการหลอมละลายบริเวณที่มีจุดหลอมละลายต่ำ

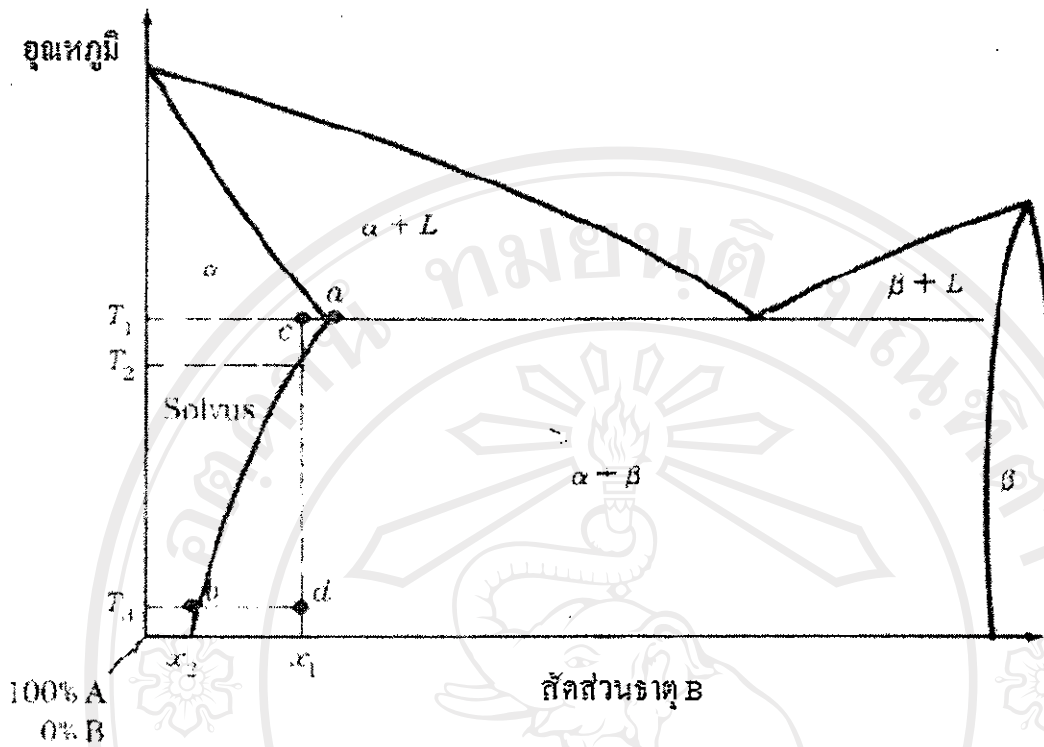
### 2.2.2 การอบเพิ่มความแข็งแรง (ตามข้อ ๑๖ อยู่ใน sheet)

การอบเพิ่มความแข็งแรง เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเจือที่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ในสภาวะสารละลายของแข็ง ซึ่งความสามารถในการละลายของธาตุชนิดหนึ่งในธาตุอีกชนิดหนึ่งลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังแสดงในภาพ 2.2 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการละลายในสภาวะสารละลายของแข็ง  $\alpha$  จะลดลงจากจุด a ไป b ตามแนวเส้น โซลิวส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved



ภาพ 2.2 แผนภาพสมดุลของโลหะ A และ B ที่มีสถานะสารละลายของแข็ง  $\alpha$  โดยที่ความสามารถในการละลายของ B ใน A จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง[10]

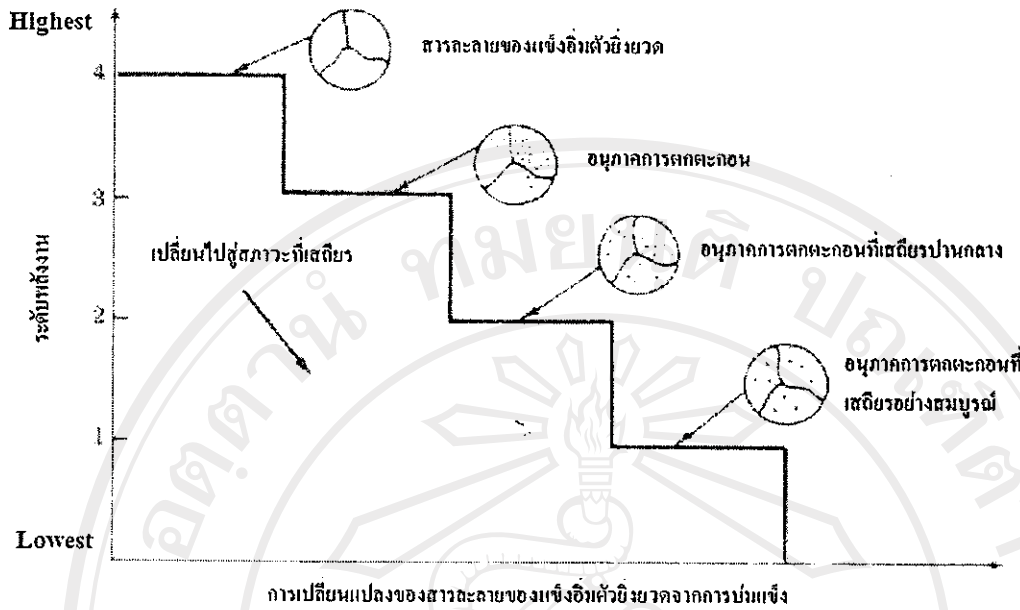
โลหะแข็งที่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ในสถานะสารละลายของแข็ง สามารถที่จะเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการชุบแข็ง โดยวิธีทำให้มีการตกตะกอน (precipitation strengthening) ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่าการทำให้แข็งขึ้นโดยการตกตะกอน (precipitation hardening) วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้คือ สร้างอนุภาคการตกตะกอนเล็กๆ กระจายตัวอย่างหนาแน่น และละเอียด ซึ่งอนุภาคเล็กๆ ที่ตกตะกอนเหล่านี้จะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของแนวคิสโลเคชั่น (dislocation) ทำให้โลหะแข็งสถานะสารละลายของแข็ง  $\alpha$  มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ขั้นตอนของกระบวนการทำให้แข็งขึ้นโดยการตกตะกอนของโลหะแข็งสถานะสารละลายของแข็งที่มีส่วนผสม  $X_1$  ในเฟสไคอะแกรม ภาพ 2.2 ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน คือ[10]

- นางช.ด. 1. การอบเนื้อเดียว (solution heat treatment)
- " 2. การชุบชุบ (quenching)
- " 3. การบ่มแข็ง (ageing)

(1) การอบเนื้อเดียว เป็นขั้นตอนที่โลหะผสมจากกระบวนการหล่อขึ้นรูปหรือกระบวนการแปรรูปเย็นถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเส้นโซลิวัส และโซลิดัส หลังจากนั้นถูกแช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้จนมีโครงสร้างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

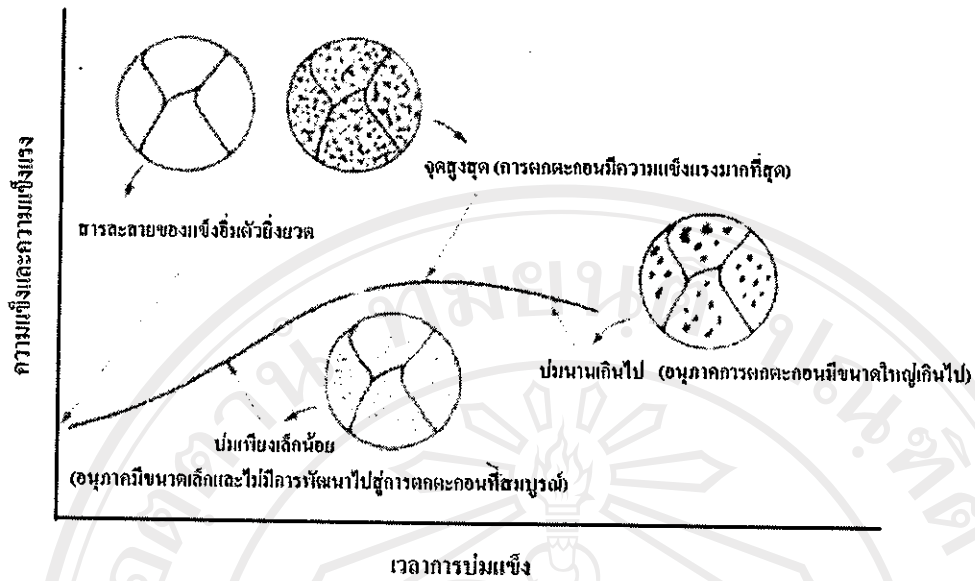
(2) การจุ่มชุบ เป็นขั้นตอนที่ทำหลังจากที่โลหะเจือผ่านขั้นตอนการอบเนื้อเดียวมาแล้ว และจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยตัวกลางจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งโครงสร้างของโลหะเจือหลังจากผ่านการจุ่มชุบ จะประกอบด้วยสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) สำหรับในกรณีของโลหะเจือที่มีส่วนผสม  $X_1$  ดังภาพ 2.2 โครงสร้างหลังจากผ่านการจุ่มชุบจนอุณหภูมิลดลงจนถึง  $T_1$  ที่จุด d ประกอบด้วยสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดที่ประกอบด้วย  $\alpha$ -Phase

(3) การบ่มแข็ง เป็นขั้นตอนการบ่มเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของธาตุผสมเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดอย่างสม่ำเสมอ หลังจากโลหะผสมผ่านขั้นตอนการอบเนื้อเดียวและจุ่มชุบ ซึ่งอนุภาคเล็กๆ ที่ตกตะกอนนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของแนวคิสโลแกนในระหว่างที่โลหะถูกบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า “natural ageing” แต่ถ้าทำการ บ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงเรียกว่า “artificial ageing” การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดในระหว่างการบ่มแข็ง หลังจากโลหะเจือผ่านกระบวนการทำให้แข็งขึ้นด้วยการตกตะกอน โลหะเจือจะอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีพลังงานสูงมากกว่าระดับพลังงานเท่ากับ 4 ดังแสดงในภาพ 2.3 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ไม่เสถียร และมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปยังวิฤภาคที่มีระดับพลังงานต่ำที่มีความเสถียรมากกว่า หรือวิฤภาคสมดุลอื่นโดยเกิดขึ้นเองตามกฎสมดุลพลังงาน เมื่อโลหะเจือที่อยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดถูกบ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งมีพลังงานกระตุ้นค่อนข้างน้อยอะตอมของโลหะจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มเรียกว่า “GP zone (guinier-preston zone)” ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการตกตะกอน ในกรณีของโลหะเจือ A-B ในภาพ 2.3 บริเวณ GP zone นี้จะมีอะตอมของธาตุ B มากกว่า A ซึ่งแสดงด้วยจุดต่างๆ ดังที่ระดับพลังงาน 3 ของภาพ 2.3 และเมื่อทำการบ่มต่อไปหรือมีพลังงานกระตุ้นมากเพียงพอโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่ม GP zone จะมีการขยายขนาดของการตกตะกอนใหญ่ขึ้น (intermediate metastable precipitation) ดังแสดงที่ระดับพลังงาน 2 ของภาพ 2.3 แต่ถ้ายังคงทำการบ่มที่อุณหภูมิสูงต่อไป GP zone ที่มีการขยายขนาดของการตกตะกอนใหญ่ขึ้น ตะกอนเหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นวิฤภาคที่มีความสมดุลมากขึ้นดังแสดงที่ระดับพลังงาน 1



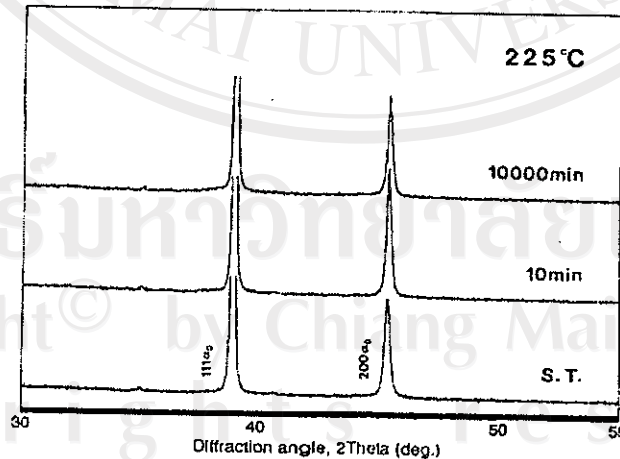
ภาพ 2.3 การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างภายในของ โลหะเจือที่อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมพัลซ์ยาว โดยการบ่มแข็ง[10]

ผลของเวลาสำหรับการบ่มแข็งต่อความแข็งแรง และความแข็งของโลหะเจือที่ผ่านขั้นตอนการอบเนื้อเดียว และการจุ่มชุบสามารถแสดงได้ด้วยกราฟการบ่มแข็ง (ageing curve) ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงหรือความแข็งกับเวลาที่ใช้ในการบ่ม (ageing time) ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ดังเช่นตัวอย่างจากภาพ 2.4 ความแข็งแรงของสารละลายของแข็งอิมพัลซ์ยาวจะเท่ากับจุดตัดบนแกน Y ที่เวลาเท่ากับศูนย์เมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นบริเวณการตกตะกอนจะเริ่มเกิดขึ้นและขนาดก็จะค่อยๆ ใหญ่ขึ้นทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวลดลงดังภาพ 2.4 ความแข็งแรงและความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดถ้าอุณหภูมิสำหรับการบ่มสูงเพียงพอ ในช่วงนี้จะเกิดการขยายขนาดของการตกตะกอนใหญ่ขึ้นและถ้าการบ่มดำเนินต่อไปตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนจะเริ่มหยาบขึ้น ทำให้โลหะเจือนั้นเริ่มมีความแข็งแรงลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการบ่มใช้เวลานานเกินไป (over ageing) และสิ่งที่เกิดขึ้นตามมาก็คือการขยายตัวของเม็ดเกรน (grain growth)



ภาพ 2.4 กราฟ ageing curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับเวลาที่อุณหภูมิหนึ่งของโลหะเจือที่สามารถทำให้แข็งขึ้น โดยการตกตะกอน[10]

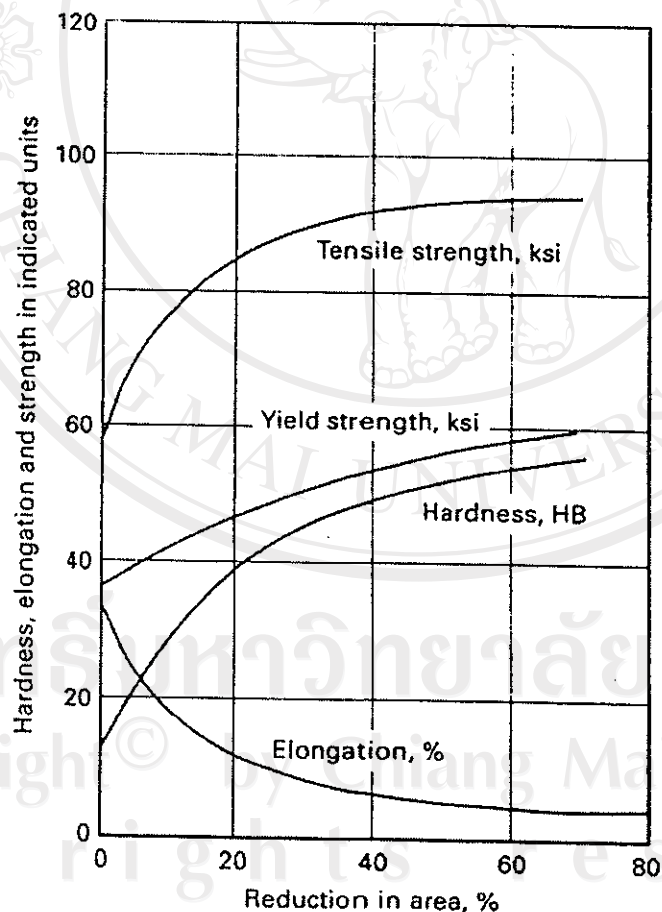
นอกจากนี้หลังจากที่โลหะผสมทองคำผ่านกระบวนการบ่มแข็งแล้ว เมื่อนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์(X-ray diffractometer, XRD) จะได้กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพ 2.5 เส้นกราฟที่ได้จะแสดงค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ค่ามุมประมาณ 39 องศา และ 45 องศา ซึ่งเป็นค่ามุมของโลหะผสมทองคำ-ทองแดง[12] ที่ได้ตกตะกอนออกมา ระหว่างกระบวนการบ่มแข็ง



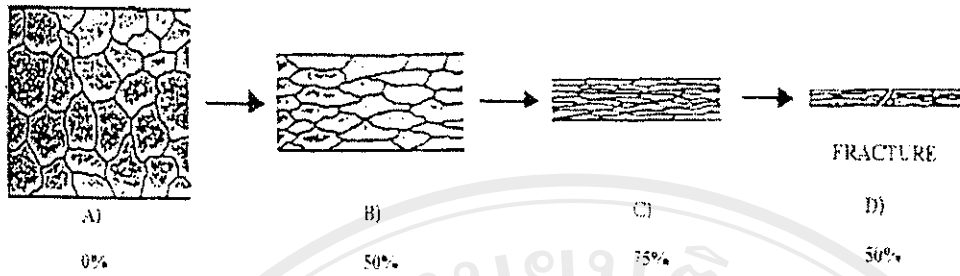
ภาพ 2.5 XRD pattern ของชิ้นตัวอย่างโลหะผสมทองคำปริมาณสูงที่ทำการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 750°C นาน 30 นาที และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225°C นาน 10 นาที และ 10000 นาที[11]

### 2.2.3 การอบอ่อน

การอบอ่อน เป็นการกระทำทำให้โลหะอ่อนตัวโดยเผาโลหะนั้นถึงอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาคโดยคงอุณหภูมิไว้แล้วค่อยๆ ปล่อยให้เย็นลงช้าๆ ในเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อให้ได้ขนาดเกรนตามต้องการ วัตถุประสงค์ของการอบอ่อนเพื่อฟื้นฟูสภาพของโลหะให้มีความเหนียว ความอ่อนนุ่ม และความสามารถในการแปรรูปเย็น(cold worked) โดยการตกผลึกใหม่(recrystallization) โลหะเจือที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปเมื่อนำไปทำการแปรรูปเย็นจะมีผลทำให้ความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่า การทำให้แข็งขึ้นโดยให้เกิดความเครียดจากการแปรรูป(work hardening or strain hardening) ดังแสดงในภาพ 2.6 แต่ในทางกลับกันความเหนียว(ductility) และความสามารถในการแปรรูปลดลง ในขณะที่โลหะมีค่า work hardening สูงๆ ถ้าแปรรูปต่อไปอีกโลหะก็จะเกิดการแตกหักเสียหายเนื่องจากสูญเสียความเหนียวภายใน(residual ductility) ดังแสดงในภาพ 2.7



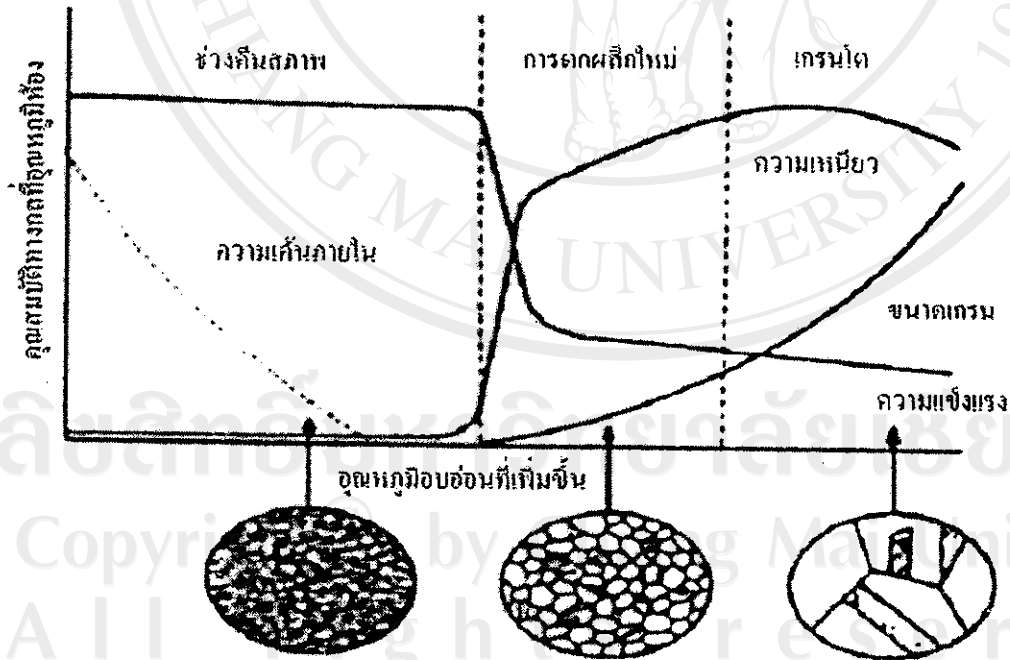
ภาพ 2.6 ปริมาณการแปรรูปที่มีผลต่อความแข็งแรง[5]



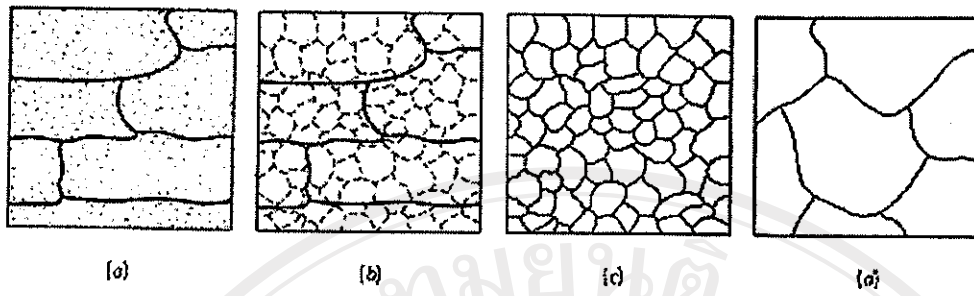
ปริมาณการแปรรูปที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความหนาจากการรีด

ภาพ 2.7 ปริมาณการแปรรูปที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค[9]

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายเหล่านี้ที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงมีแนวความคิดที่จะฟื้นฟูสภาพความเหนียว และความอ่อนนิ่มของโลหะให้สามารถแปรรูปต่อไปได้อีกด้วยการอบอ่อน โดยปกติในทางปฏิบัติจะอบอ่อน หลังจากทีโลหะผ่านการแปรรูปเป็น 50 - 75 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ อุณหภูมิของการอบอ่อน ก็มีผลต่อคุณสมบัติของโลหะ ดังแสดงในภาพ 2.7



ภาพ 2.8 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบอ่อนที่มีผลต่อสมบัติ และ โครงสร้างจุลภาค[9]



ภาพ 2.9 อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค (a) ผลของการแปรรูปเย็น (b) หลังจากผ่านกระบวนการคืนสภาพ (c) เกิดการตกผลึกใหม่ (d) เกิดการเติบโต และขยายตัวของเม็ดเกรน[2]

จากภาพ 2.8 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 พื้นที่หลักคือบริเวณคืนสภาพบริเวณของการตกผลึกใหม่ และบริเวณที่มีการเติบโตขยายตัวของเม็ดเกรน เมื่อโลหะได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิปกติ อันดับแรกโลหะจะเกิดการจัดตำแหน่งการเรียงตัวของอะตอม เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นภายใน โลหะตามกระบวนการคืนสภาพ ซึ่งบริเวณนี้โลหะยังคงมีความแข็งแรง และความแข็งสูงแต่มีความเหนียวต่ำเนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการแปรรูปเย็น ต่อมาเมื่อโลหะได้รับความร้อนสูงขึ้นจนทำให้โลหะเกิดการก่อตัวของนิวเคลียส(nucleation) ทำให้เกิดการสูญเสียสภาพเดิม และการเจริญเติบโตของนิวเคลียสจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งโครงสร้างเม็ดเกรนเดิมถูกแทนที่ด้วยเม็ดเกรนที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกใหม่ทั้งหมด ดังแสดงในภาพ 2.8 และ 2.9 ซึ่งค่าความแข็งแรงของโลหะจะลดลง แต่ในทางกลับกันค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันถ้าหากยังคงให้โลหะได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องค่าความแข็งแรงจะลดลงเพียงเล็กน้อย ในส่วนของความเหนียวจะเพิ่มขึ้นจนสูงสุดหลังจากนั้นก็ลดลงต่ำลงมา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเช่นนี้มาสาเหตุมาจากการเติบโตขยายตัวของเม็ดเกรน บางครั้งการเติบโตขยายตัวของเม็ดเกรนจะเป็นไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนทำให้เกรนอื่นที่อยู่บริเวณใกล้เคียงไม่สามารถขยายตัวออกไปได้ โดยปกติการอบอ่อน พยายามที่จะหลีกเลี่ยงกระบวนการในช่วงนี้ เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เม็ดเกรนมีความไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโครงสร้างและทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเป็นขรุขระ ดังที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “ผิวส้ม (orange peel)” ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของการตกผลึกใหม่ และสถานะของการอบอ่อนมีดังต่อไปนี้

องค์ประกอบของโลหะ(composition)

ปริมาณการแปรรูปเย็น(amount of prior cold worked)

ขนาดของเกรน(grain size)

อุณหภูมิ(temperature)

เวลา(time)

ส่วนการตกผลึกใหม่ ของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงไม่อาจที่จะกล่าวถึงอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ได้เหมือนกับจุดหลอมเหลว

หลักการทั่วไปที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการการตกผลึกใหม่ จะเกิดขึ้นได้จำเป็นจะต้องมีปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนรูปอยู่น้อยสุด ถ้าการเปลี่ยนรูปของโลหะมีน้อยจำเป็นจะต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดตกผลึกใหม่มากขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสำหรับทำให้เกิดการตกผลึกใหม่สูงขึ้น จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ให้น้อยลง ขนาดของเม็ดเกรนสุดท้ายขึ้นอยู่กับปริมาณการแปรรูปที่ผ่านมาเป็นหลัก ถ้าปริมาณการแปรรูปเย็นที่ผ่านมายังมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนเพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่จะต่ำลงและขนาดของเม็ดเกรนที่ได้ในขั้นสุดท้ายจะเล็กลงด้วย ถ้าขนาดของเกรนเดิมยิ่งโตจำเป็นจะต้องใช้ปริมาณการแปรรูปมากขึ้น เพื่อทำให้อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการตกผลึกใหม่เท่ากับอุณหภูมิสำหรับทำให้เกิดการตกผลึกใหม่จะลดลงเมื่อใช้โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น แต่ถ้าเติมโลหะที่เป็นสารละลายของแข็งจะทำให้อุณหภูมิสำหรับทำให้เกิดการตกผลึกใหม่สูงขึ้นเสมอ

### 2.3 การแพร่ของอะตอมในของแข็ง

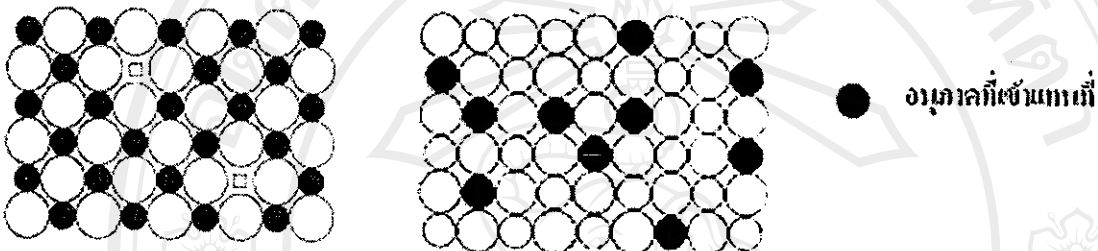
การแพร่(diffusion) เป็นกลไกการขนส่งหรือขนถ่ายอะตอมของสารชนิดหนึ่งผ่านเข้าไปในสารอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งการเคลื่อนที่ของอะตอมในสารที่มีสภาพเป็นก๊าซนั้น จะมีการเคลื่อนที่เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับในของเหลว และของแข็ง ส่วนการเคลื่อนที่ในของแข็งมักจะถูกจำกัด แต่อย่างไรก็ตามการสันเสทือนเนื่องจากความร้อนในของแข็งจะทำให้อะตอมสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ การแพร่ของอะตอมในโลหะมีความสำคัญอย่างมาก เพราะปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในสถานะของแข็ง จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอะตอมเกือบทั้งสิ้น เช่น การเกิดนิวคลีไอ และการเจริญเติบโตของเกรนใหม่ในขั้นตอนการเกิดผลึกใหม่ของโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เป็นต้น การแพร่กระจายของอะตอมในโครงสร้างผลึกมีกลไกหลักที่สำคัญ 2 แบบ คือ[13]

กลไกการแพร่แบบช่องว่างหรือแบบแทนที่(vacancy or substitution diffusion)

กลไกการแพร่แบบเซลล์แทรก(interstitial diffusion mechanisms)

### 2.3.1 กลไกการแพร่แบบช่องว่างหรือแบบแทนที่

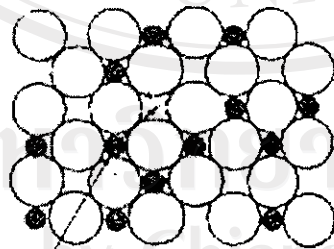
อะตอมจะสามารถเคลื่อนที่ในโครงผลึกจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ถ้าอะตอมนั้นมีพลังงานกระตุ้นอย่างเพียงพอ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากความร้อน และมีช่องว่าง หรือความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในโครงผลึกทำให้อะตอมสามารถเกิดการแพร่แบบกลไกการแทนที่ได้ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น และอะตอมมีพลังงานมากขึ้นทำให้อัตราเร็วในการแพร่ของอะตอมสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้อัตราเร็วในการแพร่มักขึ้นอยู่กับขนาดของอะตอม และพลังงานพันธะระหว่างอะตอมด้วย



ภาพ 2.10 แสดงการแพร่แบบช่องว่างหรือแบบแทนที่[14]

### 2.3.2 กลไกการแพร่แบบเซลล์แทรก

การแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นที่อะตอมมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งของซอกระหว่างอะตอมหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งของซอกระหว่างอะตอมที่อยู่ข้างเคียง กลไกการแพร่แบบนี้จะเป็นได้เมื่ออะตอมที่แพร่จะต้องเล็กกว่าอะตอมของผลึก



ภาพ 2.11 แสดงการแพร่แบบเซลล์แทรก[10]

## 2.4 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อแรงกด รอยขูดขีดหรือการเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างพันธะเคมีในวัสดุ การวัดความแข็งมี 2 ลักษณะคือ[2]

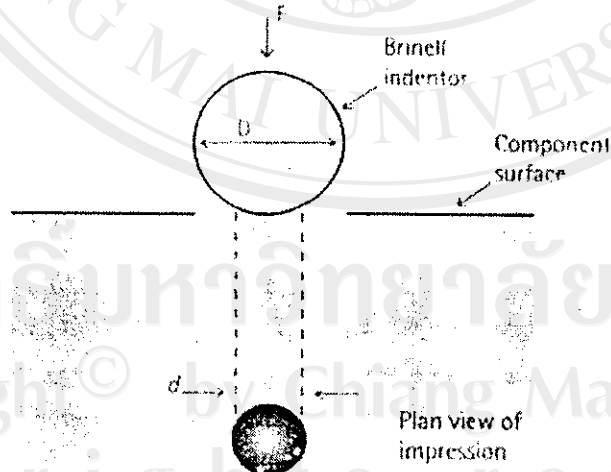
1. การวัดความแข็งระดับมหภาค (macrohardness)
2. การวัดความแข็งระดับจุลภาค (microhardness)

### 2.4.1 การวัดความแข็งระดับมหภาค

การวัดความแข็งระดับมหภาคเป็นการวัดความแข็งของวัสดุในบริเวณกว้างๆ และใช้น้ำหนักกดในระดับกิโลกรัม การวัดความแข็งแบบนี้จะใช้หัวกด 2 แบบ คือ บริเนลล์(brinell hardness test) และ ร็อกเวลล์(rockwell hardness test)

#### (1) การทดสอบความแข็งบริเนลล์

เป็นการทดสอบโดยใช้ลูกบอลที่ทำจากโลหะแข็งเช่น เหล็กกล้า หรือทังสเตนคาร์ไบด์กดลงบนผิวที่ราบเรียบ ลูกบอลที่ใช้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-10 มม. และมีน้ำหนักถ่วงเพื่อกดลูกบอลในช่วง 1-3000 กก. เวลาที่ใช้ในการกดลูกบอลบนผิววัสดุจะใช้เวลาประมาณ 10-15 วินาที เมื่อนำน้ำหนักถ่วงออก รอยลูกบอลที่ฝังจมลงไปจะปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุ ซึ่งสามารถวัดความแข็งได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยายต่ำที่มีสเกลบอก และคำนวณค่าความแข็งตามสมการ(1)



ภาพ 2.12 การทดสอบความแข็งบริเนลล์ และวัดรอยกดเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็ง[2]

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ F คือ น้ำหนักกดหรือแรงกด (กก.)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอล (มม.)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยกดบนผิววัสดุ (มม.)

ขนาด และน้ำหนักกดลูกบอลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดความแข็ง และความหนาของวัสดุ หากวัสดุเป็นวัสดุแข็งต้องมีความหนามากกว่า 7 เท่าของความลึกของรอยกด ถ้าเป็นวัสดุอ่อนจะต้องมีความหนามากกว่า 15 เท่าของความลึกของรอยกด

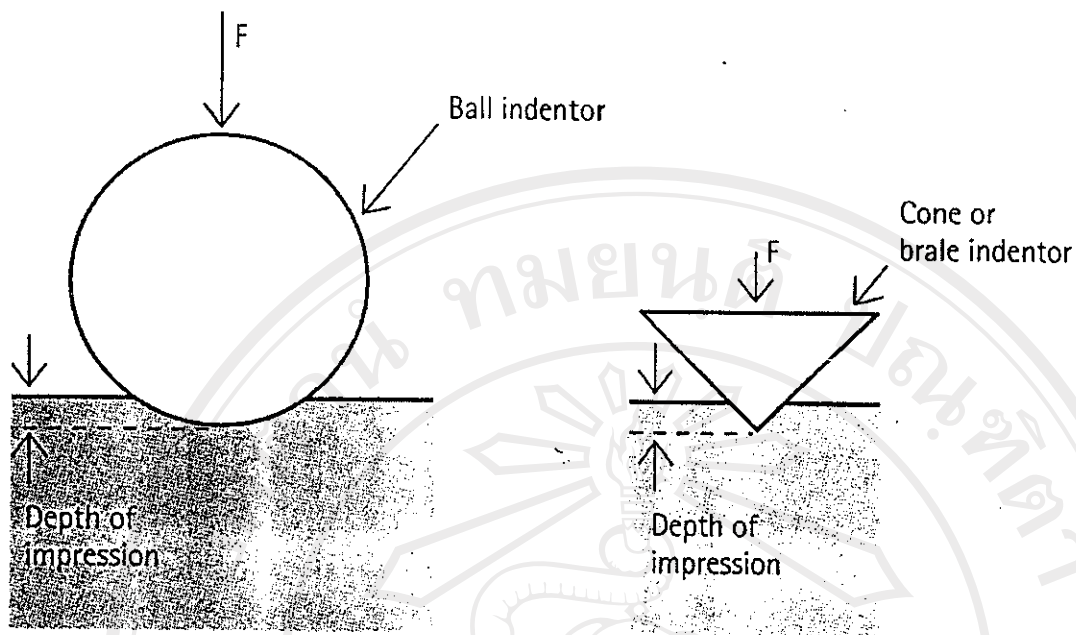
#### (2) การทดสอบความแข็งรีอคเวลล์

เป็นการทดสอบคล้ายแบบบริเนลล์ แต่การทดสอบแบบนี้จะใช้ลูกบอลหรือเพชรรูปกรวย การวัดรอยกดจะวัดที่ความลึกซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากหน้าปัดเครื่องวัด ซึ่งสะดวกกว่าแบบบริเนลล์ กรณีเป็นวัสดุอ่อนจะกดด้วยลูกบอล และหากเป็นวัสดุแข็งจะกดด้วยเพชร ลูกบอลที่ใช้กดจะมีขนาด 1.587 3.175 และ 6.350 มม. ขณะที่เพชรรูปกรวยที่ปลายกดมีมุม 120 องศา น้ำหนักกดที่ใช้มี 2 ช่วง คือ น้ำหนักกดรอง(minor load) และน้ำหนักกดหลัก(major load) การวัดด้วยวิธีรีอคเวลล์ จะมีด้วยกัน 9 สเกล แต่ที่นิยมใช้กันมากได้แก่

สเกล A ใช้หัวกดเพชรรูปกรวยน้ำหนักกด 60 กก. (ใช้น้ำหนักกดรอง 10 กก. และน้ำหนักกด หลัก 60 กก.) เหมาะกับวัสดุแข็ง และบาง ใช้สัญลักษณ์ HRA

สเกล B ใช้หัวกดลูกบอลน้ำหนักกด 100 กก. (น้ำหนักกดรอง 10 กก. และน้ำหนักกดหลัก 100 กก.) เหมาะกับวัสดุอ่อนแข็ง สัญลักษณ์ HRB

สเกล C ใช้หัวกดเพชรรูปกรวย น้ำหนักกด 150 กก. (น้ำหนักกดรอง 10 กก. น้ำหนัก กดหลัก 150 กก.) เหมาะกับเหล็กชุบผิวแข็ง เหล็กหล่อ ไทเทเนียม และวัสดุที่แข็งเกิน สัญลักษณ์ HRC



ภาพ 2.13 แสดงการทดสอบแบบรีดเวลล์[2]

สำหรับวัสดุที่บางหรือเป็นฟิล์มบางแข็ง จะใช้น้ำหนักทรง 3 กก และน้ำหนักหลักช่วง 15-45 กก. ในการหาค่าความแข็งรีดเวลล์สเกล C จะอ่านค่าจากหน้าปัดเครื่องทดสอบแล้วนำมาคำนวณตามสมการ(2)

$$HRC = \frac{k - (h_1 - h)}{C} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ หัวกดเพชรรูปกรวย =0.2 และหัวกดลูกบอล=0.26

$h_1$  คือ ความลึกของหัวกดหลังนำน้ำหนักกดหลักออก (มม.)

$h$  คือ ความลึกของหัวกดเมื่อได้รับน้ำหนักกดทรง (มม.)

$C$  คือ ค่าแบ่งช่วงสเกลบนหน้าปัด (0.002 มม.)

2.4.2 การวัดความแข็งระดับจุลภาค

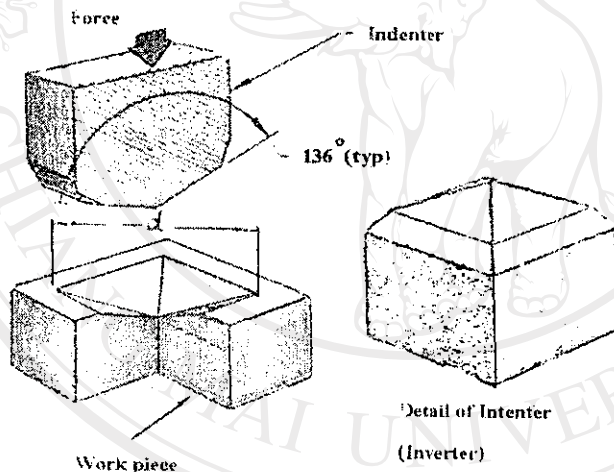
เป็นการวัดความแข็งของวัสดุในบริเวณเล็ก ๆ ระดับจุลภาคหรือระดับวิภาค และใช้น้ำหนักกดในระดับกรัม การวัดความแข็งระดับจุลภาคนี้จะมีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิคเกอร์(vicker hardness test) และนู๊ป(knoop hardness test)

(1) การทดสอบความแข็งวิกเกอร์(vicker hardness test)

ทดสอบโดยใช้หัวกดเพชรปลายเป็นรูปปิระมิด มุมยอด 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมกดลงบนผิววัสดุที่เรียบ โดยใช้น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 1-120 กก. ค่าวิกเกอร์แทนด้วยสัญลักษณ์ HV มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อพื้นที่รอยกด การหาค่าความแข็งจะวัดเส้นทแยงมุมรอยกดแล้วนำมาแทนค่าในสมการ(3)

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \text{ หรือ } 1.854 \frac{F}{d^2} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ  $F$  คือ น้ำหนักหรือแรงกด (กก.)  
 $d$  คือ ความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (มม.)



ภาพ 2.14 ลักษณะหัวกด และรอยกดความแข็งวิกเกอร์[15]

การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ รอยกดที่กดบนผิววัสดุอาจมีความไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นความคลาดเคลื่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยกดรูปรางเว้า(pincushion-shaped impressions) และรอยกดรูปรางบวมออก(barrel-shaped impressions) สาเหตุของรอยกดรูปรางเว้าเกิดจากการยุบตัวของวัสดุรอบพื้นที่ผิวที่ทำกรกด ซึ่งจะเกิดได้บ่อยกับโลหะที่อ่อนมาก หรือโลหะบอ่อน ผลก็คือค่าความแข็งที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าจริง เกิดจากการวัดเส้นทแยงมุมที่ยาวขึ้น และกรณีรอยกดรูปราง

บวมออก จะพบได้บ่อยในการวัดความแข็งของวัสดุขึ้นรูปเย็น สาเหตุเกิดจากผิววัสดุรอบๆ หัวกด เกิดการรบกวน ทำให้การวัดค่าเส้นทแยงมุมผิดพลาดได้ค่าความแข็งที่สูงเกินจริง

(2) การทดสอบความแข็งนूप(knoop hardness test)

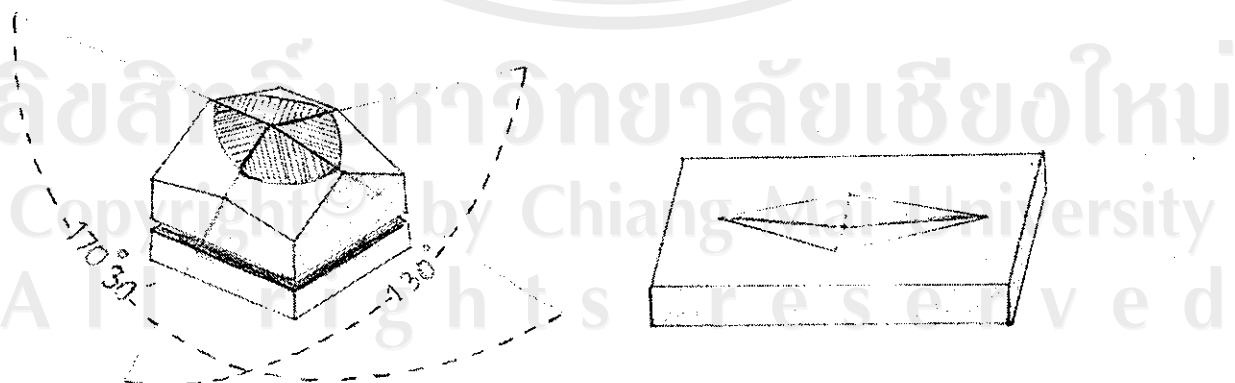
เป็นวิธีการทดสอบหาค่าความแข็งในวัสดุภาค หรือพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งทดสอบด้วยหัวกดเพชรทรงปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มีมุมยอดด้านกว้าง 130 องศา และมุมยอดด้านยาว 170 องศา 30 ลิปคา อัตราส่วนเส้นทแยงมุมด้านยาวต่อเส้นทแยงมุมด้านกว้างเท่ากับ 7.11 และเส้นทแยงมุมด้านยาวต่อความลึก เท่ากับ 4

การทดสอบความแข็งด้วยวิธีนี้จะต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบทางโลหะวิทยา ก่อน การหาตำแหน่งที่จะทำการกดบนวัสดุจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่มีกับเครื่องวัด และภายหลังจากการกด ในตำแหน่งที่ต้องการจะทำการวัดเส้นทแยงมุมด้านยาวเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็งนूपดังสมการ(4) โดยใช้สัญลักษณ์ HK

$$HK = \frac{14.2F}{l^2} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ  $F$  คือ น้ำหนักกดหรือแรงกด (กก.)  
 $l$  คือ ความยาวเส้นทแยงมุมด้านยาว (มม.)

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานต้องเตรียมให้ผิวที่จะวัดตั้งฉากกับหัวกด และผิวต้องเรียบ หากไม่เป็นเช่นนั้นจะทำให้หัวกด กดในมุมที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ได้ค่ามุมที่บิดเบือนส่งผลต่อค่าความแข็งที่ไม่เที่ยงตรง



ภาพ 2.15 แสดงลักษณะหัวกด และรอยกดแบบนूप[16]