

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปเย็น (Cold Work)

4.1.1 ความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness)

ผลของการขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งของโลหะทองคำผสม 18 กระรัต แสดงดังกราฟ ในรูปที่ 4.1 โดยแกนนอนเป็นเปอร์เซ็นต์การลดขนาด (% Reduction) ซึ่งคำนวณจากเปอร์เซ็นต์การลดความหนาตาม สมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดขนาด} = \frac{(\text{ความหนาเริ่มต้น} - \text{ความหนาสุดท้าย})}{\text{ความหนาเริ่มต้น}} \times 100$$

ส่วนแกนตั้ง เป็นความแข็งระดับจุลภาคของชิ้นงาน โดยความแข็งของชิ้นงาน 750Au – 050Cu – 200Ag และชิ้นงาน 750Au – 100Cu – 150Ag เป็นความแข็งที่วัดด้วยน้ำหนักกด (Load) 100 กรัม ส่วนชิ้นงาน 750Au – 150Cu – 100Ag และ 750Au – 200Cu – 050Ag วัดด้วยน้ำหนักกด 200 กรัม เพื่อให้ได้ระยะทะแยงมุมของรอยกด (d) มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความแข็งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการลดขนาด โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

◆ ชิ้นงาน 750Au – 050Cu – 200Ag

$$\text{ความแข็ง} = 88.02 + 1.2746 (\% \text{ การลดขนาด})$$

$$R^2 = 0.9936$$

◆ ชิ้นงาน 750Au – 100Cu – 150Ag

$$\text{ความแข็ง} = 148.26 + 1.1901 (\% \text{ การลดขนาด})$$

$$R^2 = 0.9761$$

◆ ชิ้นงาน 750Au – 150Cu – 100Ag

$$\text{ความแข็ง} = 163.78 + 1.2676 (\% \text{ การลดขนาด})$$

$$R^2 = 0.9951$$

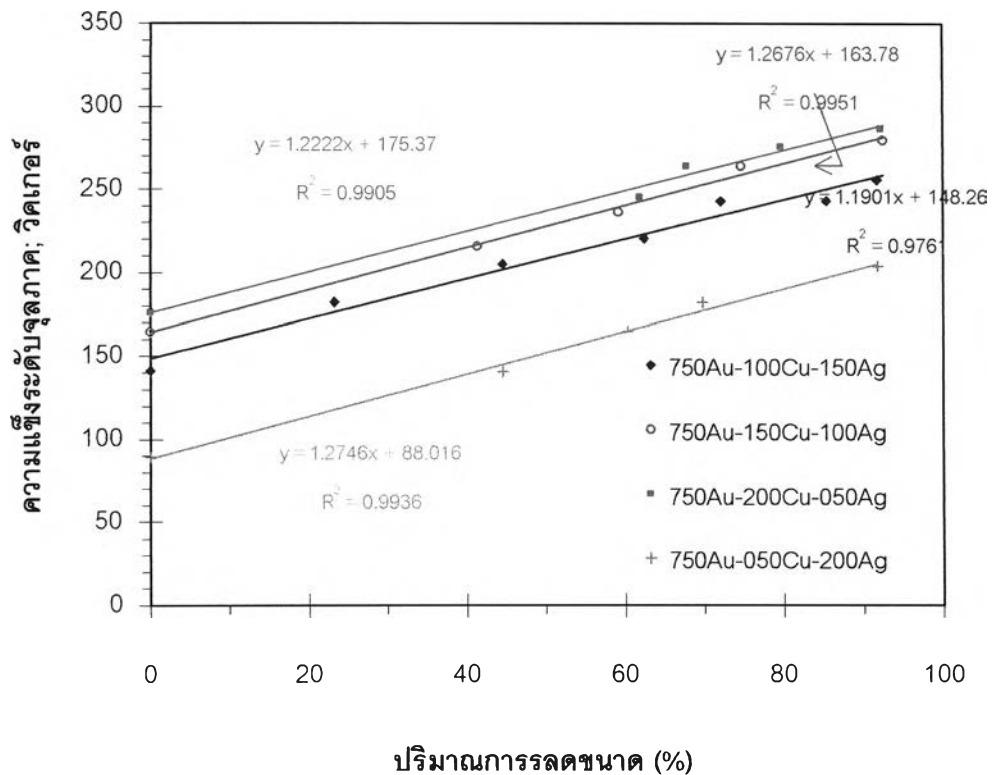
◆ ชิ้นงาน 750Au – 200Cu – 050Ag

$$\text{ความแข็ง} = 175.37 + 1.2222 (\% \text{ การลดขนาด})$$

$$R^2 = 0.9905$$

จากกราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและปริมาณการลดขนาดพบว่า ความแข็งเริ่มต้นของชิ้นงานก่อนการรีดลดขนาด (ปริมาณการลดขนาดเป็น 0 เปอร์เซ็นต์) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแดง คือ มีค่าเท่ากับ 88.02, 148.26, 163.78, และ 175.37 สำหรับชิ้นงาน 750Au – 050Cu – 200Ag, 750Au – 100Cu – 150Ag, 750Au – 150Cu – 100Ag และ 750Au – 200Cu – 050Ag ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า

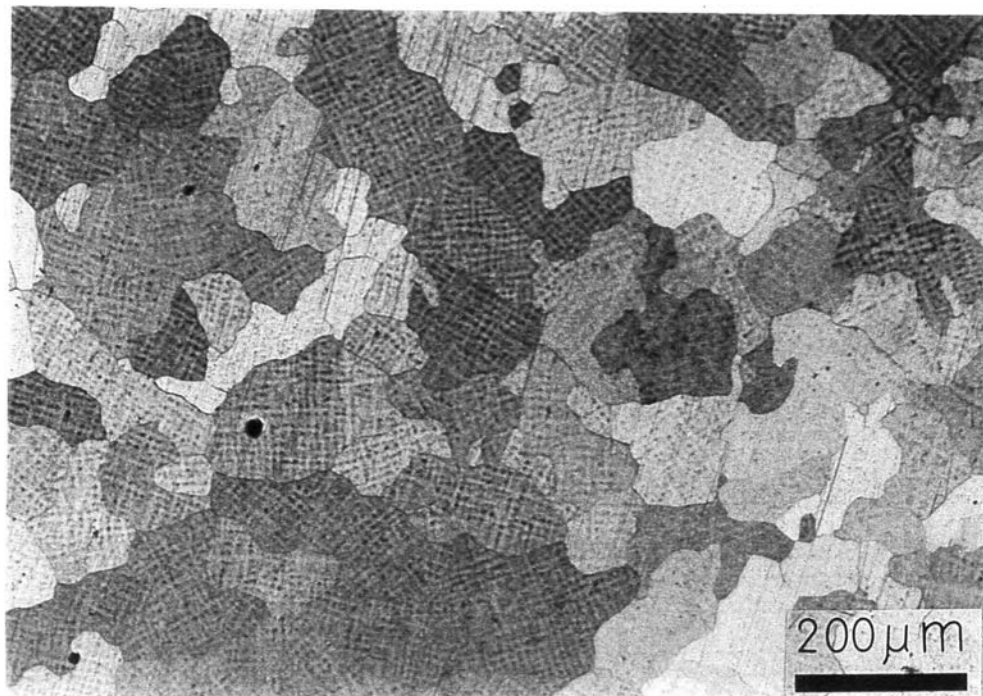
ความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าเท่ากับ 1.2746, 1.1901, 1.2676 และ 1.2222 สำหรับ ชี้นงาน 750Au - 050Cu - 200Ag, 750Au - 100Cu - 150Ag, 750Au - 150Cu - 100Ag และ 750Au - 200Cu - 050Ag ตามลำดับ ซึ่งเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าชี้นงานทั้ง 4 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของความแข็งตามเปอร์เซ็นต์การลดขนาด (Work hardening rate) ใกล้เคียงกัน



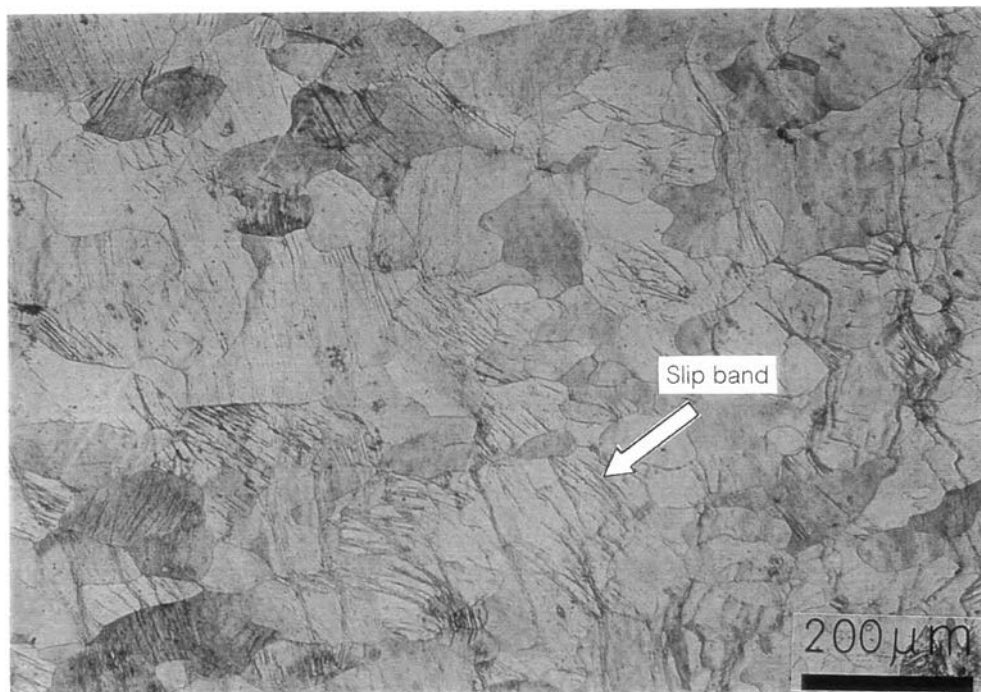
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของการลดขนาดโดยการขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งของชี้นงาน

4.1.2) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

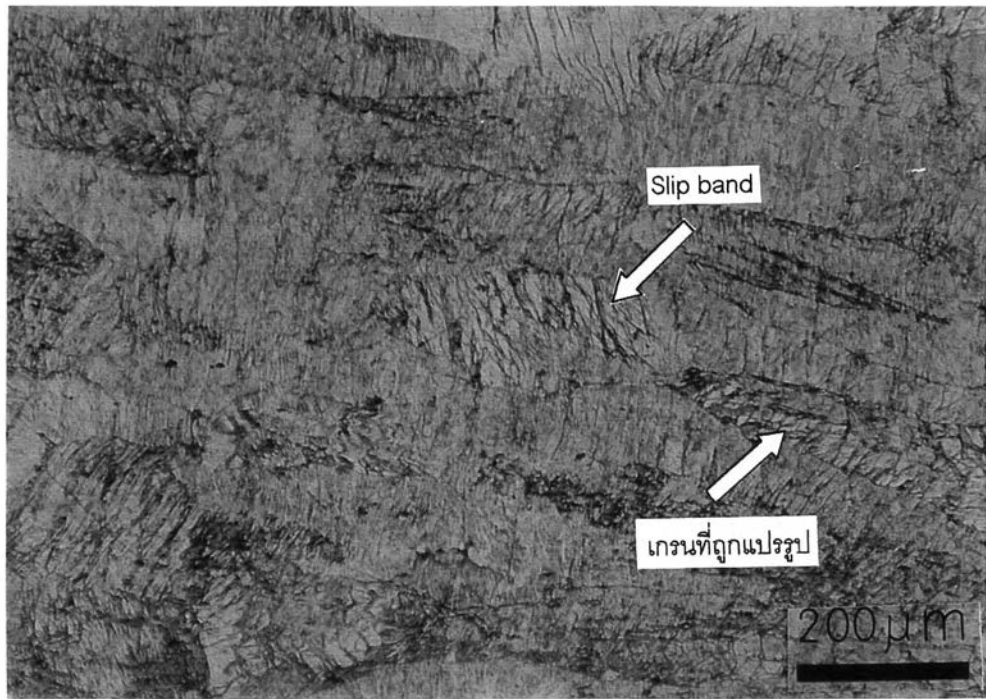
รูปที่ 4.2 ถึง 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชี้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังหล่อขึ้นรูปในแบบเหล็ก (As cast), และชี้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นด้วยการรีดลดขนาดเป็นแผ่นบาง โดยมีปริมาณการลดขนาด 44.55, 69.82, และ 91.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากรูปพบว่าชี้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมีโครงสร้างเป็นเกรนที่ถูกแปรรูป (Deformed grains) ยาวตามแนวการรีดซึ่งประกอบด้วยแถบการเคลื่อนตัว (Slip bands) ที่เกิดจากการแปรรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดเพิ่มขึ้น เกรนจะมีลักษณะยาว (Elongated) มากขึ้นและมีปริมาณของแถบการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น



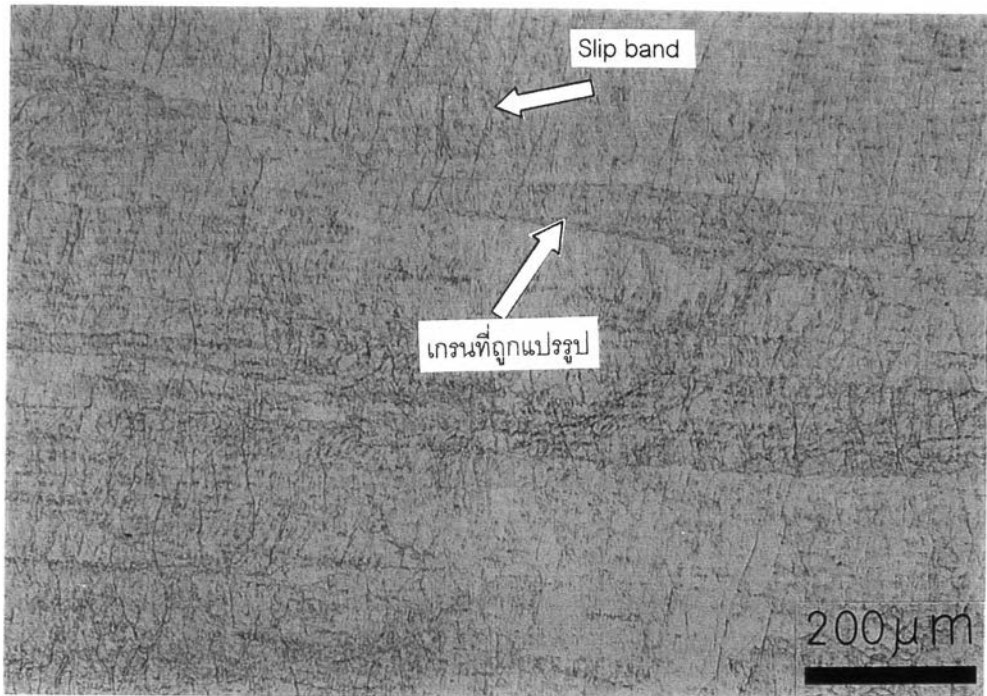
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหล้าหล่อ (As cast)



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหล้าขึ้นรูปเย็น 44.55 %



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น 69.82 %



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น 91.82 %

4.1.3) อภิปรายผลการทดลอง

กราฟในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการขึ้นรูปเย็นโดยการรีดลดขนาด การเพิ่มขึ้นของความแข็งดังกล่าวเกิดจาก "การเพิ่มความแข็งจากการขึ้นรูป" (Work Hardening) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.5

จากโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 พบว่าการขึ้นรูปเย็นทำให้ความหนาแน่นของแถบการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น ในแต่ละแถบการเคลื่อนตัวประกอบด้วยเส้นการเคลื่อนตัว (Slip line) จำนวนมาก ซึ่งในแต่ละเส้นการเคลื่อนตัวประกอบด้วยดิสโลเคชัน (Dislocation) จำนวนมาก การขึ้นรูปเย็นจึงเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของดิสโลเคชันในเนื้อวัสดุ เมื่อดิสโลเคชันมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงเกิดการตัดกัน (Intersection) ของดิสโลเคชันมากขึ้น การตัดกันของดิสโลเคชันดังกล่าวทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการแปรรูป (Deformation) มากขึ้น นั่นหมายถึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น

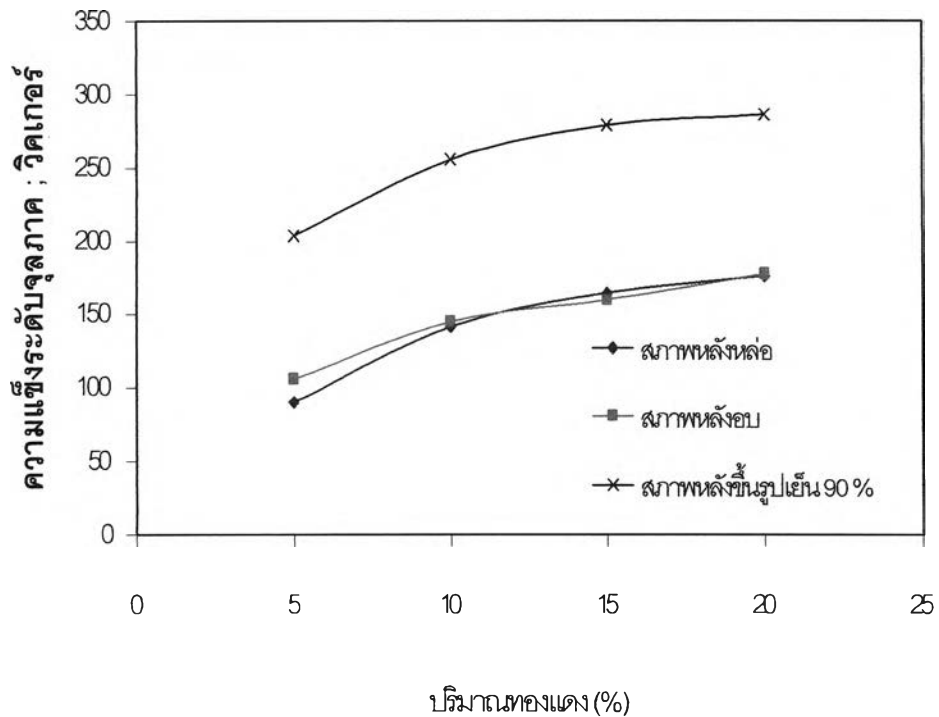
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solution treatment)

4.1.4) ความแข็งระดับจุลภาค

ความแข็งในสภาพหล่อ (As cast) หลังการลดขนาดประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 60 นาที ของชิ้นงานทั้ง 4 ส่วนผสม แสดงในตารางที่ 4.1 และจากข้อมูลในตารางนำไปสร้างกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการลดขนาดและความแข็งในสภาพต่างๆ ของชิ้นงานทองคำผสม

ชิ้นงาน	ปริมาณการลดขนาด (%)	ความแข็งในสภาพหล่อ (Hv)	ความแข็งในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น (Hv)	ความแข็งในสภาพหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว
750Au-050Cu-200Ag	91.82	89.28	203.7	105.3
750Au-100Cu-150Ag	91.70	141.22	255.57	143.3
750Au-150Cu-100Ag	92.53	164.25	279.17	159.2
750Au-200Cu-050Ag	92.20	175.6	286.13	178.1



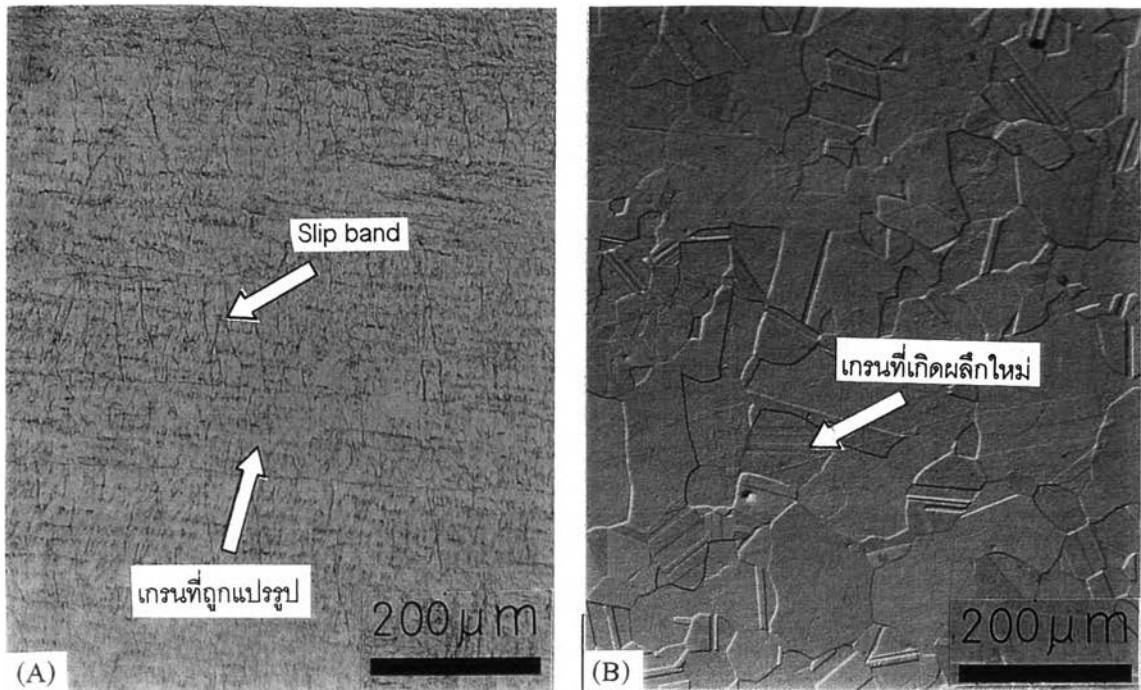
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงในสภาพหลังหลอม, หลังขึ้นรูปเย็น และหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ที่ปริมาณทองแดงต่าง ๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.6 พบว่า การขึ้นรูปเย็นด้วยการรีดลดขนาดประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสภาพหลังหลอมในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในทุกส่วนผสม คือประมาณ 110 วิคเกอร์ และเมื่อนำมาอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นลดลง โดยลดลงมาอยู่ที่ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับความแข็งแรงในสภาพหลังหลอม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณทองแดงสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงในสภาพหลังหลอม ความแข็งแรงในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น และความแข็งแรงในสภาพหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

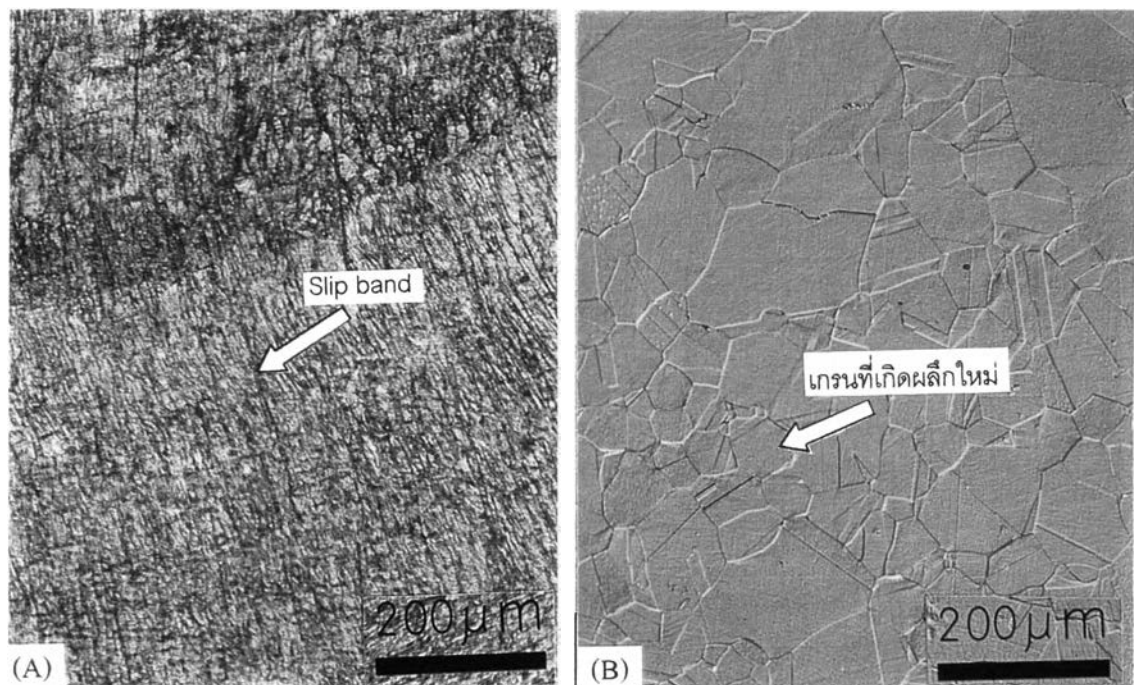
4.2.2) โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที ของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag, 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-150Ag ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7(A)–4.10(A) พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 4 ที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มีลักษณะเป็นเกรนที่ถูกแปรรูป (Deformed grain) ซึ่งมีลักษณะยาวไปตามแนวการรีด และประกอบด้วยแถบการเคลื่อนตัว (Slip band) จำนวนมาก

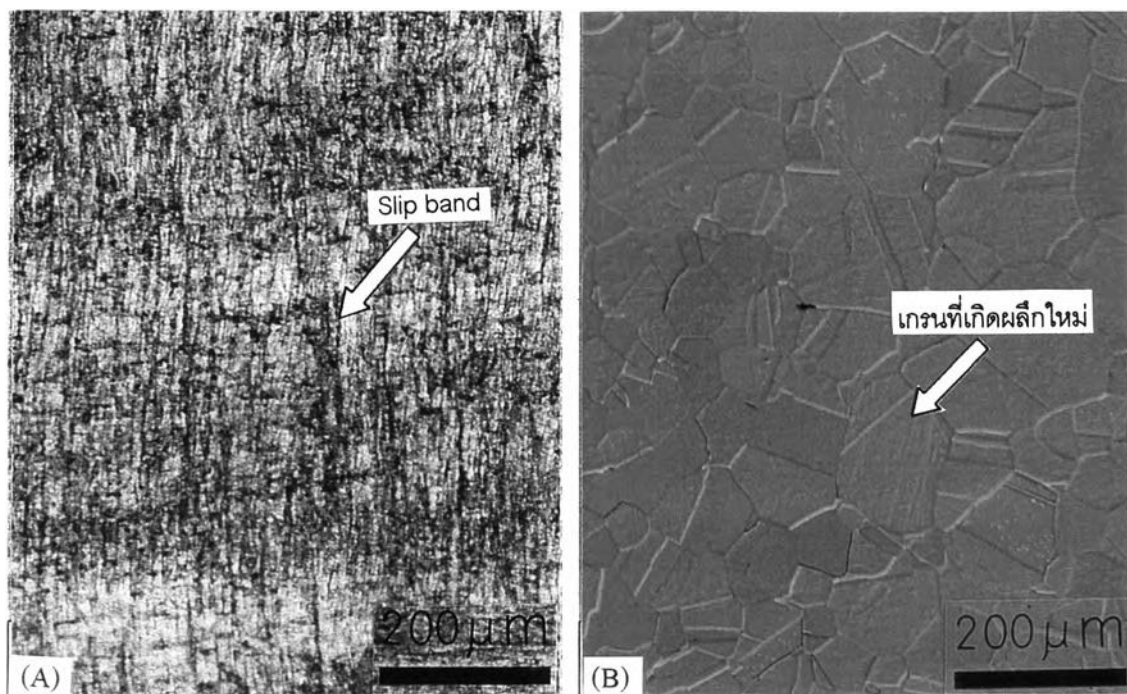
หลังจากอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลานาน 60 นาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ส่วนผสม เปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย “เกรนที่เกิดผลึกใหม่” (Recrystallized Grain) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว (Single-phase solid solution) ดังรูปที่ 4.7(B) – 4.10(B)



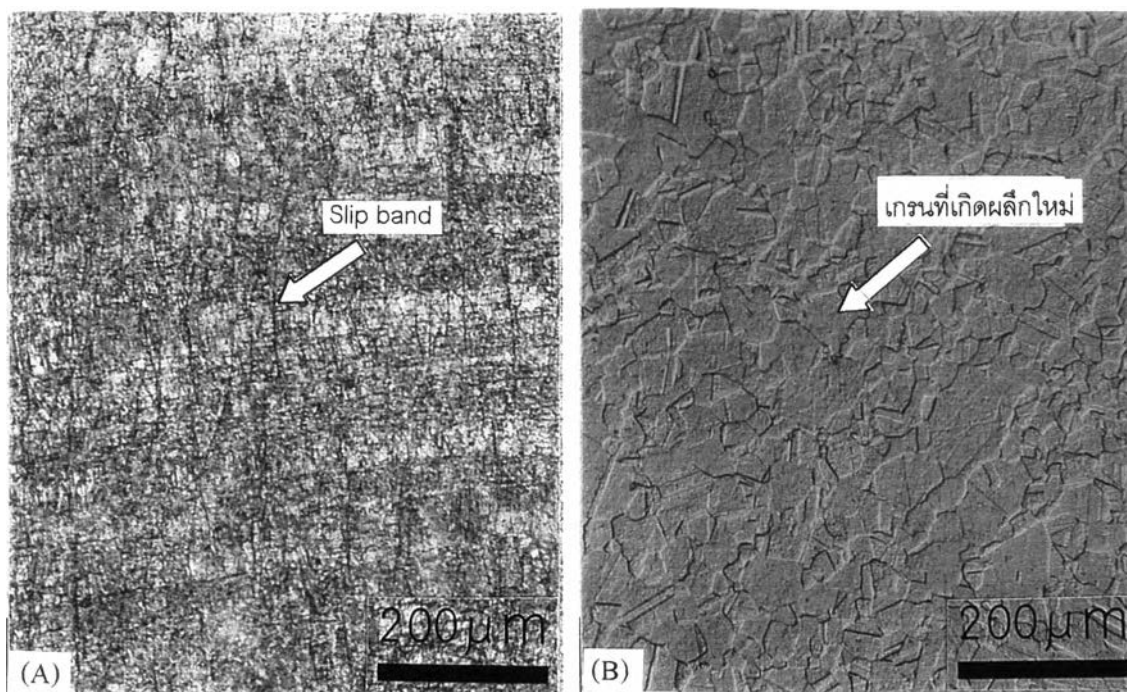
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 91.82 เปอร์เซ็นต์ ; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 91.70 เปอร์เซ็นต์ ; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 92.53 เปอร์เซ็นต์ ; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 92.0 เปอร์เซ็นต์ ; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที

4.2.3) ผลการวิเคราะห์ชนิดของโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD

รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-rays Diffractometer ของชิ้นงานในสภาพหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวทั้ง 4 ส่วนผสม เมื่อพิจารณารูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทั้ง 4 ส่วนผสม พบว่าเกิดการกระเจิงเฉพาะ “การกระเจิงพื้นฐาน” (Fundamental) เท่านั้น คือการกระเจิงของระนาบ (111), (200) และ (220) ที่มีมุม 2θ ประมาณ 39° , 45° และ 66° ตามลำดับ ซึ่งเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างจุลภาคหลังอบของชิ้นงานทั้ง 4 เป็น “โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ” (Disordered structure) ^{(3),(16)}

การกระเจิงพื้นฐานของชิ้นงาน เกิดขึ้นที่มุม 2θ ต่างกันเล็กน้อย ขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี โดยพบว่ามีปริมาณทองแดงมากขึ้น รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์มีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวา นั่นคือมุมที่เกิดการกระเจิงพื้นฐานมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงมุมที่เกิดการกระเจิงพื้นฐานในระนาบต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว

ชิ้นงาน	มุม 2θ ที่เกิดการกระเจิงพื้นฐาน			
	ระนาบ (111)	ระนาบ (200)	ระนาบ (220)	ระนาบ (311)
750Au-050Cu-200Ag	38.61	44.85	65.36	78.67
750Au-100Cu-150Ag	38.96	45.35	66.14	79.68
750Au-150Cu-100Ag	39.45	45.84	66.87	N/A*
750Au-200Cu-050Ag	39.62	46.22	67.41	N/A*
Au-Cu (50 atom %Cu) ⁽¹⁸⁾	40.53	45.83	66.82	81.15

หมายเหตุ * ไม่พบการกระเจิงในช่วงมุม 2θ ที่ใช้วิเคราะห์ ($0-80^\circ$)

4.2.4) อภิปรายผลการทดลอง

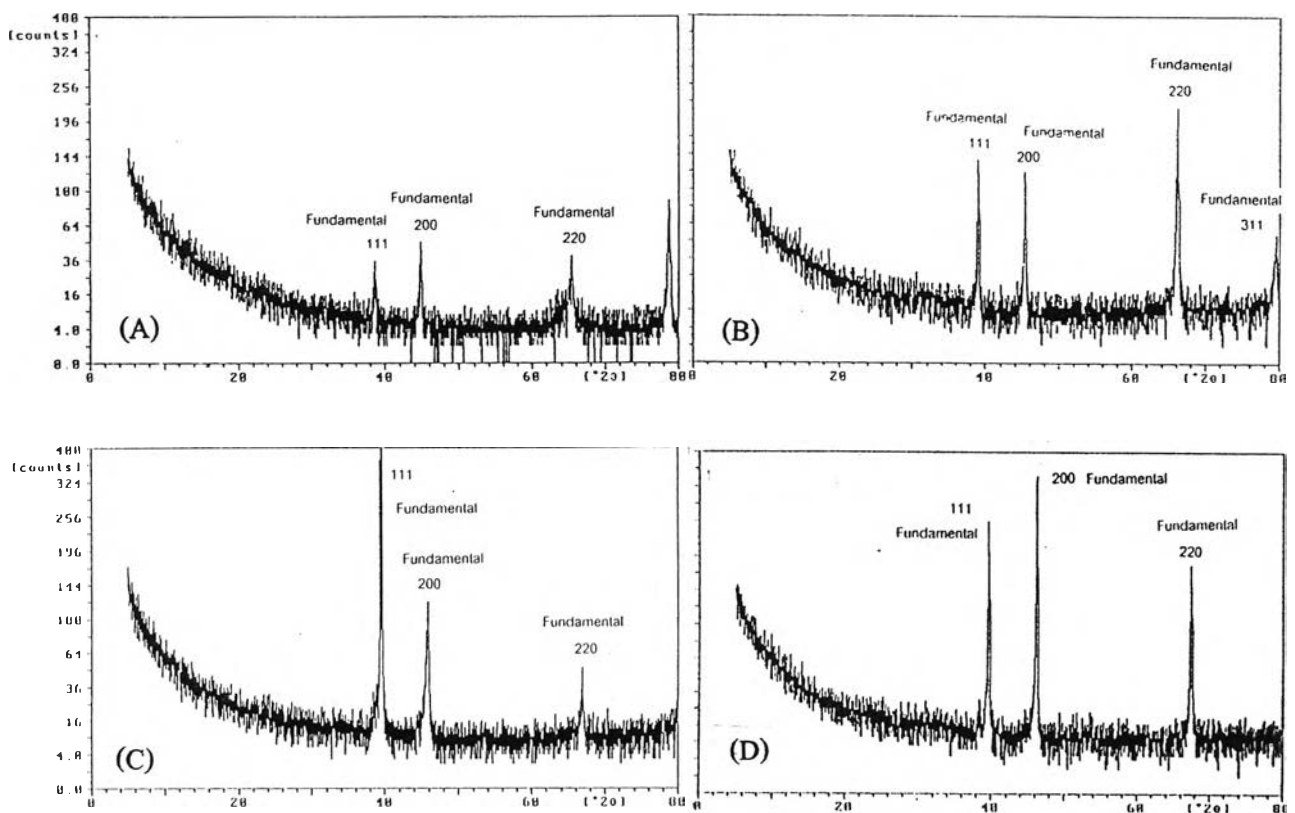
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นพบว่า โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเกรนที่ถูกแปรรูป (Deformed grain) ยาวตามแนวการรีดลดขนาด โครงสร้างดังกล่าวมีความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation density) สูง จึงทำให้ความแข็งแรงสูงกว่าความแข็งแรงในสภาพหลังหล่อ ⁽¹⁶⁾

เมื่อนำชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็นไปผ่านกระบวนการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว พบว่าเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างที่เกิดผลึกใหม่ (Recrystallized grain) (รูปที่ 4.7 ถึง 4.10) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว (Single phase solid solution) และจากรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (รูปที่ 4.11) พบว่าเกิดการกระเจิงเฉพาะการกระเจิงพื้นฐานเท่านั้น ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างที่ได้หลังจากทำการอบ เป็นโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ (Disordered structure) ^{(3),(16)}

การอบขึ้นงานที่อุณหภูมิ 800 °C ทำให้โครงสร้างในสภาพหลังรีดลดขนาด ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง เกิด “การเกิดผลึกใหม่” (Recrystallization) ได้โครงสร้างที่เกิดผลึกใหม่ (Recrystallized structure) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของขึ้นงานลดลง^{(8),(16),(17)}

จากแผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะทองคำผสม 18 อะตอม พบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C โลหะทองคำผสมจะมีโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ เมื่อทำให้ขึ้นงานเย็นตัวลงโดยเร็ว (Quenching) จากอุณหภูมิดังกล่าว โดยการจุ่มในน้ำผสมน้ำแข็งทำให้ไม่มีเวลาพอที่จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของขึ้นงาน จึงทำให้ขึ้นงานที่ได้ยังคงมีโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบที่อุณหภูมิห้อง

ความแข็งแรงของขึ้นงานหลังอบ มีความสัมพันธ์กับปริมาณทองแดงในโลหะผสม กล่าวคือ ความแข็งแรงค่าเพิ่มขึ้นเมื่อโลหะทองคำผสมมีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงในโลหะผสมนี้ เกิดจาก “การเพิ่มขึ้นความแข็งแรงจากสารละลายของแข็ง” (Solid solution hardening)



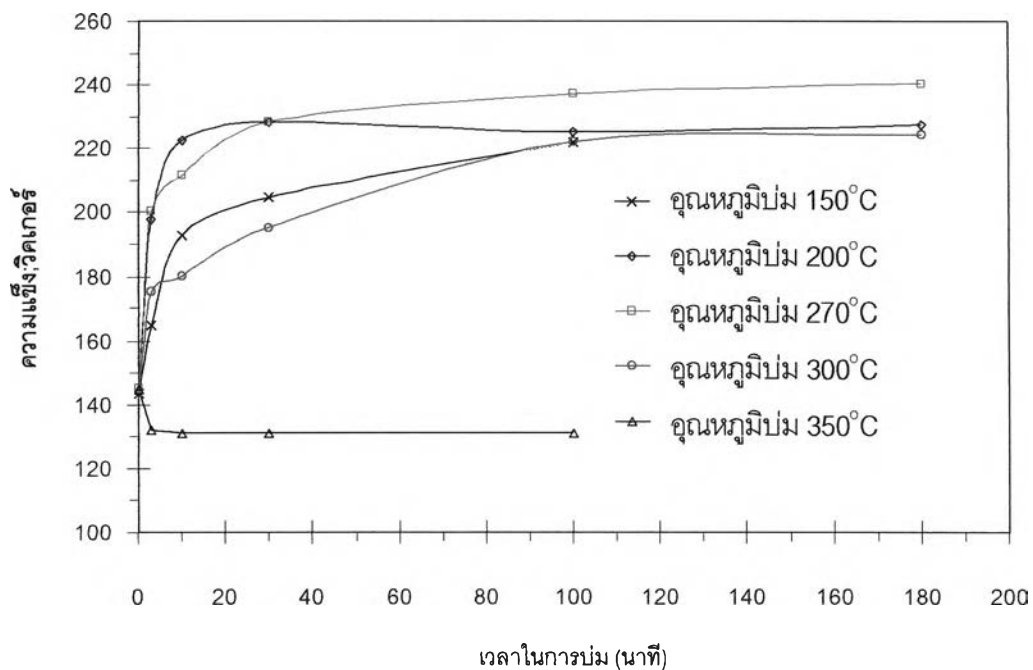
รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของขึ้นงานที่ผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว;

- (A) ขึ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag; (B) ขึ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag;
 (C) ขึ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag; (D) ขึ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมทองคำ

4.3.1) ความแข็งแรงระดับจุลภาค

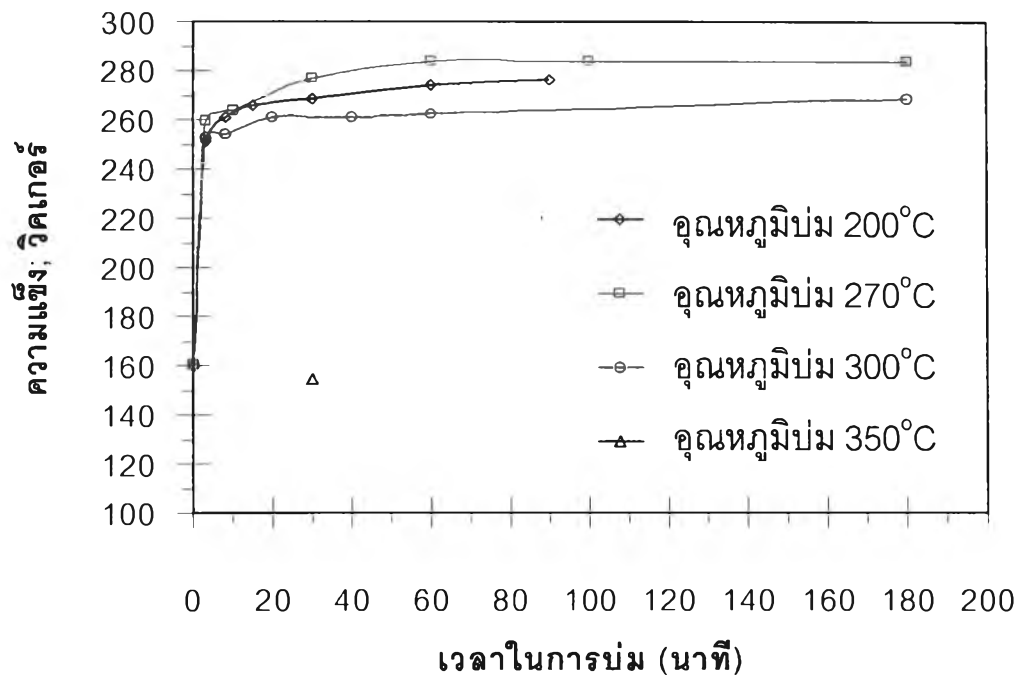
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag จากกราฟ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความแข็งแรงของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 , 200 , 270 , และ 300 °C มีค่าเพิ่มขึ้นจาก ความแข็งแรงในสภาพหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (เพื่อความกระชับจะใช้คำว่า "หลังอบ" แทนคำว่า "หลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว") ซึ่งมีค่า 145 วิกเกอร์ โดยการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 และ 270 °C จะมีการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงรวดเร็วกว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 และ 300 °C การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และ ค่อย ๆ ช้าลงในช่วงหลัง และมีค่าเกือบคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 100 นาที เมื่อพิจารณาความแข็งแรงที่เวลา 100 นาที ซึ่งเป็นจุดที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่แล้ว พบว่า การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270 °C ให้ความแข็งแรงสูงสุด คือ 237 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 92 วิกเกอร์ ในขณะที่ความแข็งแรงที่ได้จากการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 , 200 และ 300 มีค่าประมาณ 220 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบประมาณ 75 วิกเกอร์



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag

กรณีการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350 °C ให้ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบเล็กน้อย การลดลงของความแข็งแรงเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่หลังจากเวลาผ่านไปเพียง 3 นาที ซึ่งมีค่า 130 วิกเกอร์ ลดลงจากสภาพหลังอบ 15 วิกเกอร์

จากรูปที่ 4.13 แสดงกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-200Ag พบว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 200 , 270 , และ 300 °C ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบซึ่งมีค่า 160 วิกเกอร์ อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อย ๆ ช้าลงจนเกือบคงที่ หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270 °C มีความแข็งแรงสูงสุด โดยความแข็งแรงที่เวลา 60 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่ มีค่า 283 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 123 วิกเกอร์ ในขณะที่การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 และ 300 °C มีค่าความแข็งแรง 274 วิกเกอร์ และ 262 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 114 วิกเกอร์ และ 102 วิกเกอร์ ตามลำดับ



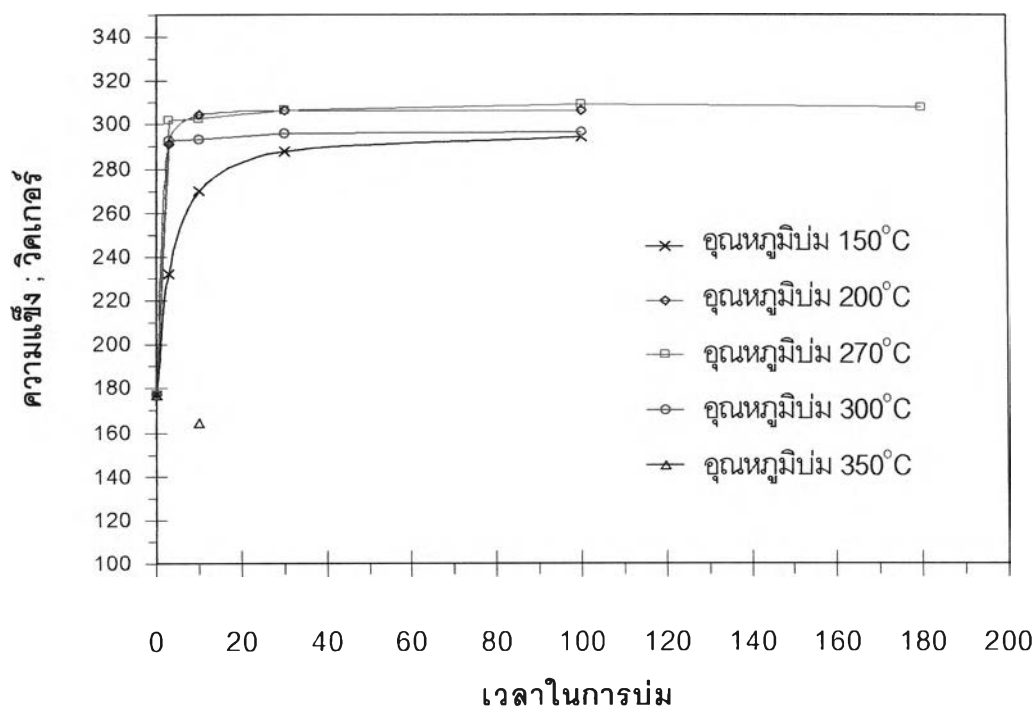
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-200Ag

เมื่อเปรียบเทียบกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag กับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag จะเห็นว่า ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag มีค่าสูงกว่า ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag เช่นที่อุณหภูมิ 270 °C หลังจากความแข็งแรงเริ่มคงที่ ชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 123 วิกเกอร์ ในขณะที่ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสภาพหลังอบประมาณ 92 วิกเกอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ดังจะเห็นได้จากเวลาในการบ่มที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 นาที และ 60 นาที สำหรับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag และชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ตามลำดับ

การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350 °C ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ทำให้ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ เช่นเดียวกับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag โดยมีความแข็งแรงที่เวลา 30 นาที ประมาณ 154 วิกเกอร์ ลดลงจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบประมาณ 6 วิกเกอร์

รูปที่ 4.14 แสดงกราฟการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag จากกราฟ จะเห็นได้ว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 , 200 , 270 , และ 300 °C มีค่าเพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบซึ่งมีค่า 177 วิกเกอร์ การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของชิ้นงานที่บ่มที่ 200, 270, และ 300 °C เป็นไปอย่างรวดเร็วมากในช่วง 3 นาทีแรก และช้าลงจนมีค่าคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที ส่วนชิ้นงานที่บ่มที่ 150 °C จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C และ 270 °C ได้ความแข็งแรงใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงที่สุด โดยมีความแข็งแรงที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่ 306 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 129 วิกเกอร์ ในขณะที่การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 และ 300 °C มีค่าความแข็งแรง 287 วิกเกอร์ และ 296 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 110 วิกเกอร์ และ 119 วิกเกอร์ ตามลำดับ

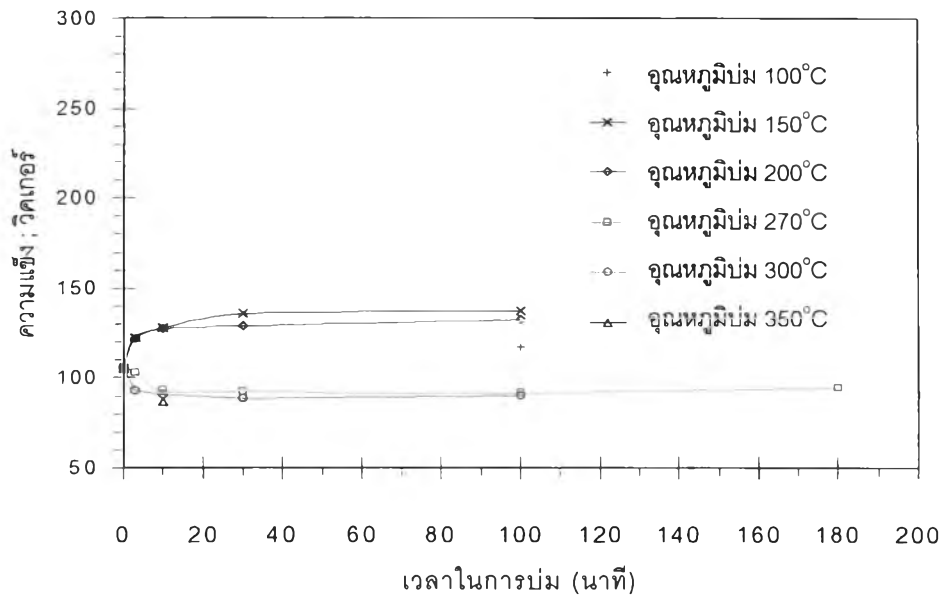
เมื่อเปรียบเทียบกราฟการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag กับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag และ 750Au-150Cu-100Ag จะเห็นว่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag มีค่าสูงกว่า ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag และ 750Au-150Cu-100Ag เช่นที่อุณหภูมิ 270 °C หลังจากความแข็งแรงเริ่มคงที่ ชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสภาพหลังอบ 129 วิกเกอร์ ในขณะที่ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสภาพหลังอบประมาณ 92 วิกเกอร์ และ ชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงในสภาพหลังอบ 123 วิกเกอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag และ 750Au-150Cu-100Ag ดังจะเห็นได้จากเวลาในการบ่มที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 60 และ 30 นาทีสำหรับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag

การบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งลดลงจากความแข็งในสภาพหลังอบเล็กน้อย โดยที่เวลา 10 นาที ชิ้นงานมีความแข็ง 164 วิคเกอร์ ลดลงจากความแข็งในสภาพหลังอบ 13 วิคเกอร์

ผลการบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.15 ชิ้นงานที่ผ่านการอบมีความแข็ง 105 วิคเกอร์ หลังจากการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 270, 300 และ 350 °C ชิ้นงานมีความแข็งลดลงจากสภาพหลังอบอย่างรวดเร็ว โดยมีความแข็งคงที่หลังจากบ่มเป็นเวลา 10 นาที ความแข็งของชิ้นงานที่ได้หลังจากบ่มเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 270, 300 และ 350 °C มีค่า 93, 90 และ 87 วิคเกอร์ ลดลงจากความแข็งในสภาพหลังอบ 12, 15 และ 18 วิคเกอร์ตามลำดับ ส่วนการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 100, 150 และ 200 °C ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแข็งที่เวลา 100 นาทีมีค่า 116, 137 และ 132 วิคเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งในสภาพหลังอบ 11, 32 และ 27 วิคเกอร์ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag

ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag มีค่าต่ำกว่าชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag , 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag นอกจากนั้นยังพบว่า อุณหภูมิที่ทำให้ความแข็งสูงสุดคือ 150 °C ต่างจากชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag , 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่ได้ความแข็งสูงสุดที่อุณหภูมิ 270 °C หลังจากความแข็งเริ่มคงที่ ชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag มีความแข็งสูงสุด (ที่อุณหภูมิ 150 °C) 137 วิคเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งในสภาพหลังอบ 32 วิคเกอร์ ในขณะที่ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag , 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag มีความแข็งสูงสุด (ที่อุณหภูมิ 270 °C) 237, 283, และ 306 วิคเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งในสภาพหลังอบ 92, 123, และ 129 วิคเกอร์ ตามลำดับ การอภิปรายผลการทดลองอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.4

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดของโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD

ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ด้วยเครื่อง XRD ได้รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction patter) ดังรูปที่ 4.16 ชิ้นงานในสภาพหลังอบ จะเกิดการกระเจิงเฉพาะการกระเจิงพื้นฐาน (Fundamental diffraction) ที่มุม 2θ ประมาณ 39° , 45° , 66° , และ 79° เท่านั้น ซึ่งเป็นการกระเจิงของระนาบ (111), (200), (220), และ (311) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (A) การที่เกิดการกระเจิงเฉพาะการกระเจิงพื้นฐาน บ่งบอกว่าชิ้นงานมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered structure) ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270°C ตั้งแต่ 100 นาที (รูปที่ 4.16 (D)) จะเริ่มเห็นการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Supperlattice diffraction) ที่มุม 2θ ประมาณ 32° และ 52° เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการกระเจิงอ้างอิง (Reference pattern) พบว่าโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นเป็นโครงสร้างที่ชนิด AuCu I และการกระเจิงที่ มุม 2θ ประมาณ 32° และ 52° ดังกล่าว เป็นการกระเจิงของระนาบ (110) และ (201) ตามลำดับ (ดูภาคผนวก ค.) เมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 100 นาที เป็น 180 นาที ระดับความเป็นระเบียบ (Degree of ordered) ก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน สังเกตจากลักษณะของรูปแบบการกระเจิงซึ่งมีการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีความคม (Sharp) ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.16 (E)

รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการกระเจิงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงเป็นเวลา 100 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 4.17 (A) พบว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 150°C จะสังเกตเห็นการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มุมประมาณ 32° ซึ่งเป็นการกระเจิงของระนาบ (110) แต่ยังไม่เด่นชัดนัก นั่นคือระดับความเป็นระเบียบยังคงต่ำอยู่ เมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นเป็น 200°C , 270°C และ 300°C ระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ สังเกตได้จากการกระเจิงของระนาบ (110) ที่มุมประมาณ 32° ซึ่งเป็นการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I มีความคมเด่นชัดมากขึ้น ดังรูปที่ 4.17 (B), 4.17 (C) และ 4.17 (D) ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 300°C ซึ่งได้รูปแบบการกระเจิงดังรูปที่ 4.17 (D) จะเริ่มเห็นการกระเจิงของระนาบ (001) ที่มุมประมาณ 24° ซึ่งเป็นการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ด้วย ส่วนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350°C ทำให้ได้โครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเห็นได้จากรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มีเฉพาะการกระเจิงพื้นฐาน ในลักษณะเดียวกับชิ้นงานในสภาพหลังอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (E)

รูปแบบการกระเจิงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรง 270°C เป็นเวลาต่างๆ กัน แสดงดังในรูปที่ 4.18 ชิ้นงานในสภาพหลังอบเป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ ที่เกิดการกระเจิงเฉพาะการกระเจิงพื้นฐานที่มุมประมาณ 39° , 45° และ 67° เท่านั้น

รูปที่ 4.18 (B) ถึง 4.18 (E) แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270°C นาน 3, 30, 60 และ 100 นาที ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรง นอกจากจะทำให้เกิดการกระเจิงพื้นฐานที่มุมประมาณ 39° , 45° และ 67° แล้วยังพบการกระเจิงของระนาบ (001) และ (110) ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ที่มุมประมาณ 24° และ 32° ด้วย ที่เวลาในการบ่มน้อยๆ (3 และ 30 นาที) ทั้งการกระเจิงพื้นฐานและการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบมีฐานที่กว้างไม่คม แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบในปริมาณน้อย จึงเกิดการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีฐานกว้าง⁽¹⁶⁾ และมีบางส่วนเชื่อมอยู่กับการกระเจิงพื้นฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อ

เวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น (60 และ 100 นาที) การกระเจิงดังกล่าวมีฐานแคบลงและมีความคมมากขึ้น จนในที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 100 นาที ที่มุม 2θ ประมาณ 52° และ 60° เกิดการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I เล็กๆ ขึ้น จากความจริงดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่อุณหภูมิ 270°C ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I โดยระดับความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้นตามเวลา

ถ้าเปรียบเทียบกับ การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270°C ของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag จะเห็นว่า ชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag จะมีการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบได้รวดเร็วกว่าชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag สังเกตจากรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงานทั้งสอง ชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag จะพบการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากเวลาผ่านไปเพียง 3 นาที ในขณะที่ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag จะพบการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากเวลาผ่านไป 100 นาที

การบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้รูปแบบการกระเจิงดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยชิ้นงานที่บ่มที่อุณหภูมิ 200°C บ่มนาน 90 นาที, ชิ้นงานที่บ่มที่อุณหภูมิ 270°C และ 300°C บ่มนาน 60 นาที ส่วนชิ้นงานที่บ่มที่ 350°C บ่มนาน 30 นาที จากรูปพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจาก 200°C เป็น 270°C และ 300°C ตามลำดับ ทำให้ระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างเพิ่มขึ้น (ถึงแม้ว่าการบ่มที่ 200°C จะบ่มนานกว่าการบ่มที่ 270°C และ 370°C ก็ตาม) เห็นได้จากการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มุม 2θ ประมาณ 24° และ 32° ซึ่งเป็นการกระเจิงของระนาบ (001) และ (110) ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I โดยพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น การกระเจิงดังกล่าวก็ยิ่งมีความคมเด่นชัดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มเป็น 350°C ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ดังจะเห็นได้จากรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.19 (D) ซึ่งพบเฉพาะการกระเจิงพื้นฐานที่มุม 2θ ประมาณ 39° , 46° และ 67° เช่นเดียวกับชิ้นงานในสภาพหลอม

รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 270°C เป็นเวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหลอม แสดงในรูปที่ 4.20 จากรูปพบว่ารูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงานในสภาพหลอมแสดงเฉพาะการกระเจิงพื้นฐานเท่านั้น ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าชิ้นงานในสภาพหลอมมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ

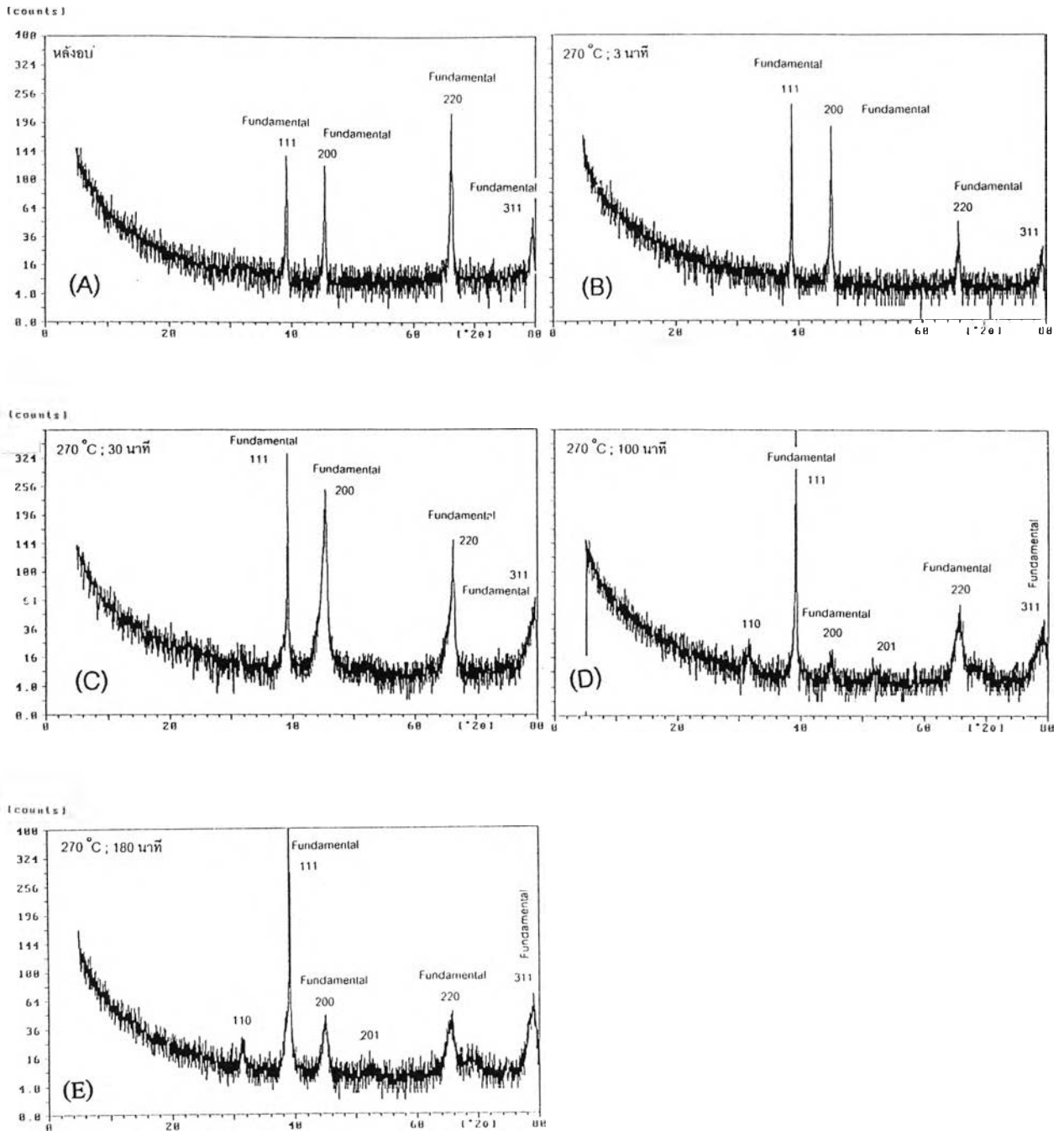
หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 270°C พบว่านอกจากการกระเจิงพื้นฐานแล้วยังปรากฏการกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มุม 2θ ประมาณ 24° , 32° , 52° และ 60° ซึ่งเป็นการกระเจิงของระนาบ (001), (100), (201) และ (112) ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ตามลำดับ (ดูภาคผนวก ค.) การกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเวลาผ่านไปเพียง 3 นาที เมื่อเวลามากขึ้นการกระเจิงมีความคมมากขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงเวลา 100 นาที ส่วนที่เลา 180 นาที การกระเจิงมีความคมใกล้เคียงกับที่ 100 นาที ความจริงดังกล่าวเป็นสิ่งบ่งชี้ว่า การเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาผ่านไปแค่ 3 นาที แต่หลังจากนั้นระดับความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้นช้าๆ และคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 100 นาที

รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 100 นาที ยกเว้นที่อุณหภูมิ 350°C ที่ใช้เวลาบ่มเพียง 10 นาที แต่เป็นเวลาที่ความแข็งแรงเริ่มคงที่แล้ว จากรูปพบว่า โครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้น เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I (ดูภาคผนวก

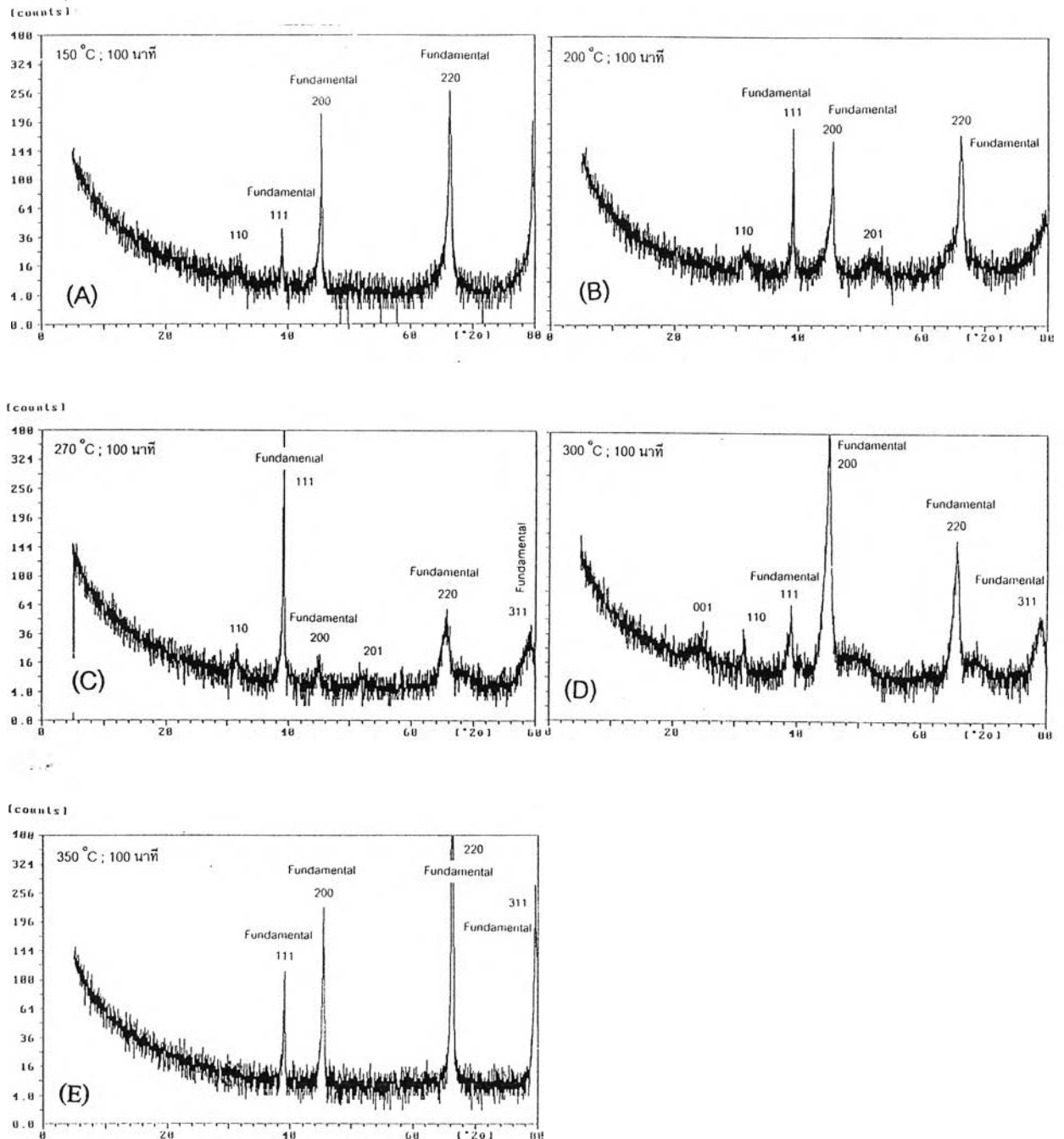
ค.) โดยระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 150°C ถึง 300°C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 350°C โครงสร้างที่ได้กลับเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เช่นเดียวกับโครงสร้างในสภาพหลอม

รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน $750\text{Au}-050\text{Cu}-100\text{Ag}$ ในสภาพหลอม ที่อุณหภูมิ 150°C และ 200°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิมที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.22 จากรูปที่ 4.22 (A) แสดงว่าชิ้นงานในสภาพหลอมมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกับชิ้นงานส่วนผสมอื่นๆ ในสภาพหลอม

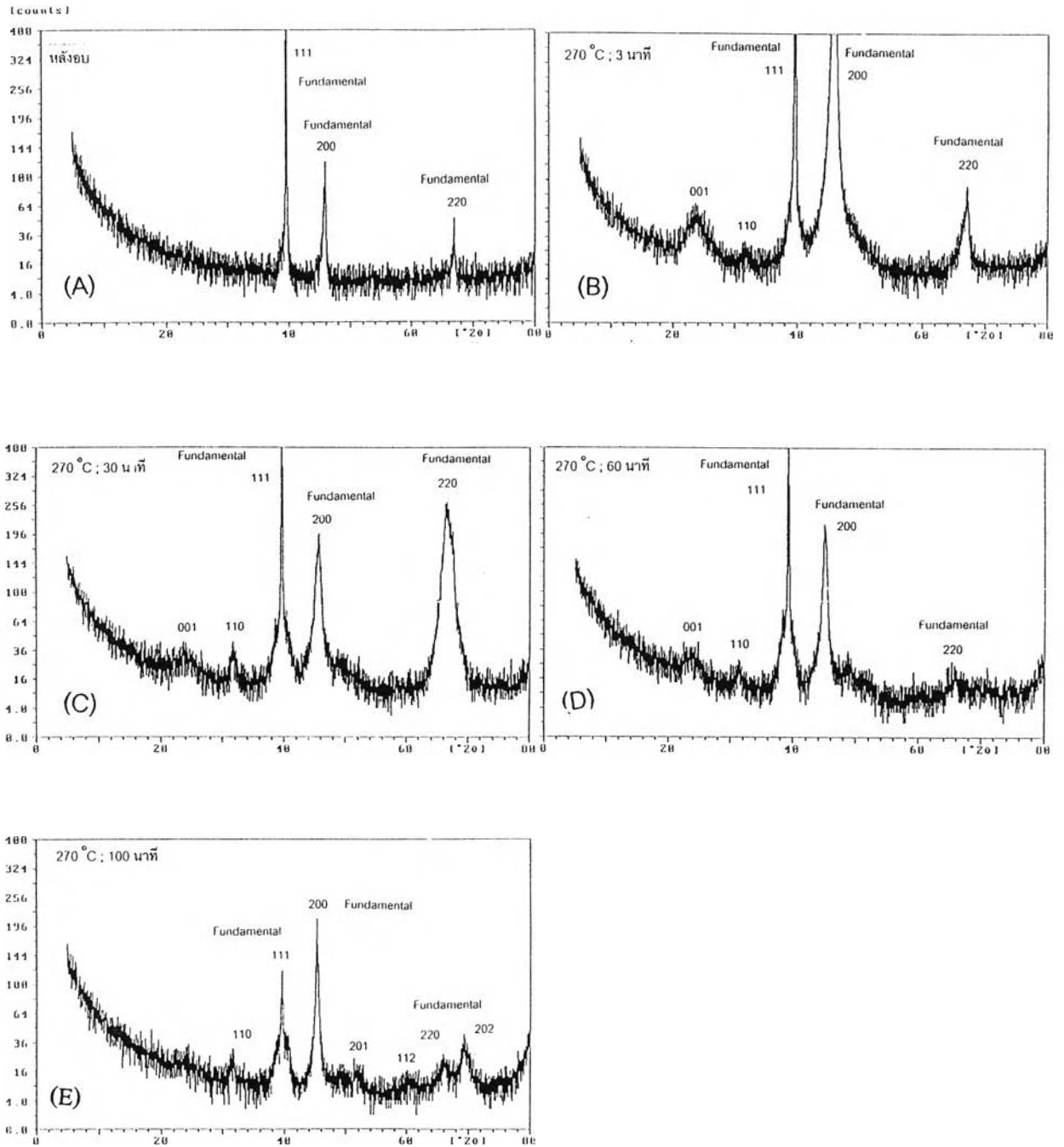
การบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงานที่ 150°C และ 200°C นาน 100 นาที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปแบบการกระเจิงในรูปที่ 4.22 (B) และ 4.22 (C) ซึ่งปรากฏเฉพาะการกระเจิงพื้นฐานเท่านั้น



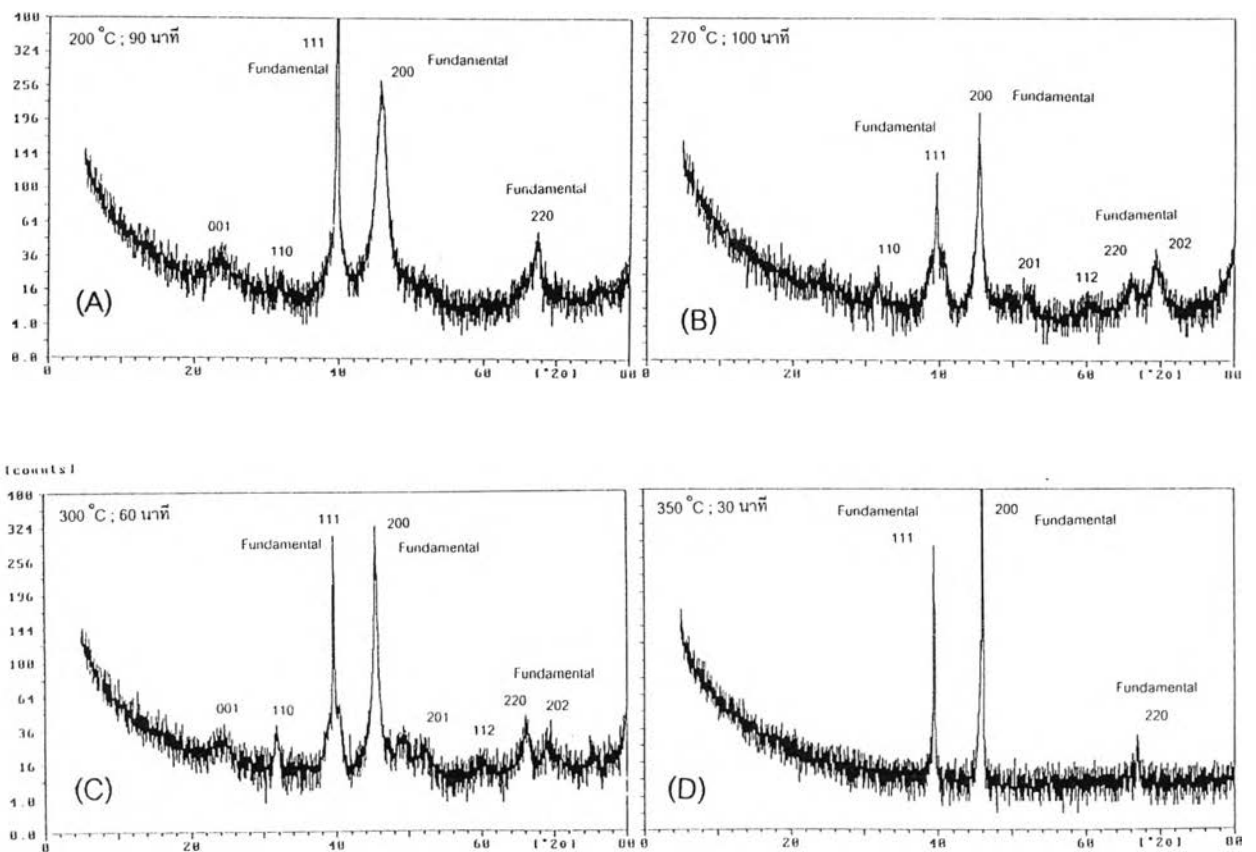
รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการทำบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 270 °C (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 30 นาที ; (D) นาน 100 นาที ; (E) นาน 180 นาที



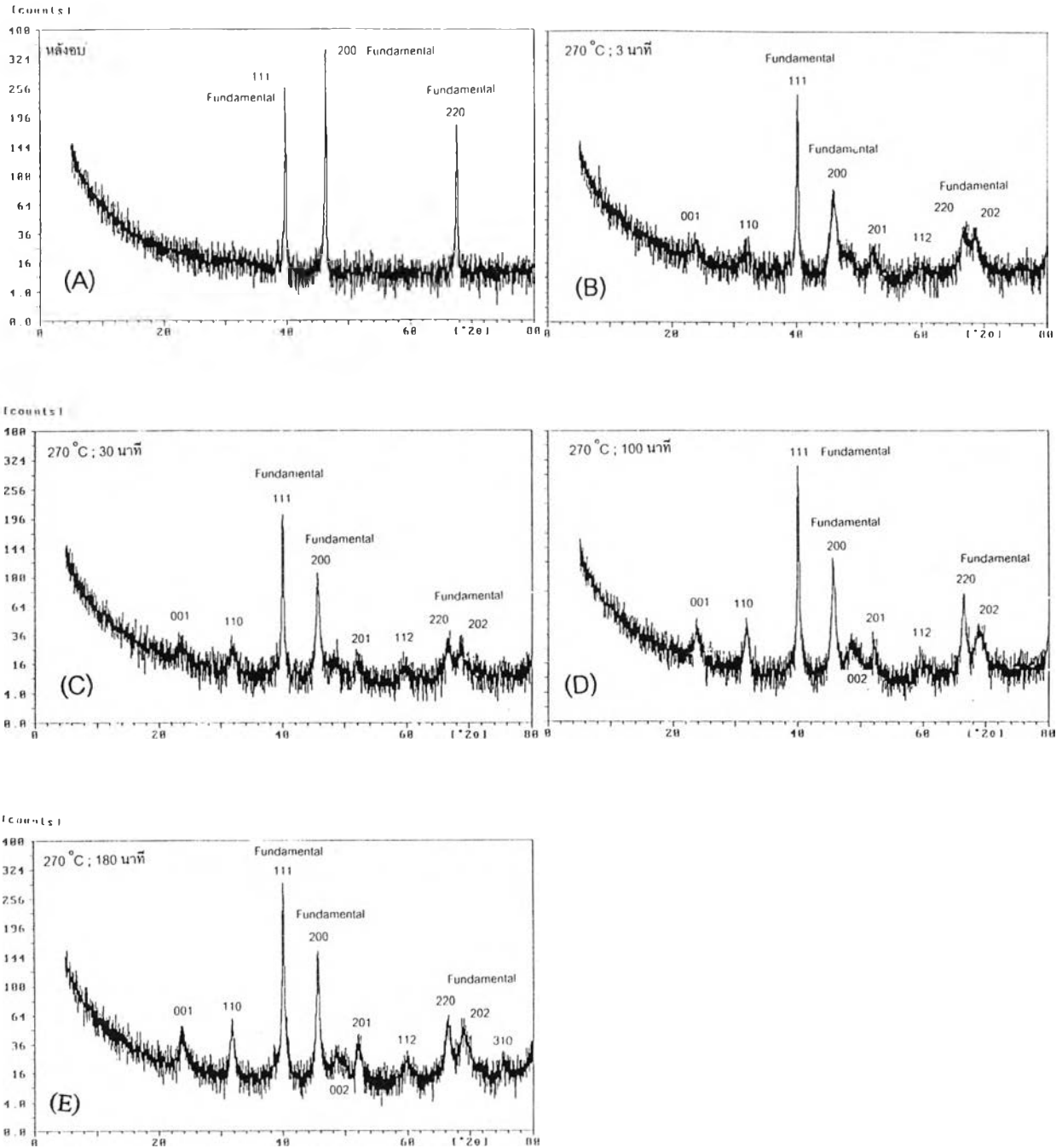
รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 75Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง 100 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A) อุณหภูมิ 150 °C ; (B) อุณหภูมิ 200 °C ; (C) อุณหภูมิ 270 °C ; (D) อุณหภูมิ 300 °C ; (E) อุณหภูมิ 350 °C



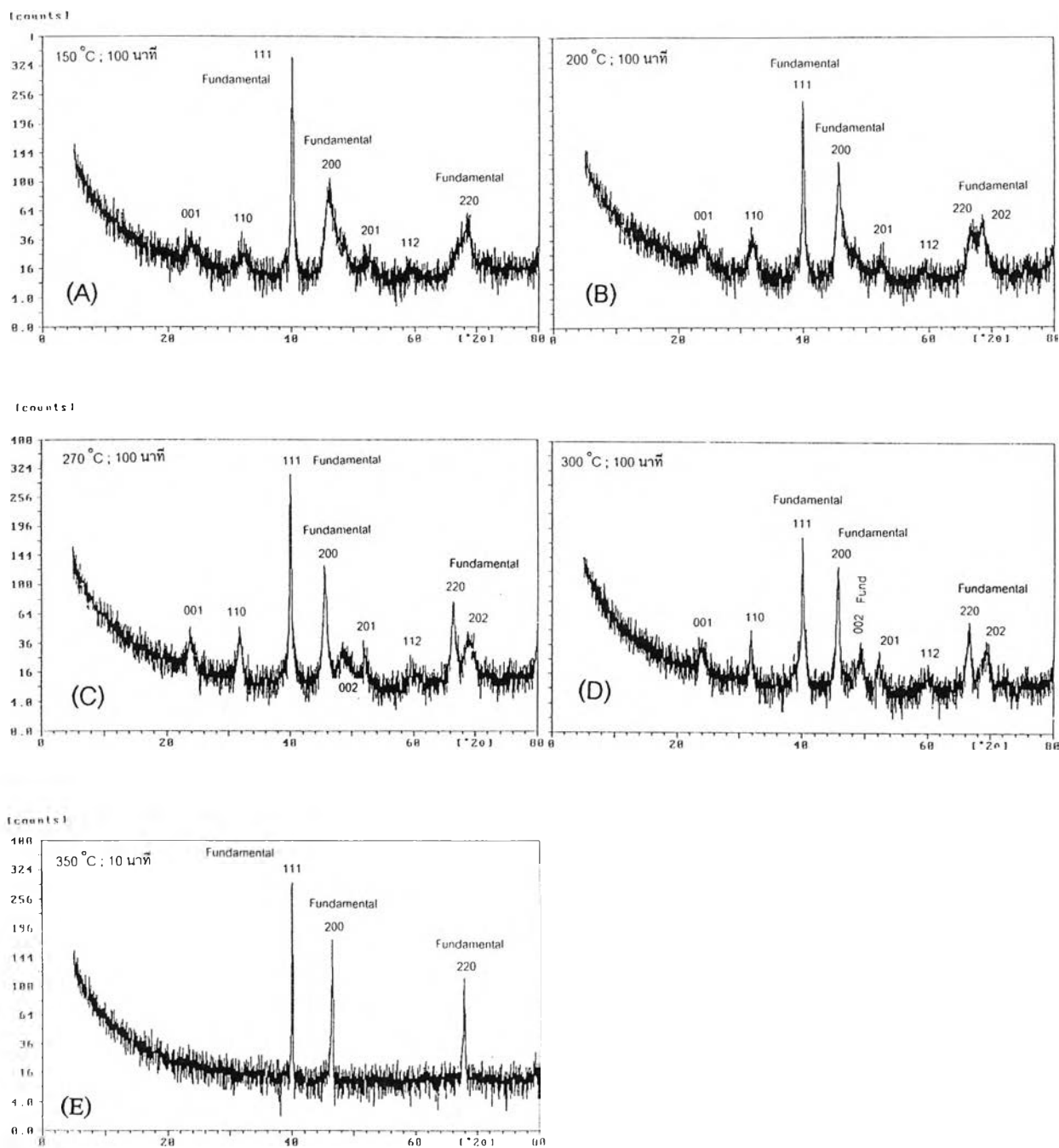
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 270 °C (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ); (B) นาน 3 นาที; (C) นาน 30 นาที; (D) นาน 60 นาที; (E) นาน 100 นาที



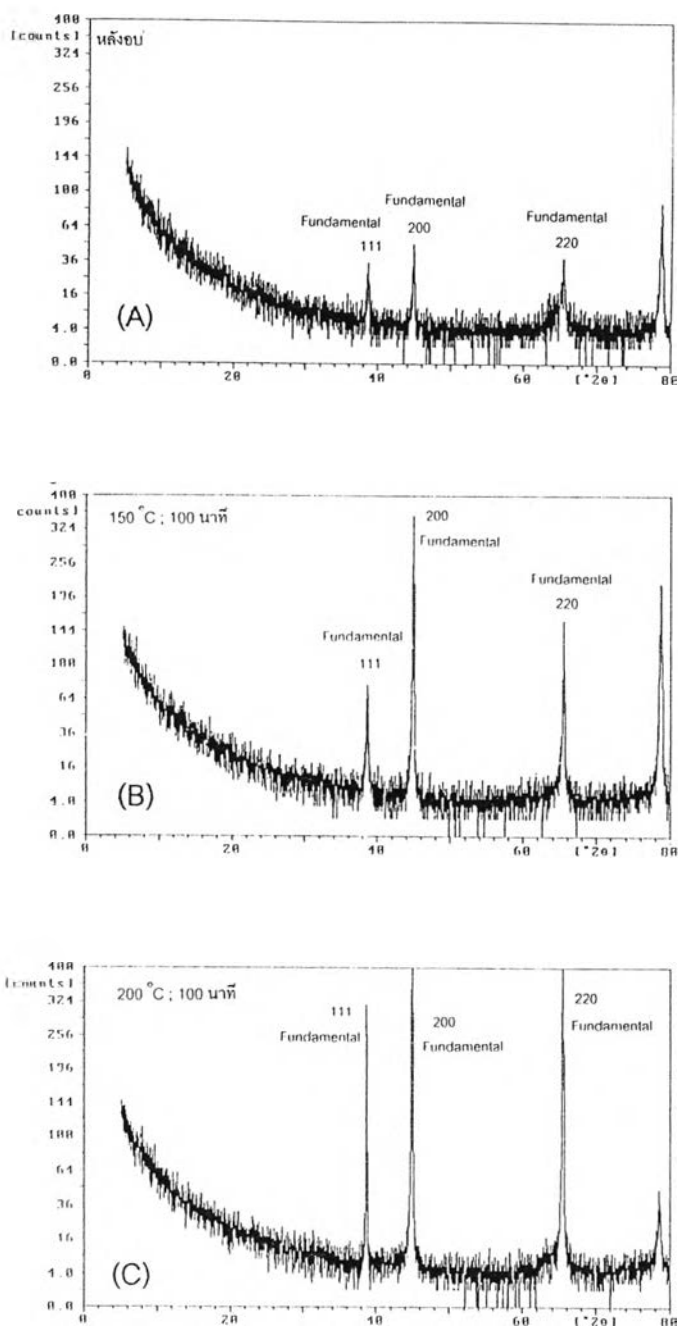
รูปที่ 4.19 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรงจนความแข็งแรงเริ่มคงที่ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A) อุณหภูมิ 200 °C นาน 90 นาที; (B) อุณหภูมิ 270 °C นาน 100 นาที; (C) อุณหภูมิ 300 °C นาน 60 นาที; (D) อุณหภูมิ 350 °C นาน 30 นาที



รูปที่ 4.20 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของซีโนแกน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านกาหม่มเพิ่มความชื้นที่อุณหภูมิ 270 °C (A) นาน 0 นาที (ซีโนแกนหลังอบ); (B) นาน 3 นาที; (C) นาน 30 นาที; (D) นาน 100 นาที; (E) นาน 180 นาที



รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 75Cu-20Ag-05Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรงนาน 100 นาทีที่อุณหภูมิ (A) 150 °C; (B) 200 °C; (C) 270 °C; (D) 300 °C; และ (E) ชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรง 350 °C นาน 10 นาที



รูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ;(A) ชิ้นงานหลังอบ; (B) ชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งที่ 150 °C นาน 100 นาที; (C) ชิ้นงานที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งที่ 200 °C นาน 100 นาที

4.3.3) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวจะได้โครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนแบบ Equi-axed ซึ่งเป็นเกรนที่เกิดผลึกใหม่ (Recrystallized) โดยมีเฟสเป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว (Single-phased solid solution) ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag หลังจากผ่านการอบที่ 800 °C นาน 60 นาที และจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.2 พบว่า เป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered structure)

การบ่มเพิ่มความแข็ง นอกจากจะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ (Disordered structure) ในสภาพหลอม ไปเป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Ordered structure) ชนิด AuCu ! ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.3.2 แล้วลักษณะของโครงสร้างจุลภาคก็มีลักษณะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 4.24 และ 2.25 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มที่ 200 °C นาน 10 นาที กัด (Etch) ด้วยสารละลาย 10%KCN + 10%(NH₄)₂S₂O₃ อัตราส่วน 1:1 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยใช้เทคนิค DIC และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ตามลำดับ จากรูปพบว่าโครงสร้างที่ได้ประกอบด้วยเกรนแบบ Equi-axed เช่นเดียวกับโครงสร้างของชิ้นงานหลอม แต่ในบางเกรนหรือบางบริเวณของเกรนจะประกอบด้วยแถบเส้นตรงซึ่งไม่พบในโครงสร้างของชิ้นงานในสภาพหลอม แถบเส้นตรงดังกล่าวเป็นแถบที่เกิดจากการบิดเบี้ยว (Distortion) ของโครงสร้างเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

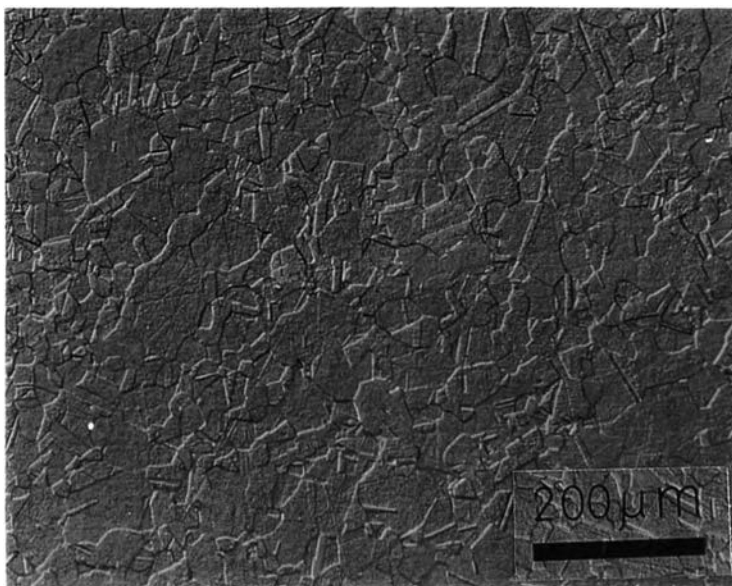
ข้อสรุปข้างต้นสามารถพิสูจน์ด้วยผลการตรวจสอบความแข็งระดับจุลภาคของเกรนที่พบแถบเส้นตรง เปรียบเทียบกับความแข็งระดับจุลภาคของเกรนที่ไม่พบแถบเส้นตรงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ซึ่งผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 10 นาที และ 30 นาที ดังแสดงโดยกราฟในรูปที่ 4.25 ซึ่งพบว่าความแข็งของเกรนที่พบแถบเส้นตรงมีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าเกรนที่ไม่พบแถบเส้นตรง ถึงแม้ค่าความแข็งจะมีช่วงคาบเกี่ยวกันอยู่ แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าที่ระดับความมั่นใจ 95 % เกรนที่ประกอบไปด้วยแถบเส้นตรงมีความแข็งสูงกว่าบริเวณที่ไม่พบแถบเส้นตรงจริง (ดูภาคผนวก ข.)

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งระดับจุลภาคดังกล่าว ร่วมกับผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งบ่งชี้ว่าชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าว มีการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ จึงสรุปได้ว่าแถบเส้นตรงที่พบในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็ง เป็นแถบที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของโครงสร้างเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และการบิดเบี้ยวของโครงสร้างดังกล่าวทำให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณแถบที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของโครงสร้างดังกล่าวจึงเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างของชิ้นงาน

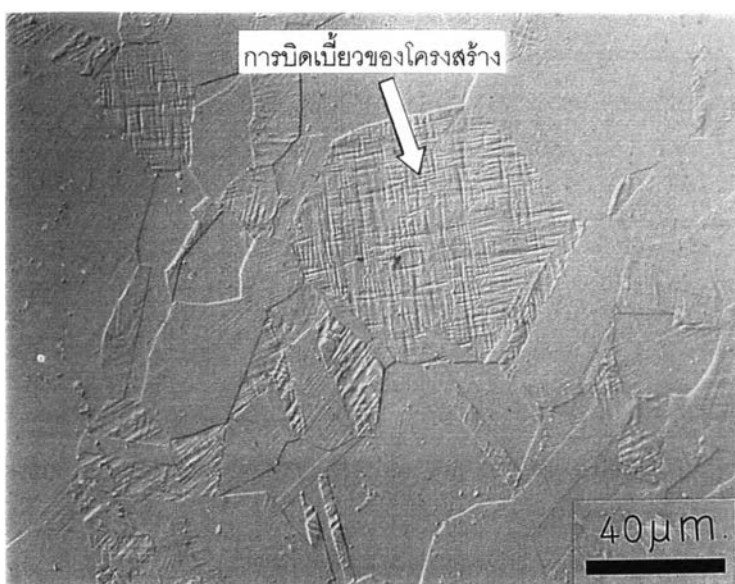
โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยใช้เทคนิคแบบ DIC ของชิ้นงานที่ทำการทดลองทั้ง 4 ส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัด (Etch) ด้วยสารละลาย 10%KCN + 10%(NH₄)₂S₂O₃ อัตราส่วน 1:1 แสดงในรูปที่ 4.27 ถึง 4.41 ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.4

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag แสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.31 จากรูปพบว่า ไม่พบโครงสร้างที่เป็นระเบียบในชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่ 150 °C, 200 °C และ 350 °C ส่วนชิ้นงานที่บ่ม

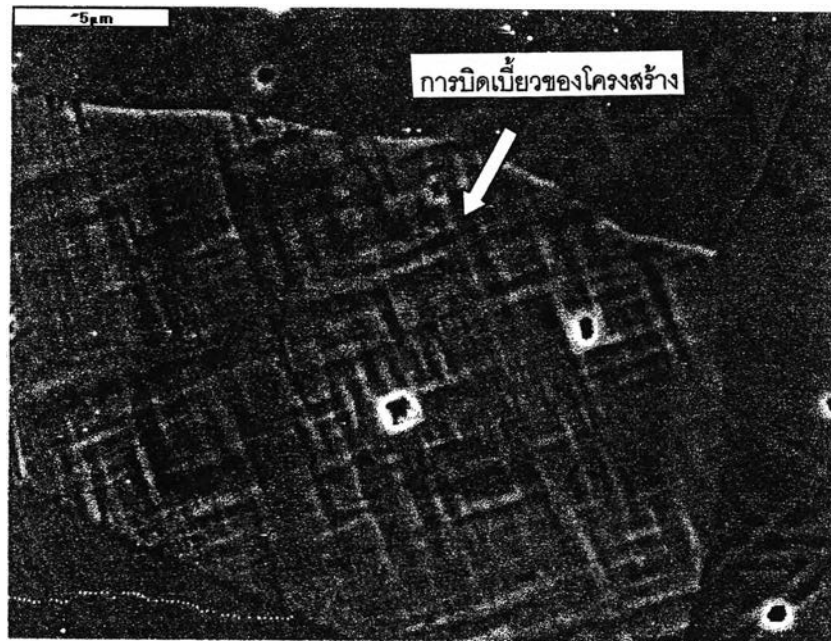
เพิ่มความแข็งที่ 270 °C จะเริ่มเห็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที และเริ่มเห็นชัดเจนเมื่อเวลานานขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่ 300 °C พบโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที เช่นเดียวกับชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่ 270 °C แต่จะเห็นได้ชัดเจนกว่า



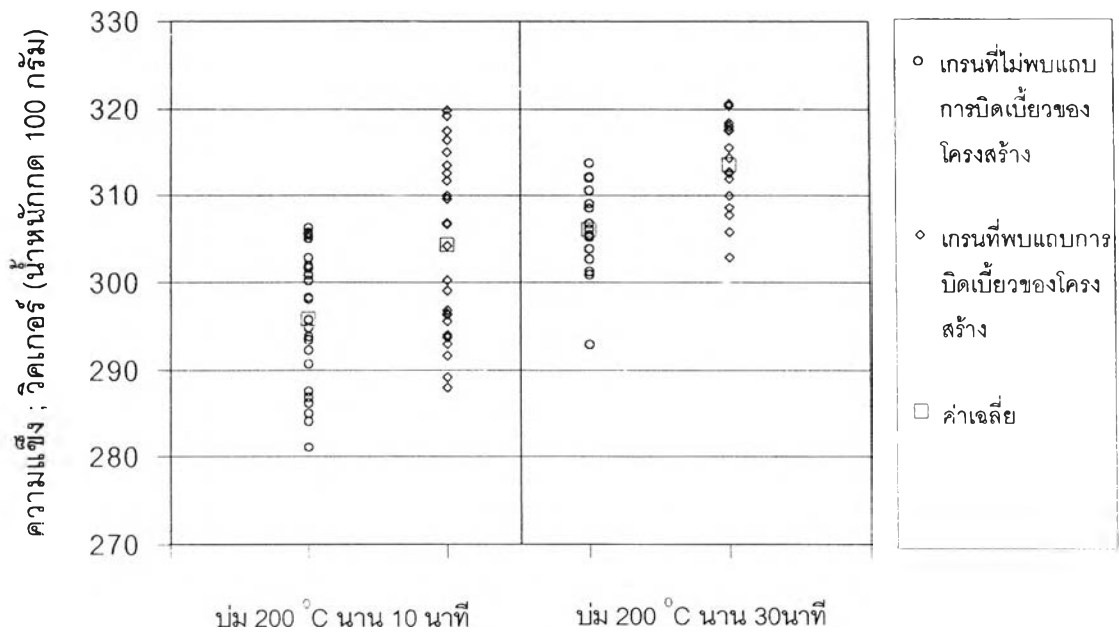
รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ในสภาพหลังอบ



รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag หลังการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 200 °C นาน 10 นาที



รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag หลังการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 200 °C



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งของเกรนที่พบแถบที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของโครงสร้างเปรียบเทียบกับเกรนที่ไม่พบแถบการบิดเบี้ยวของโครงสร้างในชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag

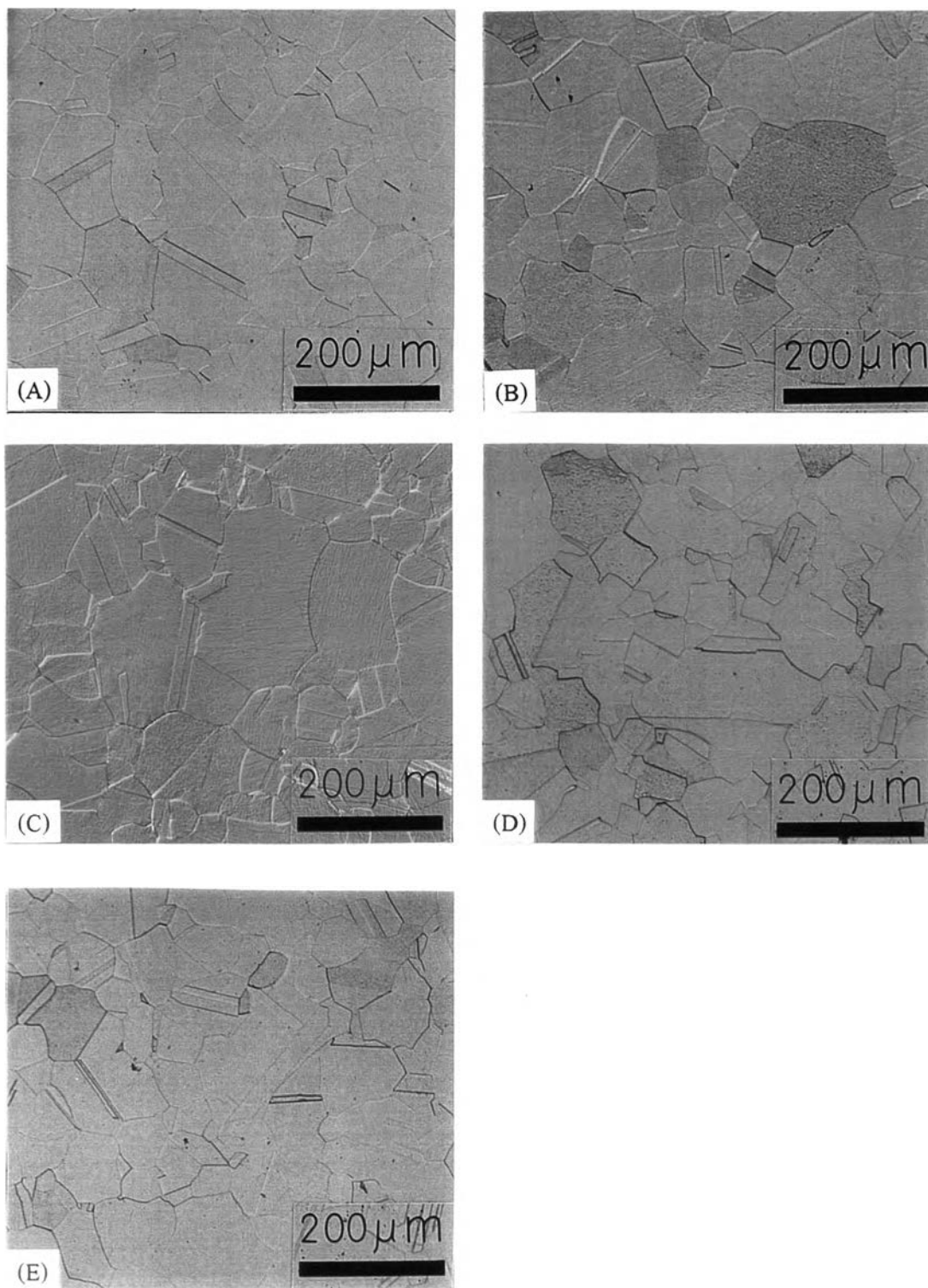
ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของรูปที่ 4.27 ถึง 4.41 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยใช้การแสดงผลภาพแบบ DIC ของชิ้นงานต่าง ๆ ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็ง กัด (Etch) ด้วยสารละลาย 10% KCN + 10%(NH₄)₂S₂O₃ อัตราส่วน 1:1

รูปที่	ชิ้นงาน	อุณหภูมิในการบ่ม (°C)
4.27	750Au-100Cu-150Ag	150
4.28	750Au-100Cu-150Ag	200
4.29	750Au-100Cu-150Ag	270
4.30	750Au-100Cu-150Ag	300
4.31	750Au-100Cu-150Ag	350
4.32	750Au-150Cu-100Ag	200
4.33	750Au-150Cu-100Ag	270
4.34	750Au-150Cu-100Ag	300
4.35	750Au-150Cu-100Ag	350
4.36	750Au-200Cu-050Ag	150
4.37	750Au-200Cu-050Ag	200
4.38	750Au-200Cu-050Ag	270
4.39	750Au-200Cu-050Ag	300
4.40	750Au-200Cu-050Ag	350
4.41	750Au-050Cu-200Ag	150, 200, 270, 300 และ 350

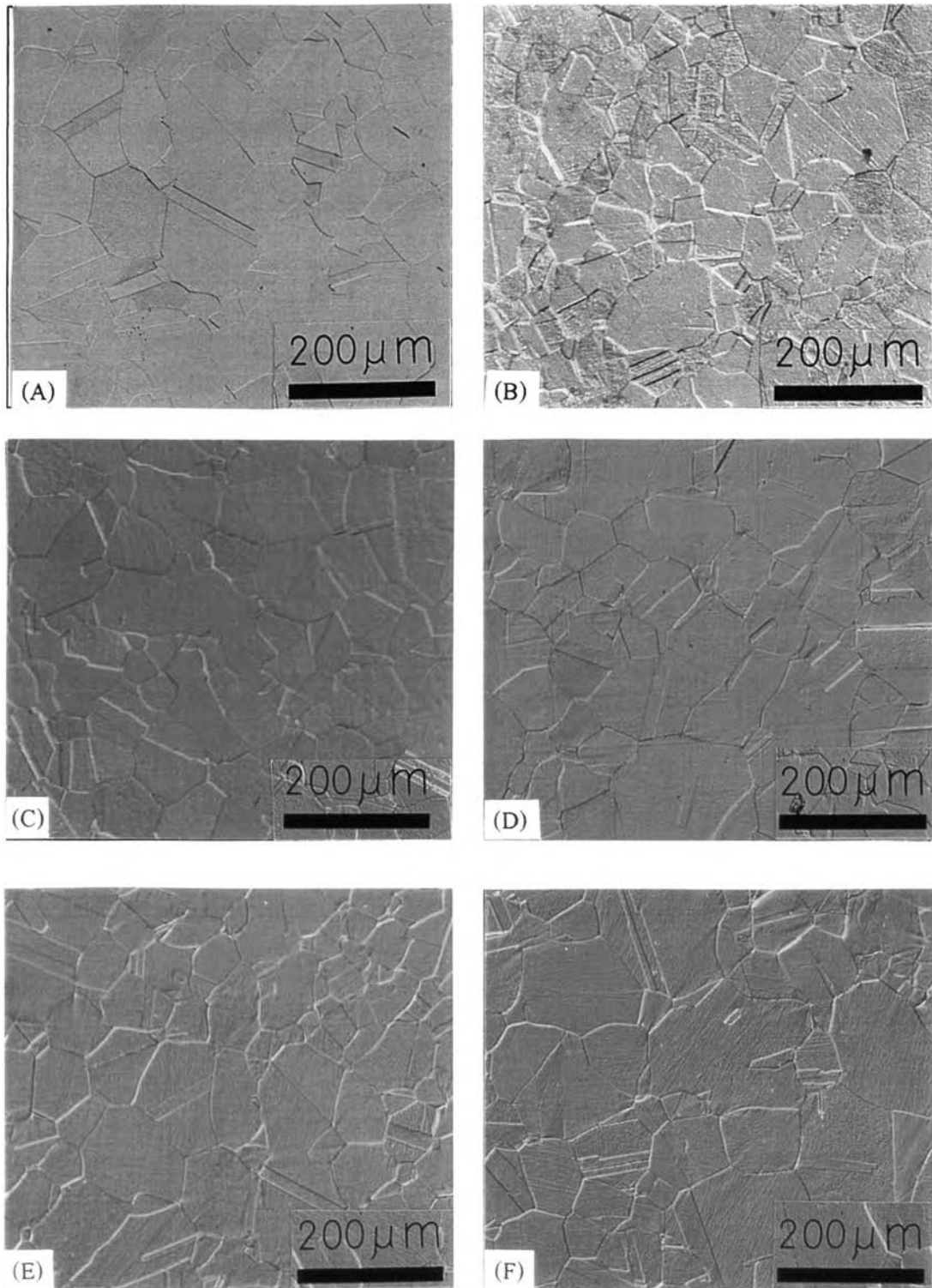
ชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งมีการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค จากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากกว่าชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag สังเกตได้จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ถึง 4.35 จากรูป 4.32 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ได้จากการบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงานที่ 200 °C พบว่า เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากเวลาผ่านไป 8 นาที และมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการบ่มนานขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบเริ่มต้นที่บริเวณขอบเกรน (Grain boundary) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.32 (C) ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 6 นาที การบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 270 และ 300 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบได้มากกว่าและรวดเร็วกว่าการบ่มที่ 200 °C ดังจะเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคในรูป 4.33 และ 4.34 ซึ่งเริ่มสังเกตเห็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากการบ่มเป็นเวลานานเพียง 3 นาที และมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาในการบ่ม ถ้าพิจารณาที่เวลาในการบ่มเท่า ๆ กันจะพบว่า เมื่ออุณหภูมิบ่มเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 300 °C การเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมีมากขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 350 °C (รูปที่ 4.35) ไม่พบการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

ชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag มีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น ซึ่งจะเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.36 ถึง 4.40 เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาในการบ่มเท่ากัน ปริมาณโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นมีมากขึ้นตามอุณหภูมิการบ่ม คือ 150 °C, 200 °C, 270 °C และ 300 °C ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการบ่มที่อุณหภูมิ 350 °C กลับไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จึงมีลักษณะเหมือนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังกอบ

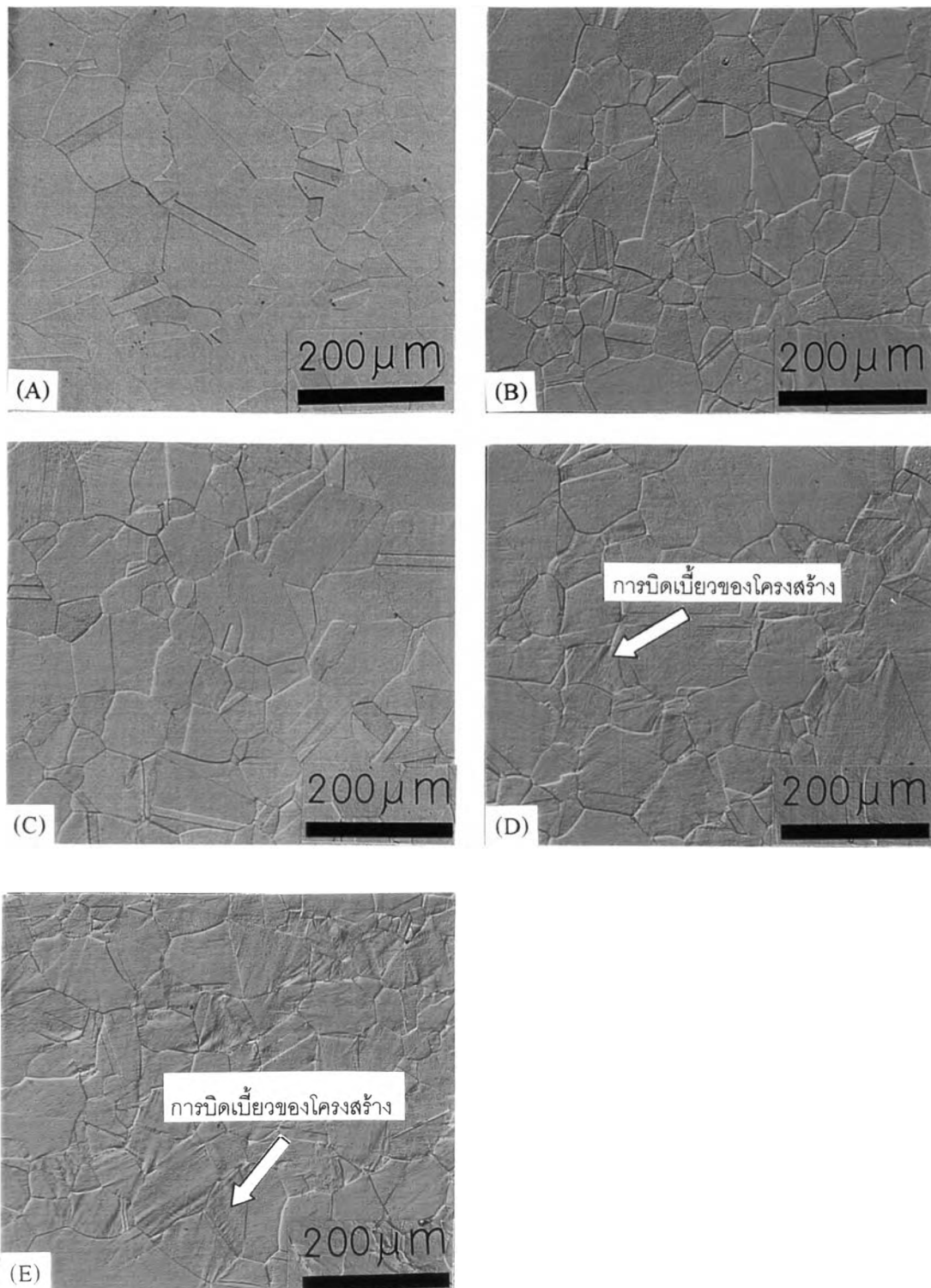
สำหรับชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีปริมาณ Cu น้อยที่สุดจากชิ้นงานที่ทำการทดลอง ไม่พบโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังการบ่มเพิ่มความแข็งทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือ 150 °C, 200 °C, 270 °C, 300 °C, และ 350 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.41



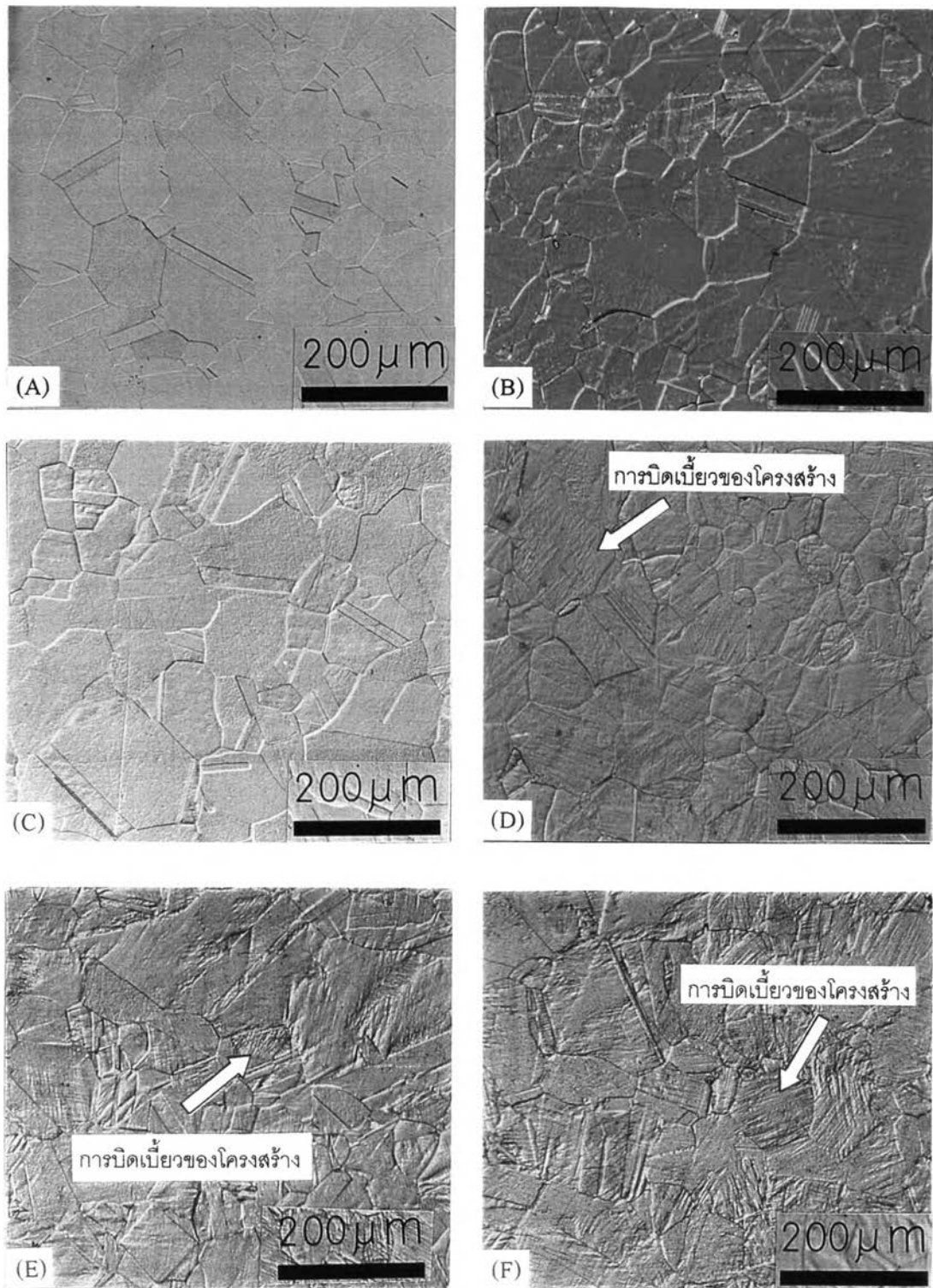
รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 150 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหล่อ); (B) นาน 3 นาที; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที



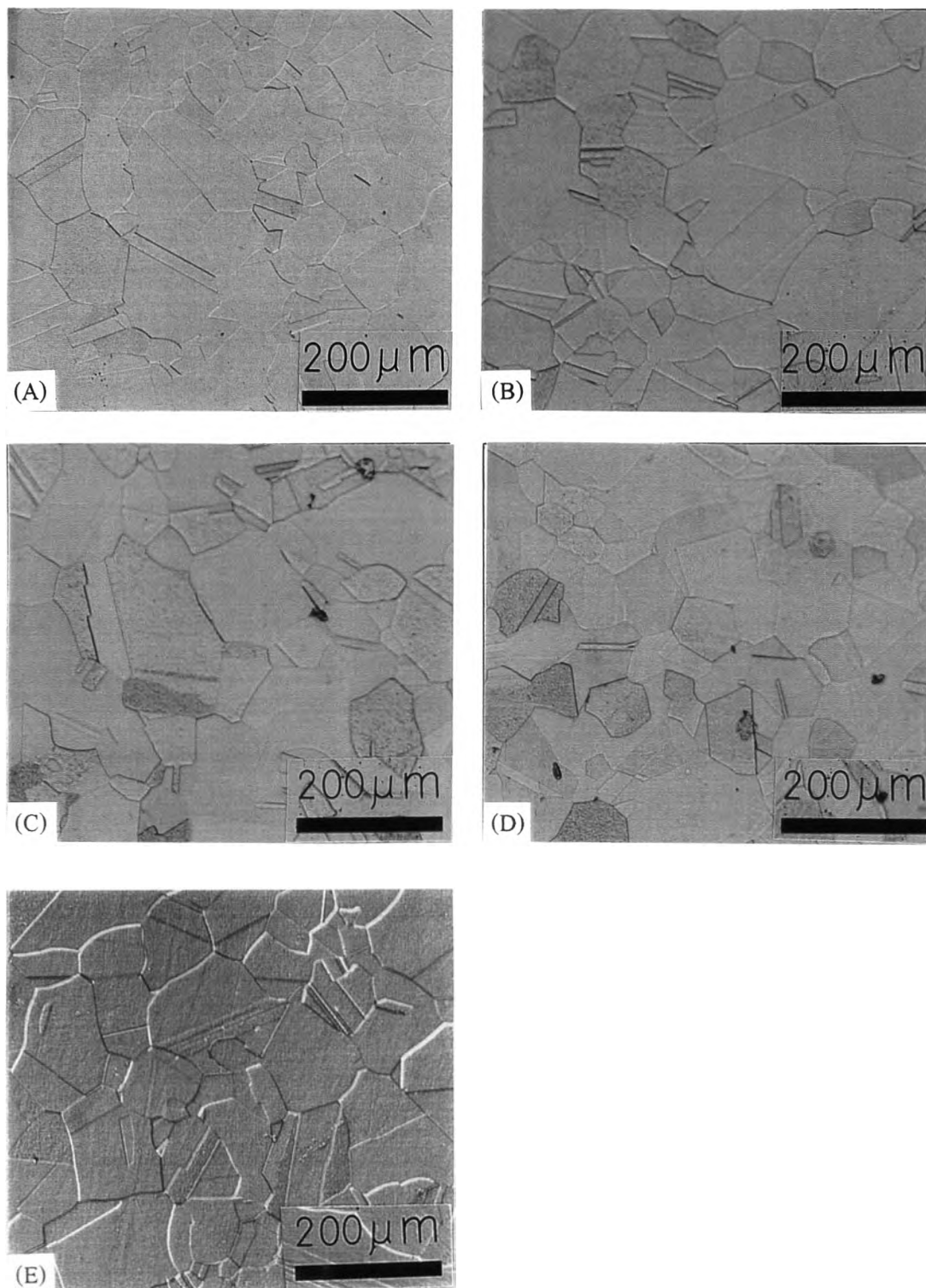
รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 200 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที ; (F) นาน 180 นาที



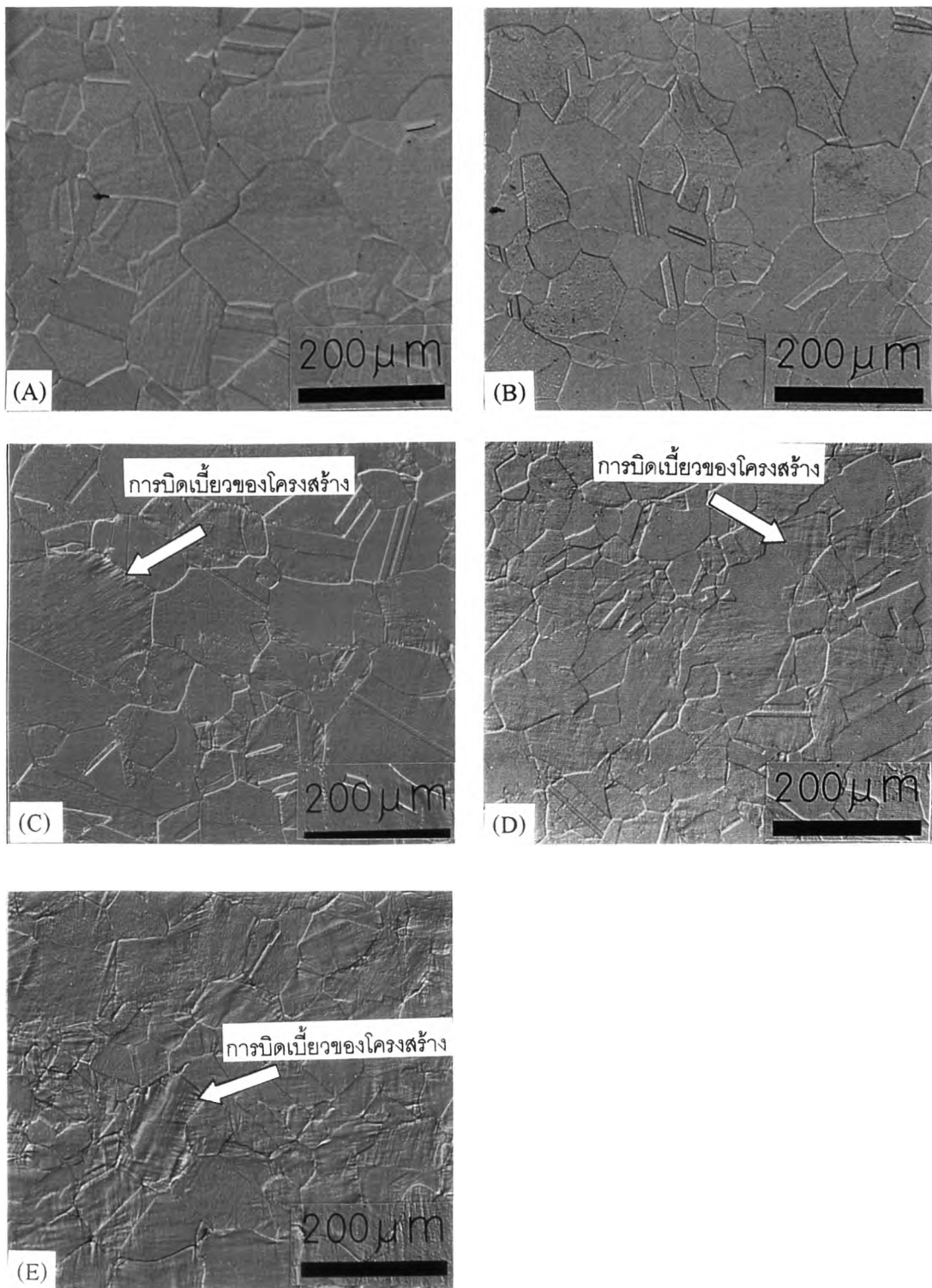
รูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 270 °C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที ;



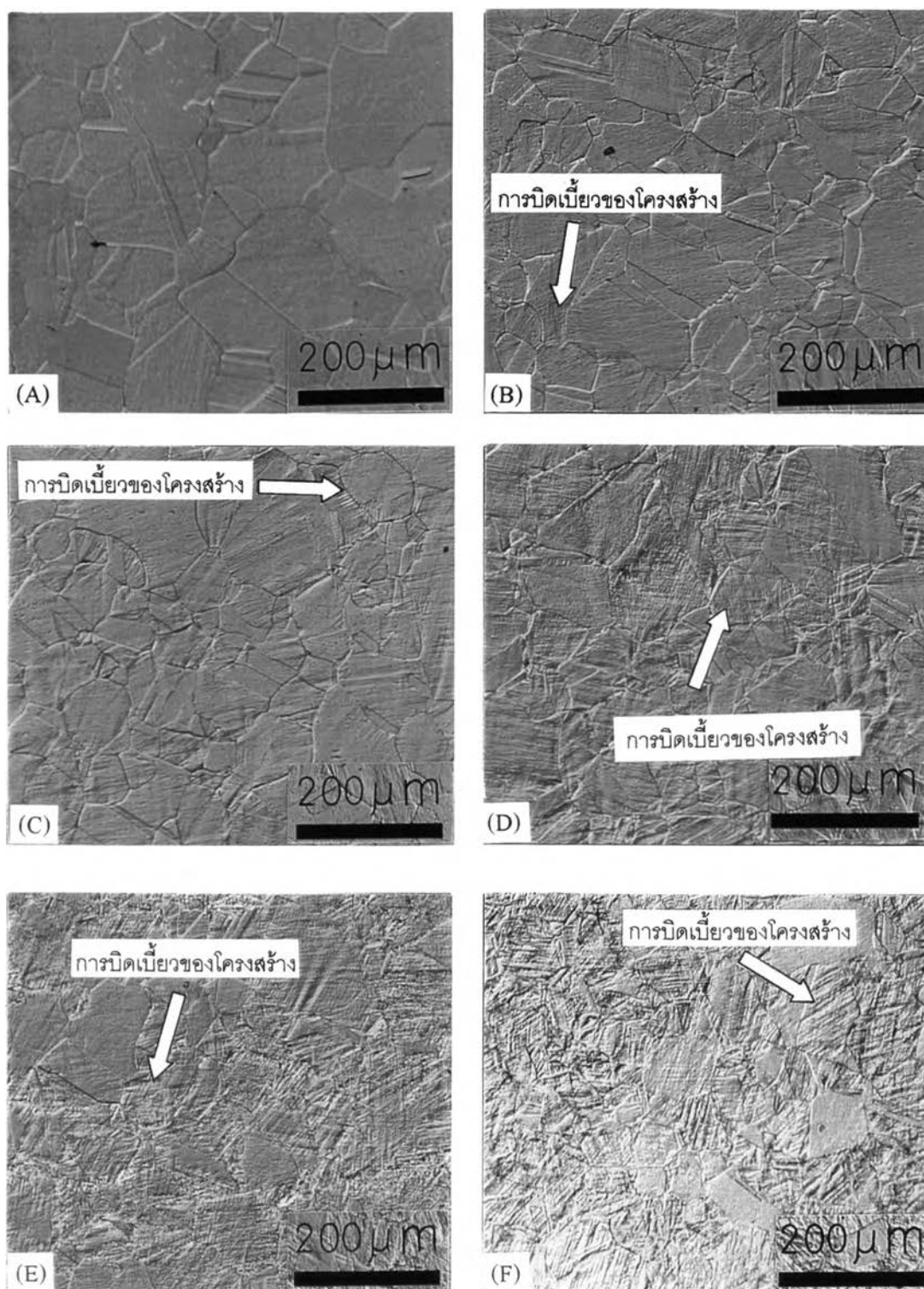
รูปที่ 4.30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 300 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที ; (F) นาน 180 นาที



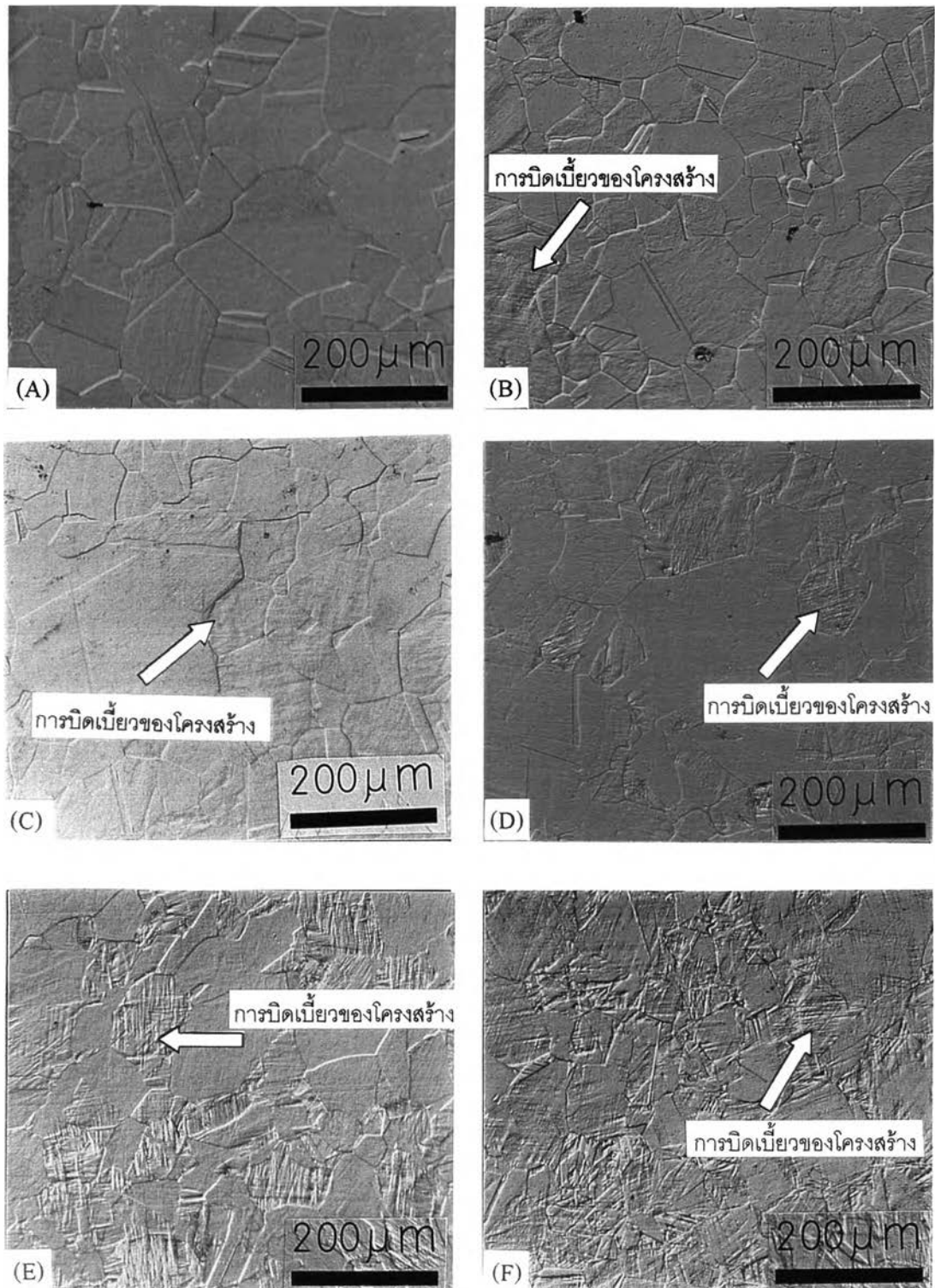
รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งที่ 350 °C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที



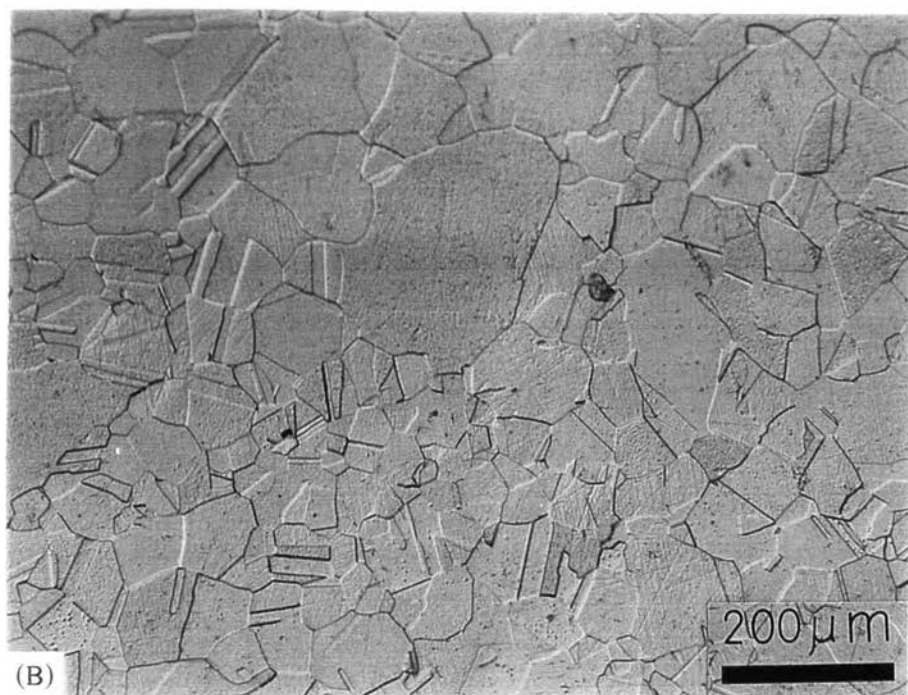
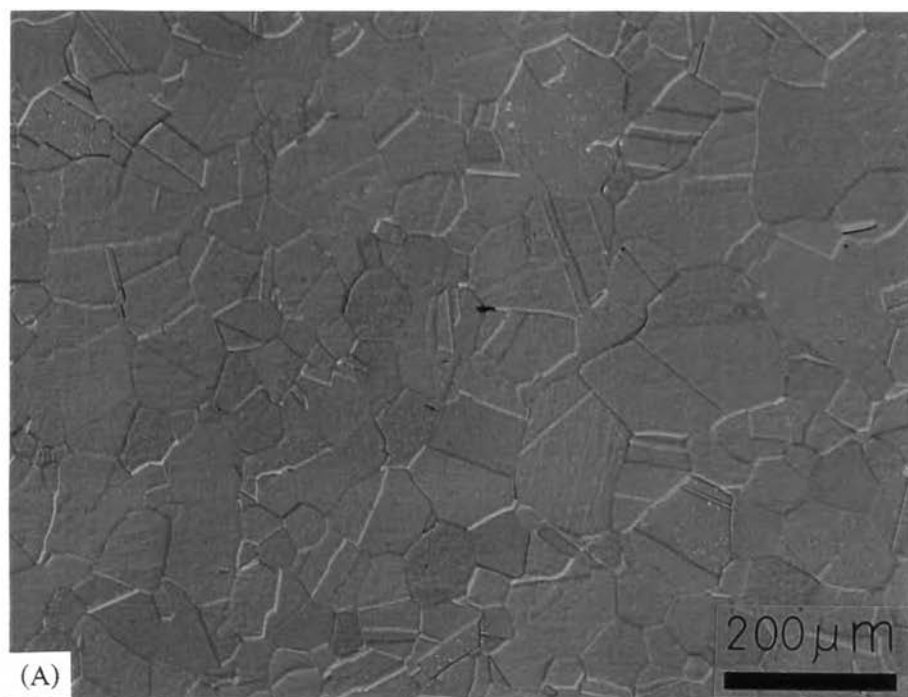
รูปที่ 4.32 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 200 °C ;
 (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 8 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 90 นาที ;



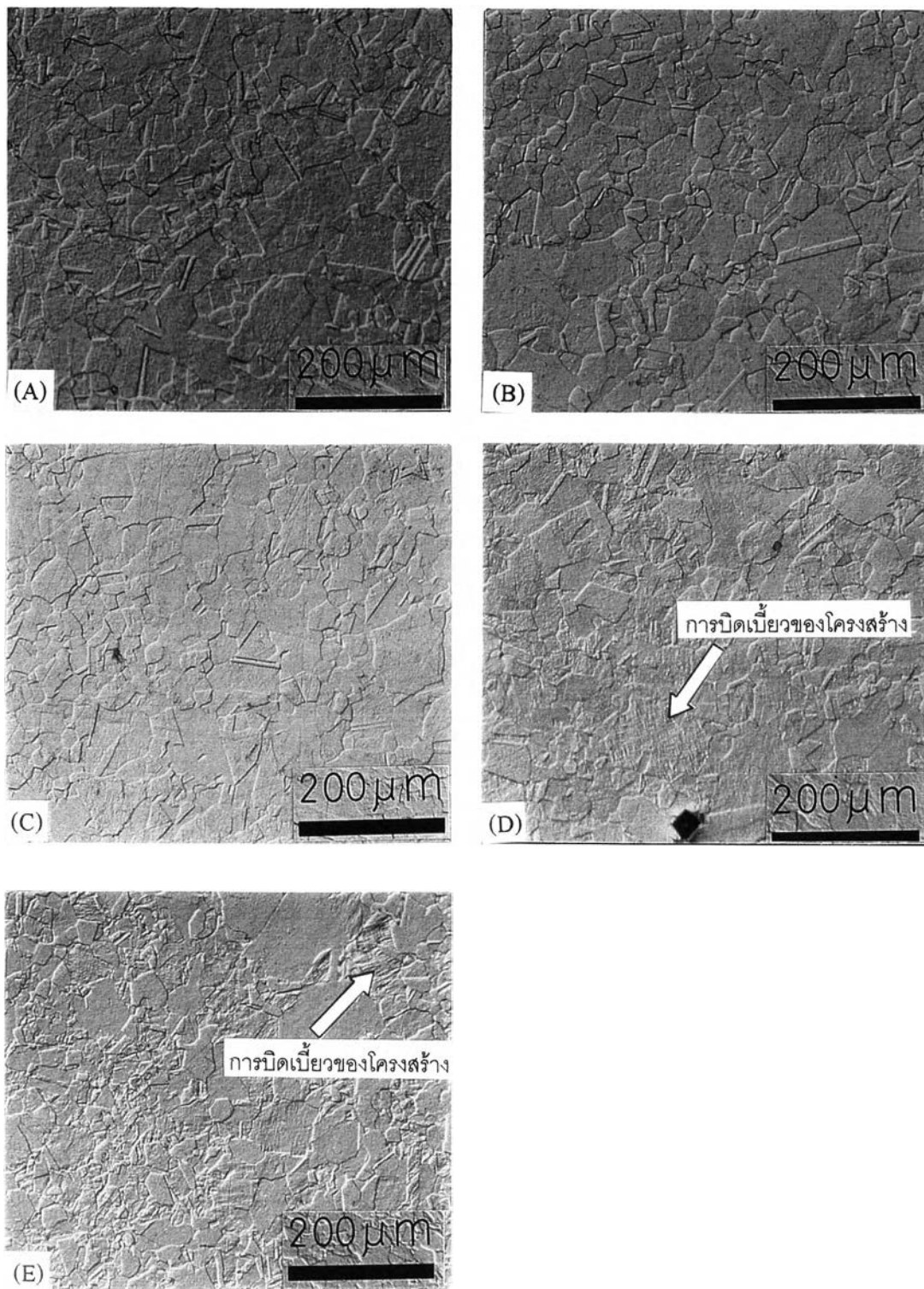
รูปที่ 4.33 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 270 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหล่อ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที ; (F) นาน 180 นาที



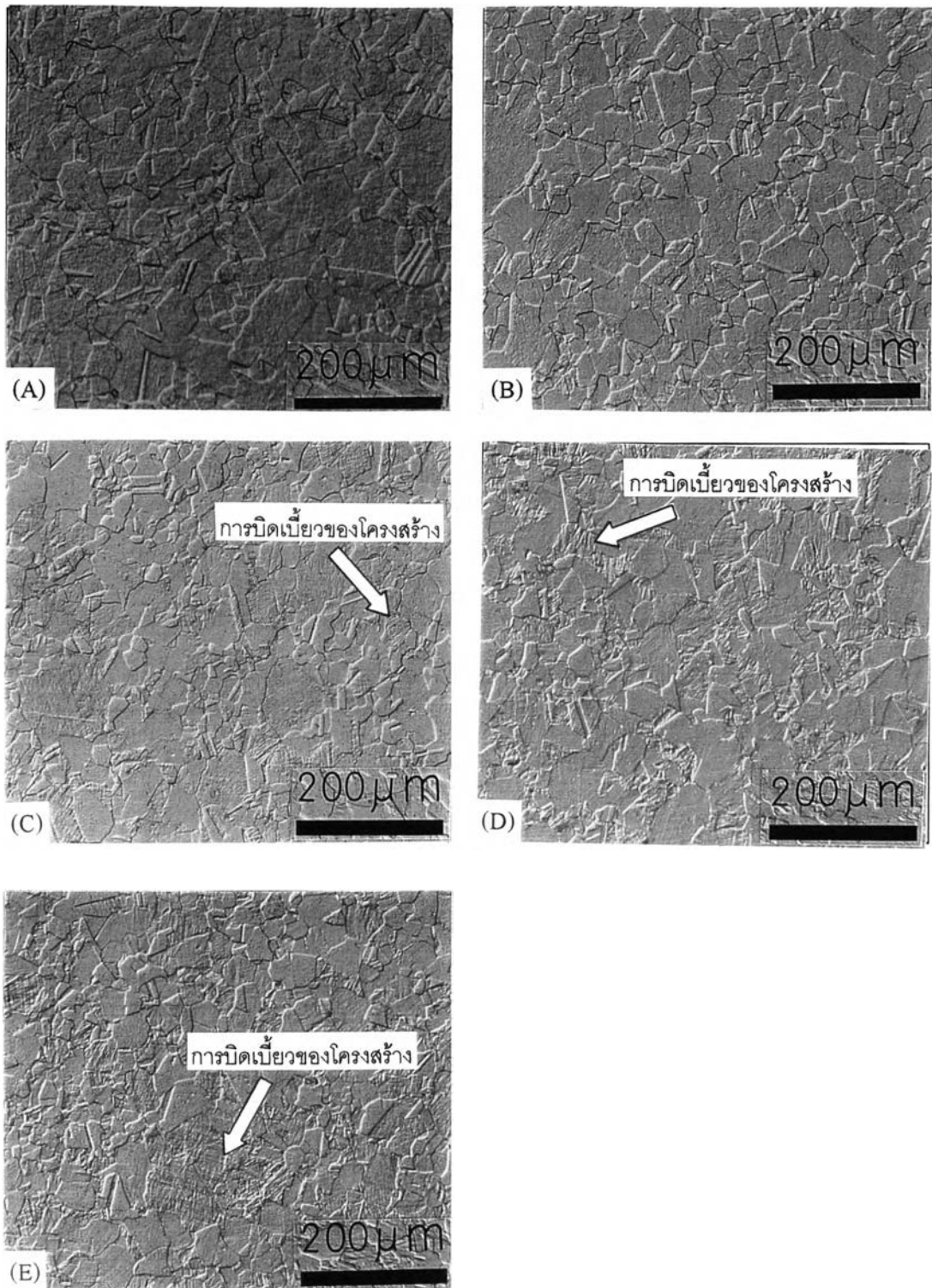
รูปที่ 4.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 300 °C ; (A) นาน 0 นาที (ขึ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 8 นาที ; (D) นาน 40 นาที ; (E) นาน 60 นาที ; (F) นาน 180 นาที



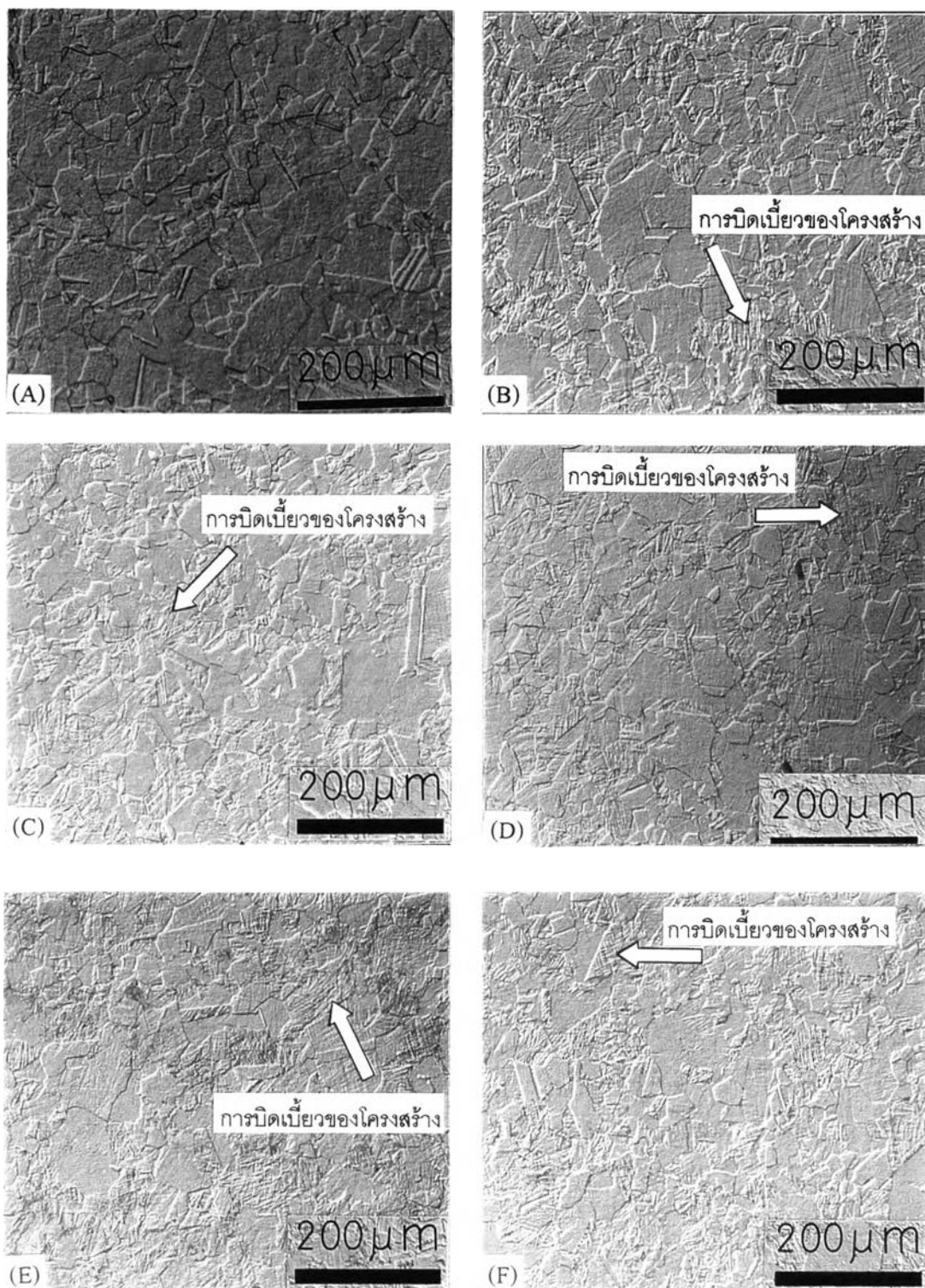
รูปที่ 4.35 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 350 C (A) นานเวลา 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นานเวลา 30 นาที



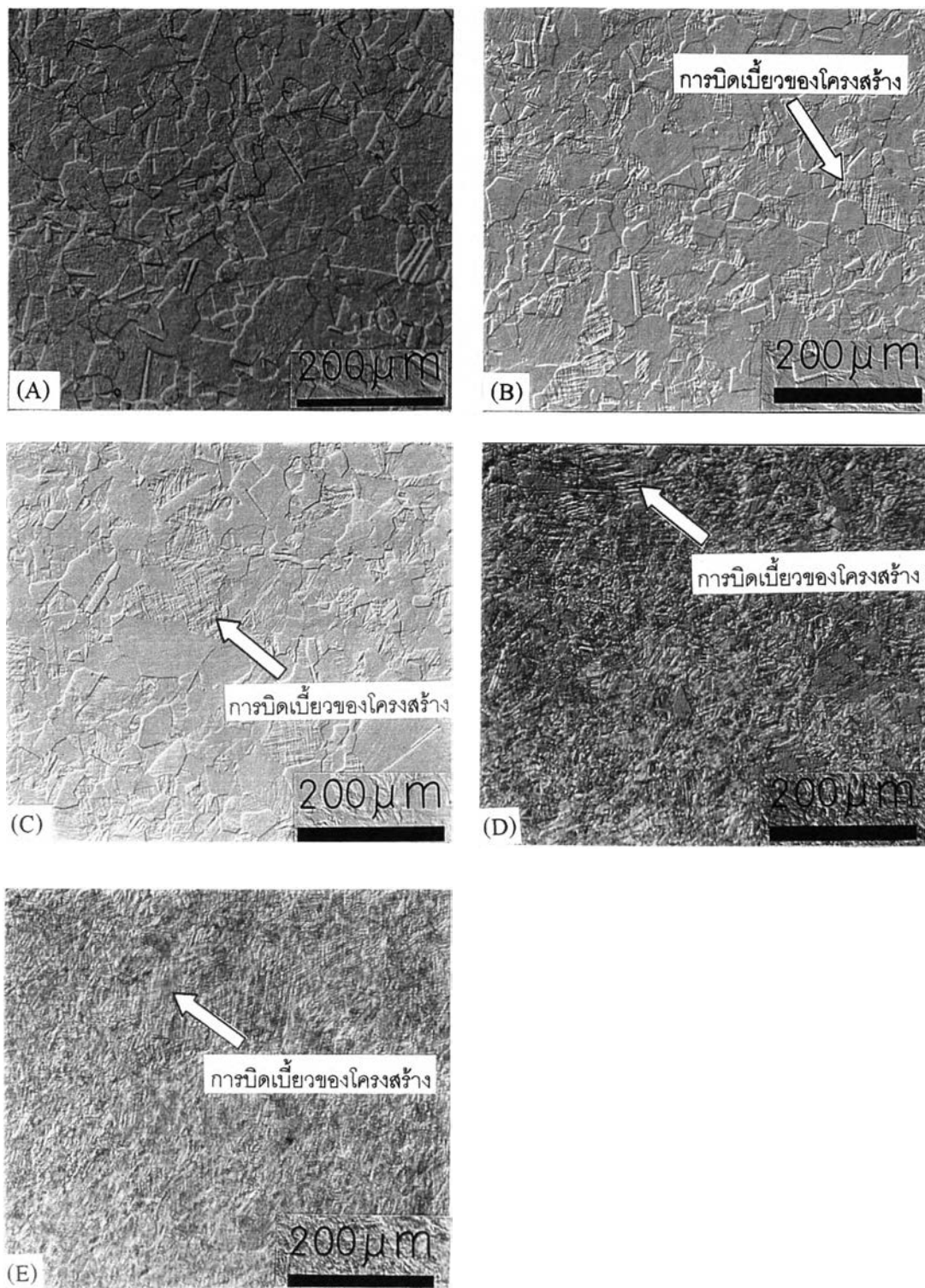
รูปที่ 4.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 150 C ;
 (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที



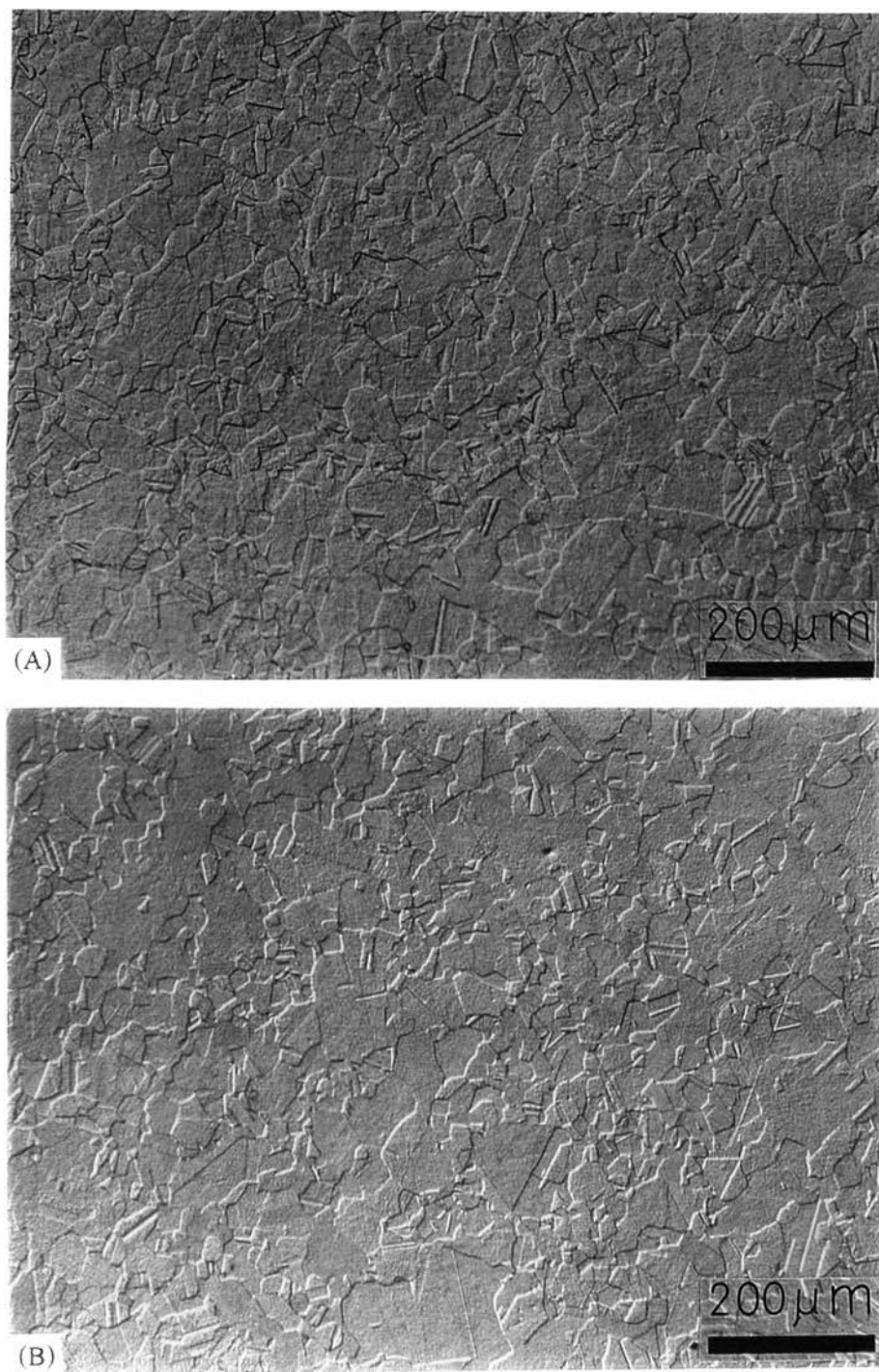
รูปที่ 4.37 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 200 °C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที



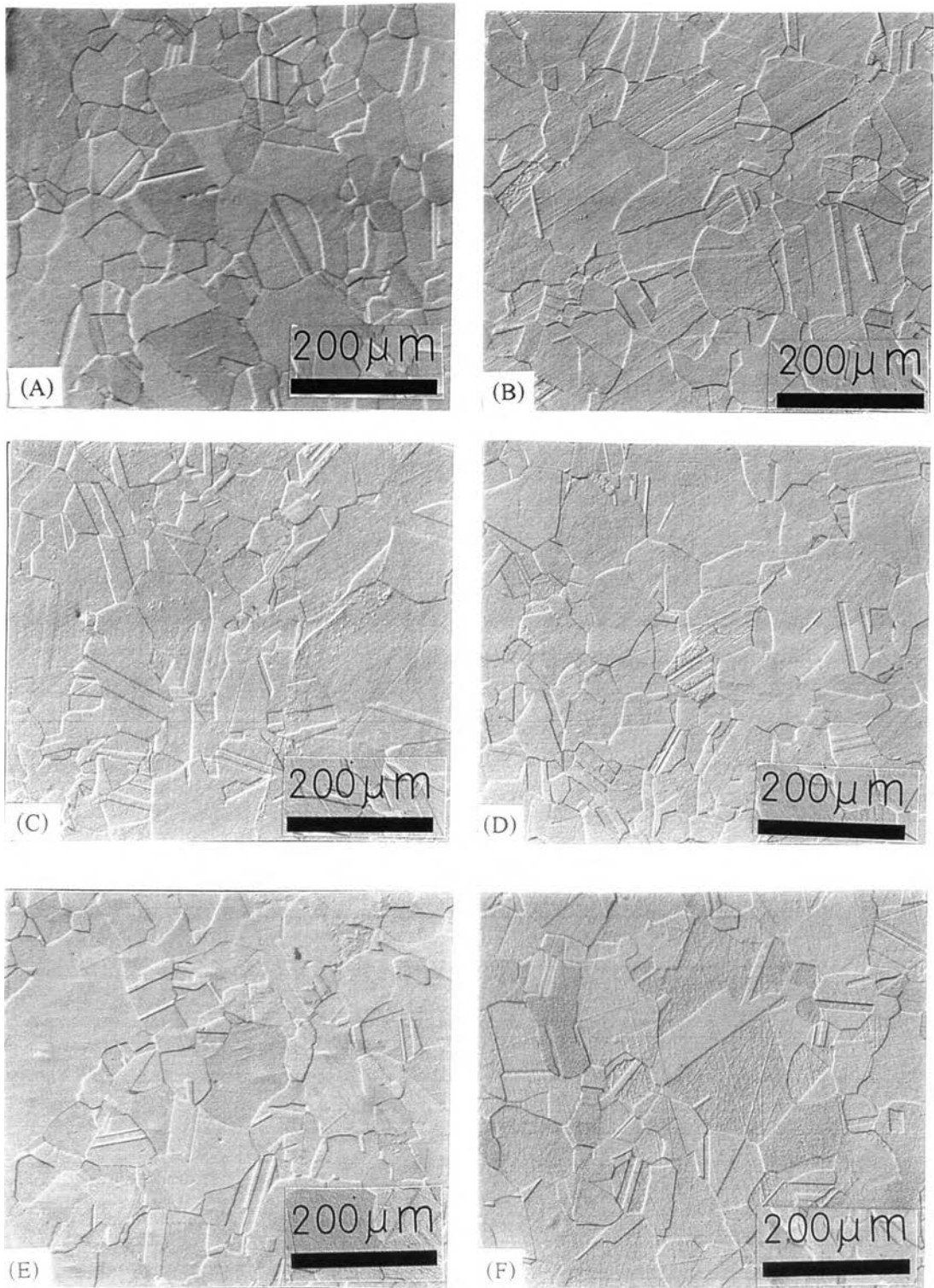
รูปที่ 4.38 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 270 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที ; (F) นาน 180 นาที



รูปที่ 4.39 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 300 C ; (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหลังอบ) ; (B) นาน 3 นาที ; (C) นาน 10 นาที ; (D) นาน 30 นาที ; (E) นาน 100 นาที



รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 350 C (A) นาน 0 นาที (ชิ้นงานหล่อ) ; (B) นาน 10 นาที



รูปที่ 4.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเงินงาน 75Au-050Cu-200Ag (A) ชีงงานหลังอบ, และชีงงานที่ผ่านการบมเพิ่มความแข็งแรง 100 นาที ที่อุณหภูมิ (B) 100 °C ; (C) 150 °C ; (D) 200 °C ; (E) 270 °C ; (F) 300 °C

4.3.4) อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถแบ่งชิ้นงานได้เป็น 2 กลุ่ม ตามพฤติกรรมการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน คือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งได้แก่ชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ส่วนอีกกลุ่มหนึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่มีการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังจากการบ่มเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งได้แก่ชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ในหัวข้อ 4.3.2 บ่งชี้ว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่อุณหภูมิ 150, 200, 270, และ 300 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ fcc. (Face-centered cubic) ในขณะที่โครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ fct. (Face-centered tetragonal) การเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบดังกล่าวจึงทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ของโครงสร้างในระดับจุลภาคขึ้น⁽²⁾ ซึ่งสามารถเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.3.3 การบิดเบี้ยวของโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม การบ่มเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่อุณหภูมิ 350 °C ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของชิ้นงาน โครงสร้างของชิ้นงานหลังการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ได้เป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่เพิ่มขึ้นจากสภาพหลังอบแต่กลับมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ซึ่งทำโดยการอบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (ในการทดลองนี้อบที่อุณหภูมิ 800 °C) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มในน้ำผสมน้ำแข็ง (0 – 2°C) ไม่สามารถทำให้ได้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบอย่างสมบูรณ์ได้ แต่จะมีการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบในปริมาณน้อย⁽³⁾ ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง XRD ในขณะที่การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต หลังจากทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วสู่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบสมบูรณ์กว่า เนื่องจากการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 350 °C จะมีการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตด้วยอัตราสูงกว่าการทำให้เย็นตัวอย่างช้าจากอุณหภูมิ 800 °C ในขั้นตอนการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว

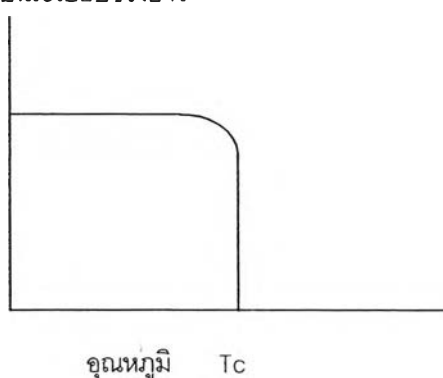
จากผลการทดลองพบว่า ระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างในชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการบ่มเพิ่มความแข็งแรง จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นจะช้าลงและมีความแข็งแรงคงที่ในที่สุด และถ้าพิจารณาที่เวลาในการบ่มเท่ากันสำหรับชิ้นงานที่มีส่วนผสมเดียวกัน การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่า (ในช่วงอุณหภูมิ 150 – 300 °C) จะมีระดับความเป็นระเบียบสูงกว่า

การเปลี่ยนแปลงเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ เป็นการเปลี่ยนเฟสโดยการเกิดนิวเคลียสตามด้วยการขยายขนาด (Nucleation and growth) หลังจากเกิดนิวเคลียสของโครงสร้างที่เป็นระเบียบขึ้นระดับความเป็นระเบียบช่วงยาว (Long-range ordered) ในแต่ละโดเมนจะมีค่าเท่ากับระดับความเป็นระเบียบที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾ แต่อย่างไรก็ตามระดับ

ความเป็นระเบียบโดยรวมจะยังคงต่ำมากเนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ยังคงเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เมื่อเวลาผ่านไปโดเมนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบมีการขยายขนาดใหญ่ขึ้น (Growth) ระดับความเป็นระเบียบโดยรวมจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง (หัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3) ที่พบว่าความเป็นระเบียบของโครงสร้างในชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่ม

เมื่อโดเมนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้โครงสร้างมีการบิดเบี้ยวมากขึ้น ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงมีค่าสูงขึ้น ความแข็งแรงของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่บ่มที่อุณหภูมิ 150, 200, 270 และ 300°C จึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 โดยที่เวลาในการบ่มสูงที่สุด 3 ชั่วโมงยังไม่พบการ Overaging ที่จะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงจากการที่โดเมนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบสูญเสียความเป็น Coherence กับเนื้อพื้น (Matrix)

ระดับความเป็นระเบียบช่วงยาว



รูปที่ 4.42 แสดงระดับความเป็นระเบียบที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

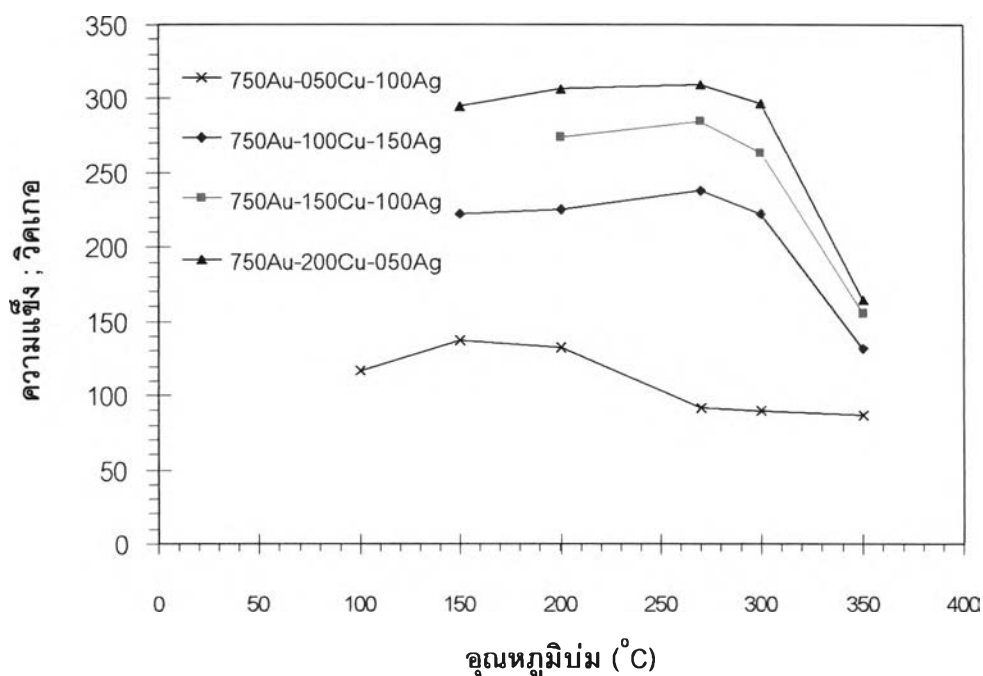
การขยายขนาดของโดเมนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของอะตอม อัตราการขยายขนาดของโดเมนจึงขึ้นกับอุณหภูมิด้วย⁽¹⁵⁾ ตามสมการ Rate = $A \exp^{-Q/RT}$ สมการดังกล่าวอธิบายผลการทดลองที่พบว่า ที่เวลาในการบ่มเท่ากันในชิ้นงานที่มีส่วนผสมเดียวกัน (สำหรับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag หรือ 750Au-200Cu-050Ag) ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า (ในช่วง 150 - 300°C) จะมีระดับความเป็นระเบียบสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้ ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในลักษณะเดียวกับการเพิ่มระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้าง แต่จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 270 °C ที่ได้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงที่สุด ในขณะที่การบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 300 °C ถึงแม้จะมีระดับความเป็นระเบียบสูงกว่าที่เวลาในการบ่มเท่ากัน แต่กลับมีความแข็งแรงต่ำกว่าที่ 270 °C ดังตารางที่ 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.43 ซึ่งแสดงความแข็งแรงของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 100 นาที ยกเว้นชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag และชิ้นงานที่บ่มที่ 350 °C

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 100 นาที

อุณหภูมิบ่ม (°C)	ความแข็ง (วิกเกอร์)			
	750Au-050Cu-100Ag	750Au-100Cu-150Ag	750Au-150Cu-100Ag	750Au-200Cu-050Ag
150	137.44	222.06		294.2
200	131.9	225.04	273.57*	306.37
270	91.14	236.94	283.54*	308.9
300	89.55	221.75	262.19*	296.41
350	87**	130.86	154.18***	164.2**

หมายเหตุ

- * เป็นค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการบ่ม 100 นาที เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความแข็งคงที่
- ** เป็นค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการบ่ม 100 นาที เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความแข็งคงที่
- *** เป็นค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการบ่ม 100 นาที เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความแข็งคงที่



รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 100 นาที

ขนาดของนิวเคลียสของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มเพิ่มความแข็งขึ้นกับอุณหภูมิบ่ม การบ่มที่อุณหภูมิต่ำซึ่งหมายถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิบ่มกับอุณหภูมิวิกฤต (ΔT) มีค่าสูง ขนาดของนิวเคลียสของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ในทางตรงกันข้ามการบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิสูง (ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต) ซึ่งหมายถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิบ่มกับอุณหภูมิวิกฤต (ΔT) มีค่าต่ำ นิวเคลียสของโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่า^{(12),(14)} ความจริงดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้การบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่อุณหภูมิ 300 °C ได้รับความแข็งต่ำกว่าการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 270 °C ถึงแม้ว่าระดับความเป็นระเบียบจะมีค่าสูงกว่าก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีขนาดของโดเมนขนาดเล็กกระจายอยู่ตามเนื้อพื้นจะให้ความสูงกว่าโดเมนขนาดใหญ่ที่ระดับความเป็นระเบียบโดยรวมเท่ากัน

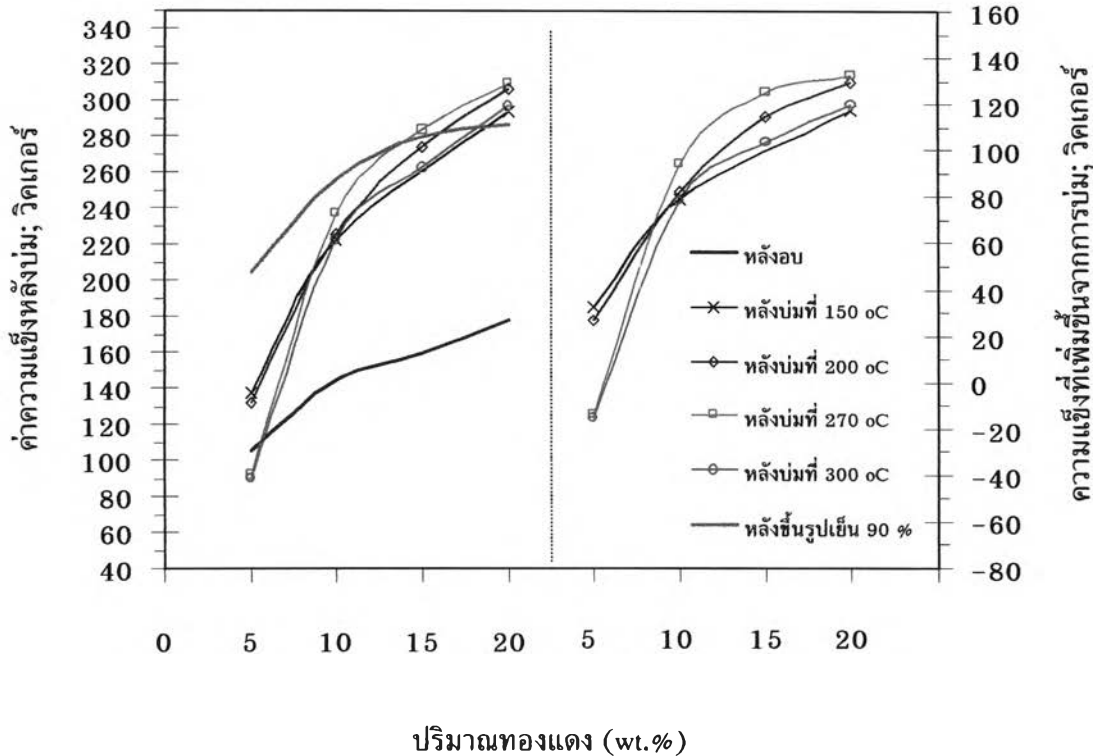
เมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 350 °C ความแข็งของชิ้นงานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิบ่มสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

พฤติกรรมความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ต่างจากชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag กล่าวคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ การบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 270, 300 และ 350 °C (หัวข้อ 4.31) ไม่ทำให้ความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิบ่มดังกล่าวสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ส่วนการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 100, 150 และ 200 °C ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นหลังจากบ่มนาน 100 นาทีมีค่าเป็น 11, 22 และ 17 วิคเกอร์ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และโครงสร้างจุลภาค (หัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3) ไม่พบโครงสร้างที่เป็นระเบียบในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็ง จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ แต่เกิดจากการการตกตะกอนซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดในทองคำผสม (ทอง – ทองแดง-เงิน) 18 กระรัตที่มีปริมาณเงินสูง และในทองคำผสมที่มีกระรัตต่ำ ๆ⁽²⁾⁽¹⁷⁾

จากรูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag มีความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag โดยอุณหภูมิบ่มที่ทำให้ชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ได้รับความแข็งสูงสุดคือ 150 °C ต่างจากชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag, 750Au-150Cu-100Ag และ 750Au-200Cu-050Ag ที่จะได้ความแข็งสูงสุดที่อุณหภูมิบ่ม 270 °C การบ่มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ที่อุณหภูมิ 100 °C ทำให้ได้ความแข็งต่ำกว่าการบ่มที่ 150 °C เนื่องจากข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของอะตอมที่อุณหภูมิต่ำทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิตั้งแต่ 270 °C ชิ้นงานจะกลับเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว จึงมีความแข็งต่ำกว่าที่การบ่มที่ 150 °C

ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อความแข็งของชิ้นงานในสภาพต่าง ๆ แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.44 จากกราฟพบว่าทั้งความแข็งหลังขึ้นรูปเย็น, ความแข็งหลังอบ และความแข็งหลังบ่มเพิ่มความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงมีค่ามากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มเพิ่มความแข็ง (ผลต่างระหว่างความแข็งหลังบ่มเพิ่มความแข็งกับความแข็งหลังอบ) มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณทองแดง

5



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็งแรงในสภาวะต่าง ๆ

หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรง ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 5 % ยังคงมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ส่วนชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดงตั้งแต่ 10 ถึง 20 % จะเกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ที่มีระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดง ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3 ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังบ่มเพิ่มความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงในชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าที่ปริมาณทองแดงต่ำ ๆ (ทองแดง 5 %) จะมีการตกตะกอนในระหว่างการบ่มเพิ่มความแข็งแรงแต่ความแข็งแรงที่ได้จากการตกตะกอนมีผลน้อยกว่าความแข็งแรงที่ได้จากการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมาก

โครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยทองและทองแดงที่มีอัตราส่วนโดยอะตอมเป็น 1:1 คือมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 75.6 : 24.4 โลหะทองคำผสมสองธาตุ 18 กระรัต ที่ประกอบด้วย ทอง - ทองแดง (75 wt.% Au , 25 wt. % Cu) มีส่วนผสมใกล้เคียงกับส่วนผสมดังกล่าว จึงเกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามที่ส่วนผสมเบี่ยงเบนไปจากอัตราส่วนนี้ไม่มากนัก ก็สามารถเกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ได้เช่นกัน โดยจะมีบางตำแหน่ง (Site) ถูกปล่อยว่างไว้ หรือมีบางอะตอมแทนที่ในตำแหน่งที่ผิด⁽¹²⁾ โลหะที่มีส่วนผสมเบี่ยงเบนไปดังกล่าวจะมีระดับความเป็นระเบียบต่ำ และมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำด้วย

สำหรับโลหะทองคำผสม 18 กะรัตที่ประกอบด้วย ทอง-ทองแดง-เงิน ยิ่งโลหะผสมมีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น (ปริมาณเงินลดลง) อัตราส่วนของ ทอง : ทองแดง ในโลหะผสม ยิ่งมีค่าเข้าใกล้อัตราส่วน ทอง : ทองแดง ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I มากขึ้น ทำให้ระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น ความจริงดังกล่าวอธิบายผลการทดลองที่พบว่าความแข็งของชิ้นงานและระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิด AuCu I ในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดง (ทองแดง 10 – 20 เปอร์เซ็นต์) และในชิ้นงานที่ประกอบด้วยทองแดง 5 เปอร์เซ็นต์ไม่พบการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (หัวข้อ 4.3.1 – 4.3.3)