

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการอบทางความร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ รวมทั้งการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวในการกดขึ้นรูปร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองพร้อมทั้งอภิปรายผลการทดลองดังต่อไปนี้

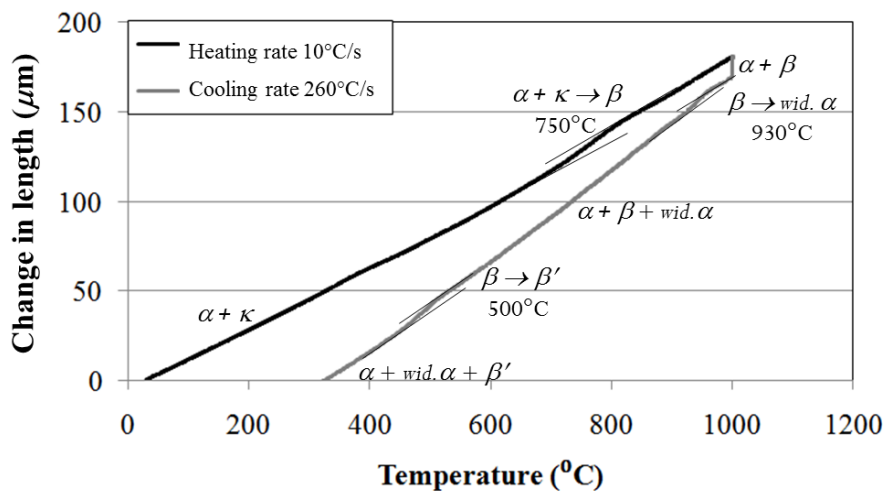
### 4.1 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการอบทางความร้อน

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการอบทางความร้อน ทดสอบโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยแก๊สฮีเลียม โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการโฮโมจีไนซ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ปริมาณเฟส และความแข็ง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเปลี่ยนไป รวมทั้งส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบด้วย

#### 4.1.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จากการทดลองโดยให้ความร้อนชิ้นงานไปที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องไคลโตมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปได้ โดยพิจารณาจากกราฟการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป พบว่าชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบคือโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการโฮโมจีไนซ์ ซึ่งมีโครงสร้างตั้งต้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเฟส  $\alpha$  และ  $\kappa$  เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C/s}$  จนถึงอุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการ

เปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน เนื่องจากเริ่มเกิดเฟส  $\beta$  ขึ้นในโครงสร้าง ( $\alpha + \kappa \rightarrow \beta$ ) ทำให้ปริมาตรของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง และเมื่อให้อุณหภูมิต่อเนื่องไปจนถึงอุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$  และ  $\beta$  ผสมกัน หลังจากนั้นเมื่อเย็นตัวชิ้นงานลงอย่างรวดเร็วด้วยค่าเฉลี่ยอัตราการเย็นตัว  $260^{\circ}\text{C/s}$  ดังแสดงในภาคผนวกที่ ก.1 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ  $930^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.3 การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เฟส  $\beta$  เริ่มเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟส Widmanstaetten  $\alpha$  ( $\beta \rightarrow \text{Widmanstaetten } \alpha$ ) ที่อุณหภูมิประมาณ  $930-1,000^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta$  และ Widmanstaetten  $\alpha$  และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง  $500^{\circ}\text{C}$  พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นเพราะเฟส  $\beta$  ซึ่งไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำ จะเปลี่ยนเป็นเฟสมาแทนไซต์ ( $\beta \rightarrow \beta'$ ) ดังนั้นโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิต่ำ โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  และ Widmanstaetten  $\alpha$



**รูปที่ 4.1** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จากการทดลองไดลาโตมิเตอร์ โดยให้ความร้อนชิ้นงานไปที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยแก๊สฮีเลียม

### 4.1.2 โครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบอบทางความร้อนด้วยเครื่อง ไดลาโตมิเตอร์ โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.7 และภาคผนวกที่ ข.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานหลังการทดสอบจะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$  (สีเหลืองนวล),  $\beta'$  (สีดำ),  $\kappa_{\text{III}}$  และ  $\kappa_{\text{IV}}$  และ  $\beta'$  โดยมีเฟส  $\alpha$  เป็นโครงสร้างหลัก และสังเกตได้ว่าเฟส  $\kappa_{\text{III}}$  เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟส  $\beta'$  หรือเรียกบริเวณนี้ว่า distorted  $\kappa_{\text{III}}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และสามารถอธิบายโครงสร้างจุลภาคและเฟส  $\kappa$  ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) บริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาอ่อนจะมีทองแดงหนาแน่นคือเฟส  $\alpha$  เป็นโครงสร้างหลัก บริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาเข้มจะมีเหล็กและอะลูมิเนียมหนาแน่นคือเฟส  $\kappa_{\text{III}}$  และเฟส  $\kappa_{\text{IV}}$  โดยเฟส  $\kappa_{\text{III}}$  จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม กระจายอยู่ตามขอบเกรนเฟส  $\alpha$  และเฟส  $\kappa_{\text{IV}}$  จะมีลักษณะเป็นตะกอนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเฟส  $\alpha$  และบริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาปานกลางจะมีนิกเกิลและอะลูมิเนียมหนาแน่นคือเฟส  $\beta'$  ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ซึ่งเริ่มเกิดเฟส  $\beta$  ขึ้นในโครงสร้าง ( $\alpha + \kappa \rightarrow \beta$ ) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 750°C

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) ชิ้นงานหลังการทดสอบจะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$  (สีเหลืองนวล),  $\beta'$  (สีดำ),  $\kappa_{\text{III}}$  และ  $\kappa_{\text{IV}}$  และ  $\beta'$  โดยมีเฟส  $\alpha$  เป็นโครงสร้างหลัก และเกิดเฟส  $\beta'$  มากขึ้น รูปที่ 4.3 (ข) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE พบว่าเฟส  $\kappa_{\text{III}}$  มีลักษณะเป็นเม็ดกลม กระจายอยู่ตามขอบเกรนเฟส  $\alpha/\beta$  และเฟส  $\kappa_{\text{IV}}$  มีลักษณะเป็นตะกอนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเฟส  $\alpha$

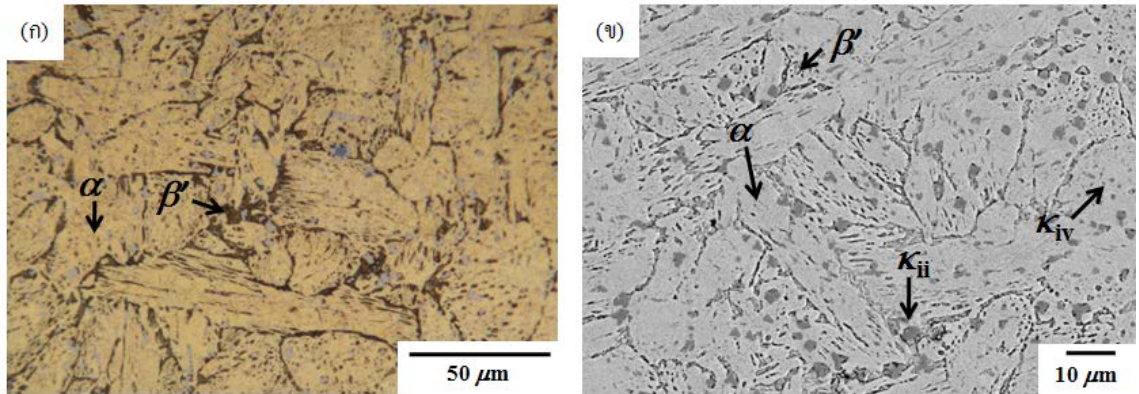
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870°C และ 900°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ชิ้นงานหลังการทดสอบจะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\kappa_{\text{III}}$  และ  $\beta'$  จากรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.5 (ข) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีเฟส  $\beta'$  เป็นโครงสร้างหลัก และเฟส  $\alpha$  และ  $\kappa$  ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแผนภาพ

สมดุลของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ในรูปที่ 2.1 เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $860^{\circ}\text{C}$  เฟส  $\alpha$  บางส่วนจะเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟส  $\beta$  และเมื่อเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เฟส  $\beta$  จึงเปลี่ยนไปเป็นเฟส  $\beta'$  รูปที่ 4.4 (ข) และ 4.5 (ข) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE พบว่าเฟส  $\kappa_{\text{II}}$  มีขนาดเล็ก (Fine  $\kappa_{\text{II}}$ ) และไม่ปรากฏเฟส  $\kappa_{\text{IV}}$  เนื่องจากเกิดการแพร่ของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมระหว่างการให้ความร้อน

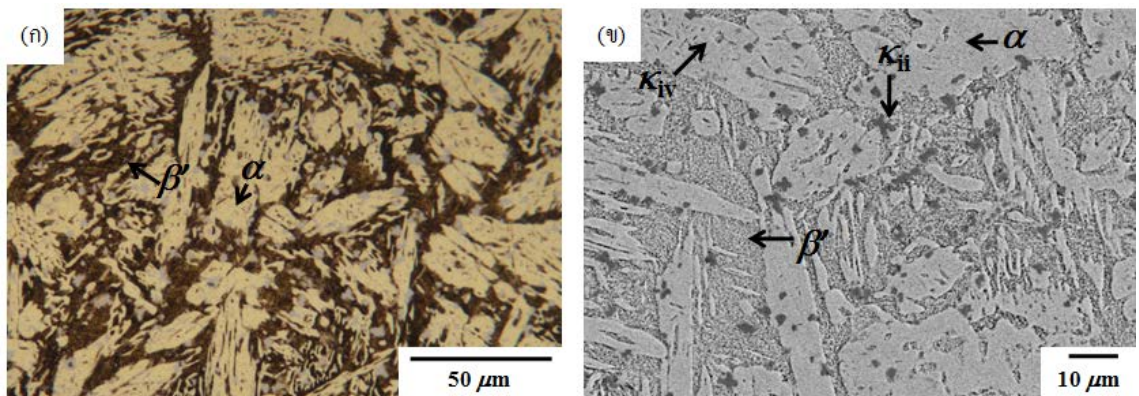
และโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $950^{\circ}\text{C}$  และ  $1,000^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ 4.7 (ก) ซึ่งงานหลังการทดสอบจะประกอบด้วยเฟส Widmanstätten  $\alpha$  และ  $\beta'$  รูปที่ 4.6 (ข) และ 4.7 (ข) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE พบว่าภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการทดสอบไม่พบบริเวณที่มีสีเทาเข้ม หรือไม่ปรากฏเฟส  $\kappa$

การทดสอบทางความร้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน พบว่ามีความสอดคล้องกับแผนผังการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ในระหว่างการเย็นตัว (รูปที่ 2.3) ในช่วงอัตราการเย็นตัวระหว่าง  $1-10^3^{\circ}\text{C/s}$  สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคหลังการอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดังนี้

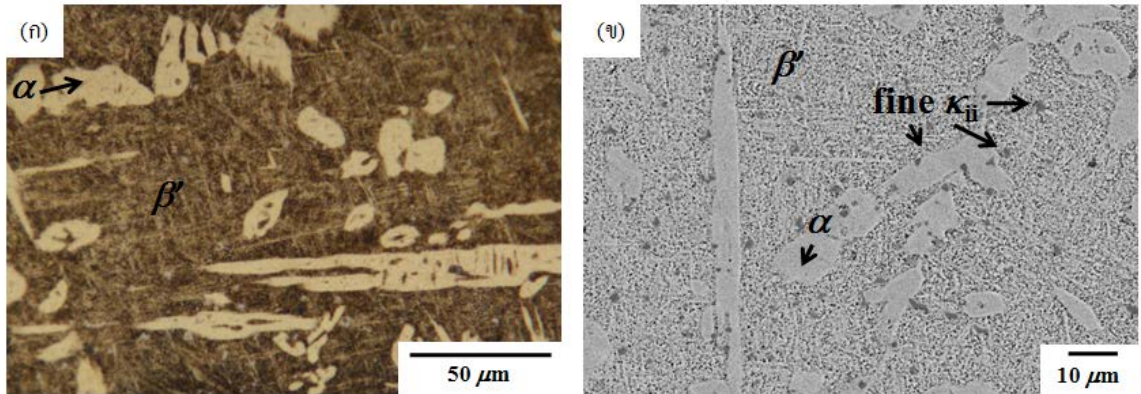
- เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ถึงอุณหภูมิระหว่าง  $800^{\circ}\text{C} - 860^{\circ}\text{C}$  และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่ได้จะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  (distorted  $\kappa_{\text{III}}$ ),  $\kappa_{\text{II}}$  และ  $\kappa_{\text{IV}}$
- เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ถึงอุณหภูมิระหว่าง  $860^{\circ}\text{C} - 930^{\circ}\text{C}$  และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่ได้จะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ , fine  $\kappa_{\text{II}}$  และ  $\beta'$
- เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ถึงอุณหภูมิระหว่าง  $930^{\circ}\text{C} - 1,000^{\circ}\text{C}$  และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่ได้จะประกอบด้วยเฟส Widmanstätten  $\alpha$  และ  $\beta'$



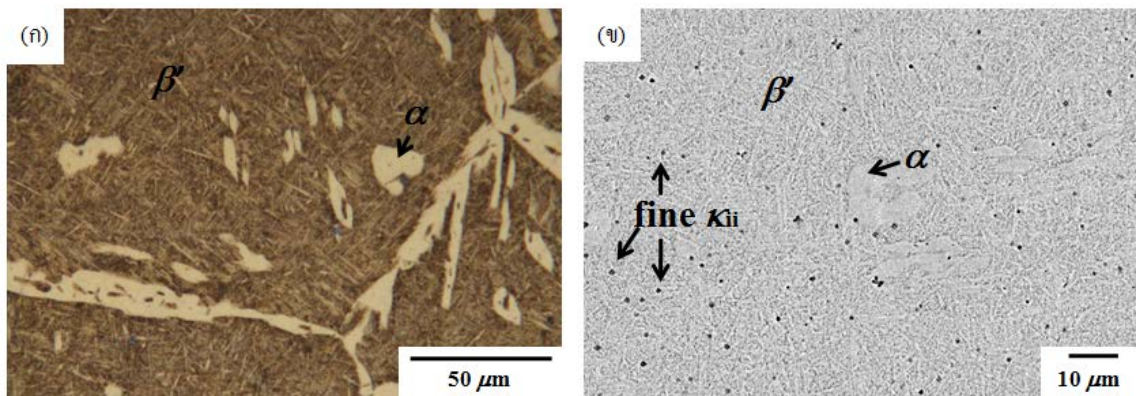
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



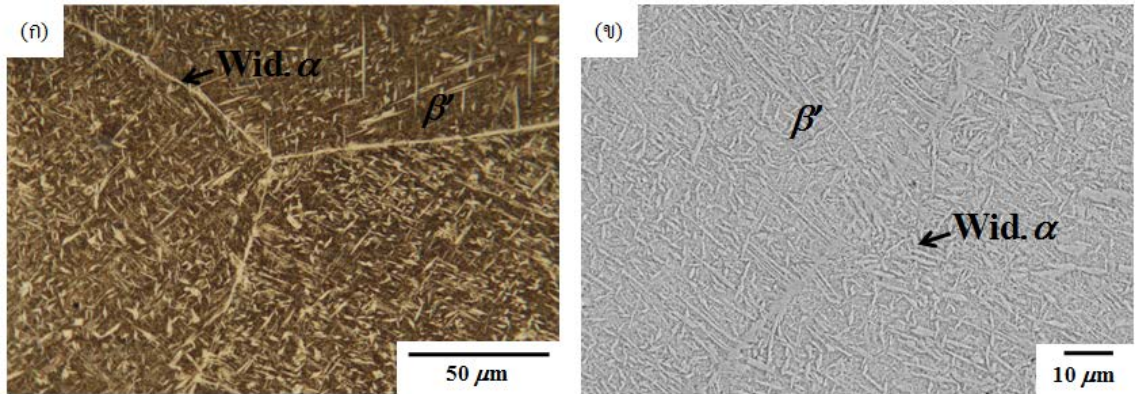
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



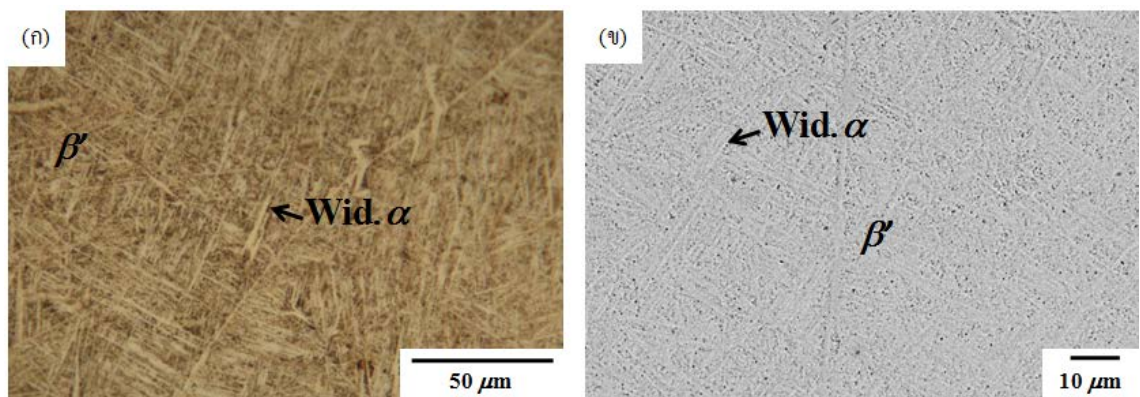
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



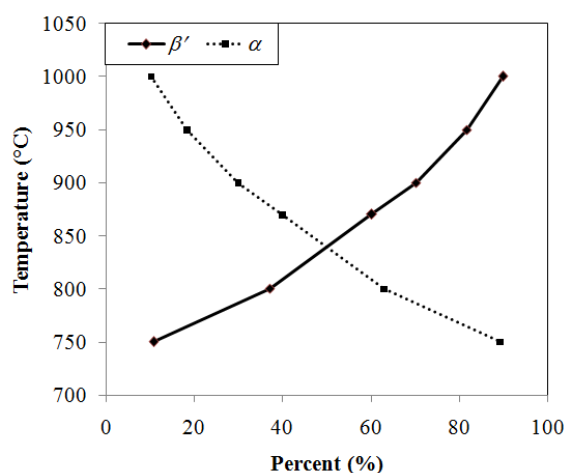
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมแมกนีเซียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



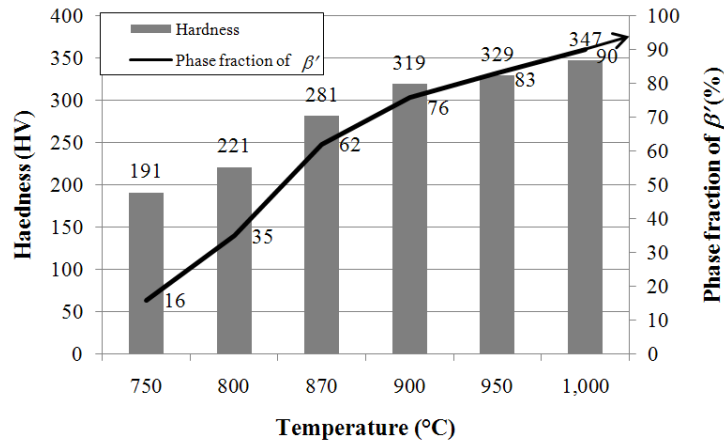
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมแมกนีเซียมบรอนซ์ หลังการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE

### 4.1.3 ความแข็งและเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส

หลังการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ ได้ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเปลี่ยนไป เพื่อศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณเฟสในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสแต่ละชิ้นงาน ชิ้นงานละ 10 จุด และหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส ดังแสดงในตารางที่ ค.1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟสในโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ โดยเมื่ออุณหภูมิรอบทางความร้อนเพิ่มขึ้นเฟส  $\alpha$  จะลดลง ในขณะที่เฟส  $\beta'$  จะเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้นการชุบขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณเฟส  $\beta'$  ในโครงสร้างจุลภาคมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความแข็งระดับมหภาคแบบวิกเกอร์ โดยทดสอบค่าความแข็งแต่ละชิ้นงาน ชิ้นงานละ 5 จุด และหาค่าเฉลี่ยความแข็งชิ้นงาน ดังแสดงในภาคผนวกที่ ง.1 จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเฟส  $\beta'$  โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส  $\beta'$  จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากเฟส  $\beta'$  มีโครงสร้างแบบมาเทนไซต์ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเฟส  $\beta'$  เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนในน้ำทะเลของวัสดุลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียม (Dealloying) [11] และการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการชุบขึ้นรูปร้อนของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จะช่วยควบคุมปริมาณเฟส  $\beta'$  ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ได้



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส  $\alpha$  และ  $\beta'$  ของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่ผ่านการอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส  $\beta'$  และค่าความแข็ง ของชิ้นงาน โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่ผ่านการทดสอบอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเขียนตัวอย่างรวดเร็ว

## 4.2 ผลการทดสอบการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

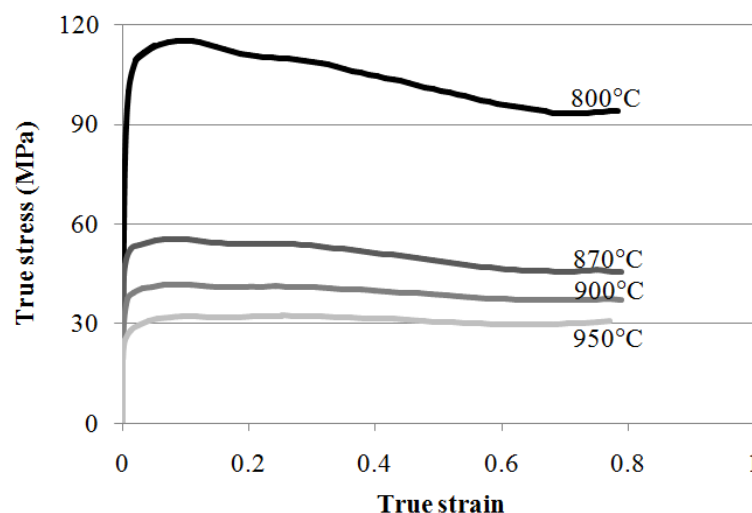
การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวในการกดขึ้นรูปร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ทดสอบโดยการกดขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิ 800, 870, 900 และ 950°C จากนั้นกดขึ้นงานด้วยอัตราความเครียดคงที่  $10 \text{ s}^{-1}$  เป็นระยะ 60% ของความสูงชิ้นงานทดสอบ แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน คือ 40 และ  $100^\circ\text{C/s}$  โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์ ผลที่ได้จากการทดสอบกดขึ้นรูปสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายใต้อุณหภูมิการขึ้นรูปและอัตราเร็วในการเย็นตัวต่างๆ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โครงสร้างจุลภาค ปริมาณเฟส และความแข็ง

### 4.2.1 กราฟความเค้นจริงและความเครียดจริง

จากรูปที่ 4.10 แสดงกราฟความเค้นจริงและความเครียดจริงของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ภายใต้การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทดสอบที่อัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน คือ 40 และ  $100^\circ\text{C/s}$  ดังแสดงในภาคตารางที่ จ.1 พบว่าพฤติกรรมของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์เมื่อเริ่มทำการกดขึ้นรูปร้อนชิ้นงานในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง ซึ่งคือช่วงอีลาสติก

(Elasticity) ค่าความเค้นในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียดแข็งและเมื่อถึงจุดความเค้นวิกฤตและเข้าสู่ช่วงพลาสติก (Plasticity) ค่าความเค้นจะเริ่มลดลงเนื่องจากการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ในเนื้อวัสดุ ทำให้กราฟความเค้นลดลง และเข้าสู่สภาวะสมำเสมอ [25] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rohatgi [27] คือโลหะผสมทองแดงและอะลูมิเนียมปริมาณสูง (6 wt.% Al) จะเกิดพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปเป็นแบบการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การทดสอบกดขึ้นรูปที่ช่วงอุณหภูมิ 800°C และ 870°C จะเกิดค่าความเค้นจริงสูงสุดต่างกันมาก ในขณะที่การทดสอบกดขึ้นรูปที่ช่วงอุณหภูมิ 870°C, 900°C และ 950°C ค่าความเค้นจริงสูงสุดที่เกิดขึ้นจะต่างกันน้อย แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 870°C ขึ้นไป ส่งผลต่อความเค้นในการขึ้นรูปของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์น้อยลง

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดวิกฤต ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ภายใต้การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างกันจะได้ค่าความเค้นสูงสุดที่แตกต่างกัน ค่าความเค้นจริงสูงสุดนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความเค้นในการทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปมีค่าลดลง และค่าความเครียดที่จุดสูงสุด หมายถึงความเครียดที่เกิดขึ้นที่ค่าความเค้นสูงสุด ของเส้นกราฟความเค้นจริงและความเครียดจริง พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความเครียดที่จุดสูงสุดขณะกดขึ้นรูปร้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงถึงซึ่งหมายถึงการเลื่อนโครงสร้างกลายเป็นเกรนใหม่สมบูรณ์ออกไป [25]



รูปที่ 4.10 กราฟความเค้นจริงและความเครียดจริง ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ภายใต้การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดวิกฤต ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ภายใต้การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการกดขึ้นรูปร้อน (°C)	ค่าความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{max}$ ; MPa)	ค่าความเครียดที่จุดสูงสุด ( $\epsilon_{peak}$ )
800	115.1	0.086
870	55.5	0.090
900	41.7	0.107
950	32.1	0.116

#### 4.2.2 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จากการทดสอบกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วเย็นตัวลงด้วยค่าเฉลี่ยอัตราการเย็นตัว  $40^{\circ}\text{C/s}$  ดังแสดงในภาคผนวกที่ ก.2 และค่าเฉลี่ยอัตราการเย็นตัว  $100^{\circ}\text{C/s}$  ดังแสดงในภาคผนวกที่ ก.3 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.18 และภาคผนวกที่ ข.2 พบว่าที่อุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อน  $800^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว  $40^{\circ}\text{C/s}$  โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้สังเกตเห็นลักษณะเกรนยึดตัวตามทิศทางการกด และโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$ ,  $\kappa_{\parallel}$  และ  $\kappa_{\perp}$  โดยรูปที่ 4.11 (ก) ปรากฏเฟส  $\alpha$  (สีเหลืองนวล) เป็นโครงสร้างหลัก และเฟส  $\beta'$  (สีดำ) และสามารถอธิบายโครงสร้างจุลภาคและเฟส  $\kappa$  ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) บริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาอ่อนจะมีทองแดงหนาแน่นคือเฟส  $\alpha$  เป็นโครงสร้างหลัก บริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาเข้มจะมีเหล็กและอะลูมิเนียมหนาแน่นคือเฟส  $\kappa_{\parallel}$  และเฟส  $\kappa_{\perp}$  โดยเฟส  $\kappa_{\parallel}$  จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม กระจายอยู่ตามขอบเกรนเฟส  $\alpha$  และเฟส  $\kappa_{\perp}$  จะมีลักษณะเป็นตะกอนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเฟส  $\alpha$  และบริเวณที่ปรากฏเป็นสีเทาปานกลางจะมีนิกเกิลและอะลูมิเนียมหนาแน่นคือเฟส  $\beta'$  และที่อุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อน  $800^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว  $100^{\circ}\text{C/s}$  จะเริ่มเกิดเฟส  $\beta'$  เนื่องจากเฟส  $\beta$  ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเปลี่ยนเป็นเฟส  $\alpha$  และ  $\kappa$  จึงเกิดเฟส  $\beta'$  ขึ้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิล

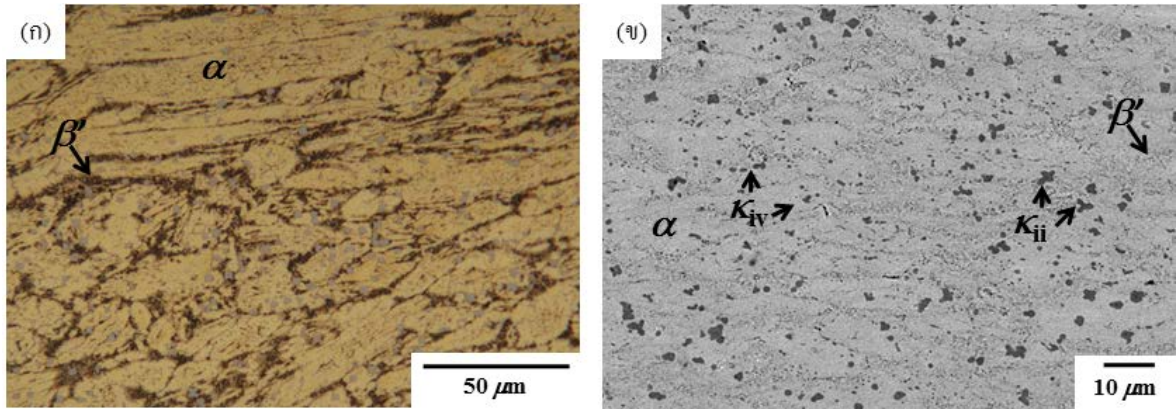
อะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$ ,  $\kappa_{II}$  และ  $\kappa_{IV}$  ลักษณะเกรนยึดตัวตามทิศทางการกดและเกรนมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ที่อุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อน 870°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  และ  $\kappa_{II}$  โดยเฟส  $\kappa_{II}$  มีขนาดเล็กลง และหากเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s จะเกิดเฟส  $\beta'$  มากขึ้น เกรนมีความละเอียดมากขึ้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้ประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  และเฟส  $\kappa_{II}$  ขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.14

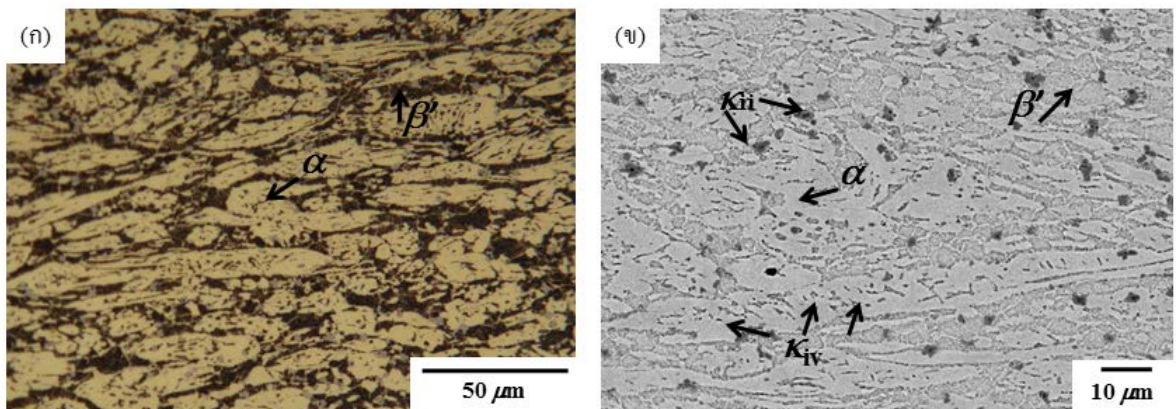
ที่อุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนที่ 900°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  และเฟส  $\kappa_{II}$  ขนาดเล็ก ในขณะที่การเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s เริ่มเกิดโครงสร้างแบบ Widmanstätten  $\alpha$  และไม่ปรากฏเฟส  $\kappa_{II}$  โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ ,  $\beta'$  และ Widmanstätten  $\alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 4.16

และที่อุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนที่ 950°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ , Widmanstätten  $\alpha$  และ  $\beta'$  ในขณะที่การเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s จะทำให้เฟส Widmanstätten  $\alpha$  และ  $\beta'$  มีความละเอียดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18

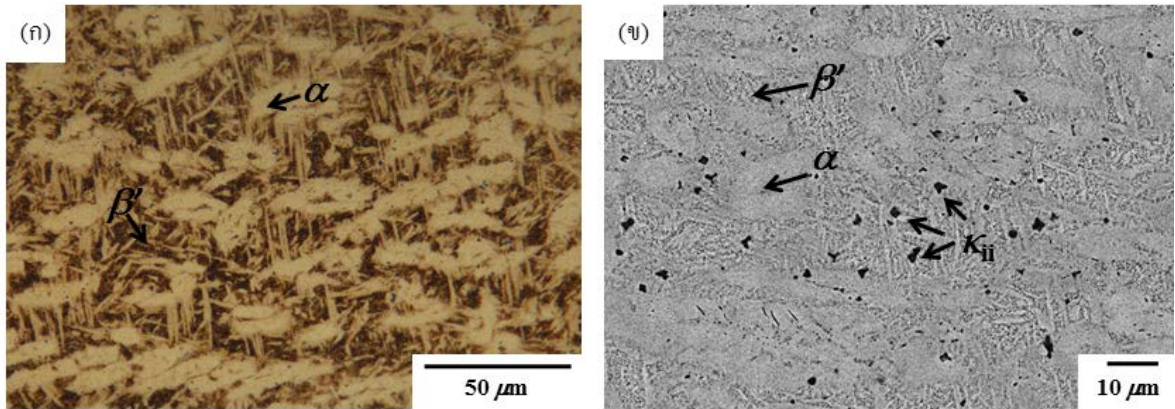
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนสามารถใช้กำหนดการเกิดเฟสและโครงสร้างจุลภาคแบบต่างๆได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ กับโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างกัน โดยโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 870°C และ 900°C (รูปที่ 4.13 – 4.16) เกิดเฟส  $\alpha$  ที่มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมและยึดตัวตามทิศทางการกด [11] ในขณะที่โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870°C และ 900°C โดยไม่มีการกดขึ้นรูป (รูปที่ 4.4 – 4.5) ไม่ปรากฏเฟส  $\alpha$  ลักษณะดังกล่าว เนื่องจากการกดขึ้นรูปร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟส  $\alpha$  นั้นเอง



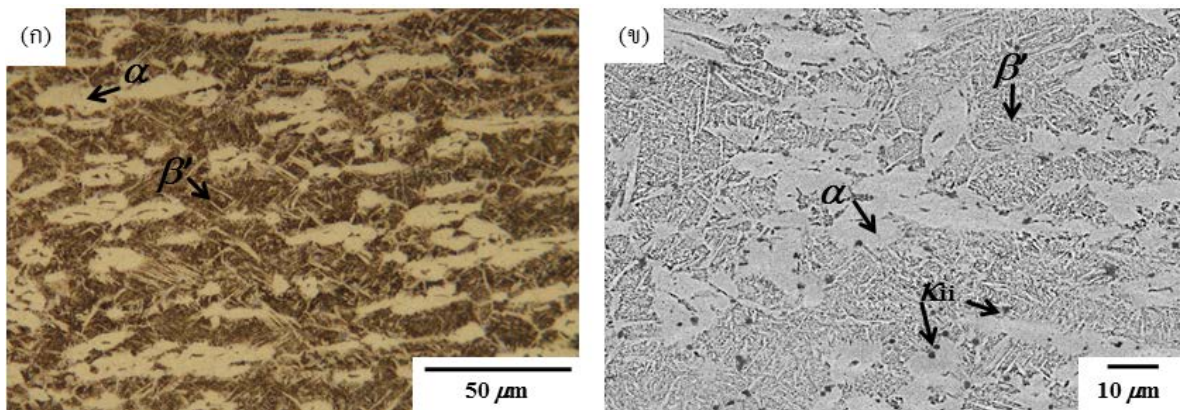
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



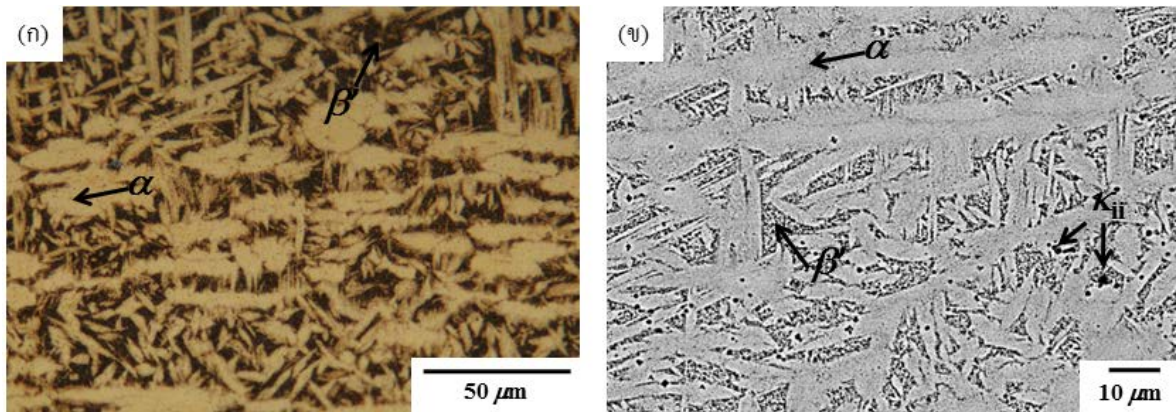
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



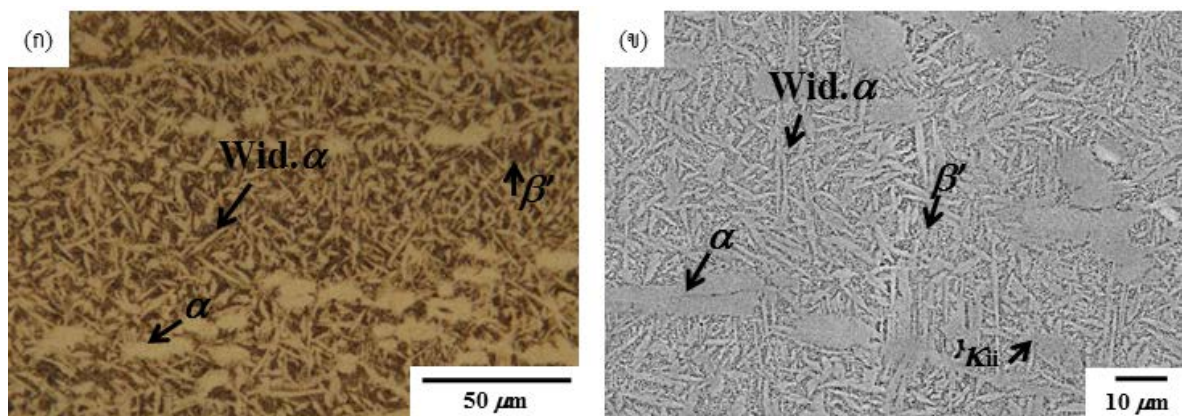
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 870°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



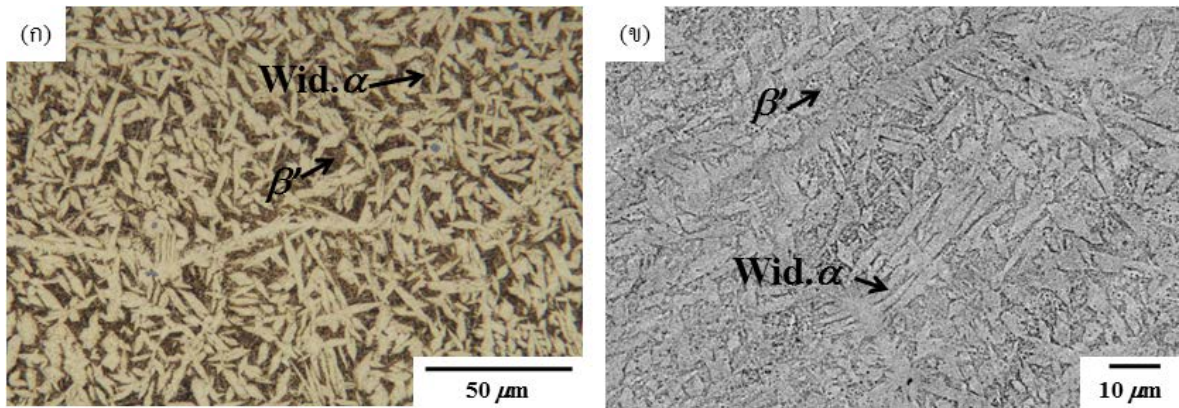
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 870°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



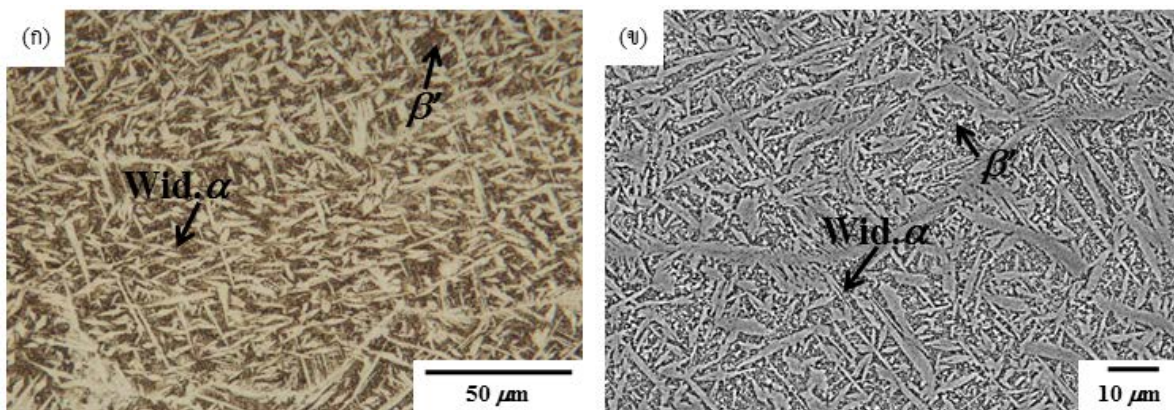
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 900°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 900°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s ที่ถ่ายด้วย  
 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



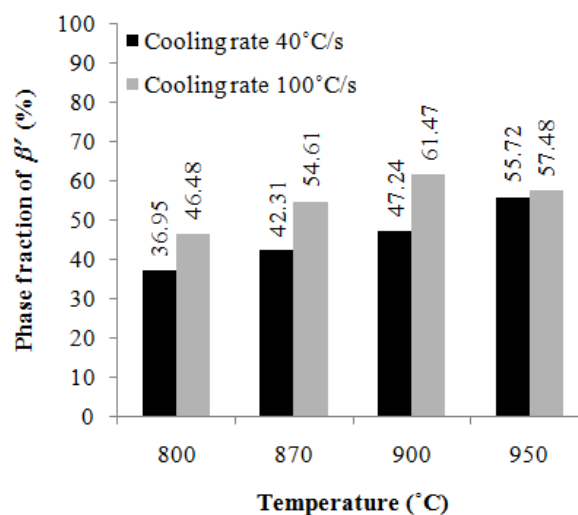
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 950°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s ที่ถ่ายด้วย  
(ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 950°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s ถ่ายด้วย  
(ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

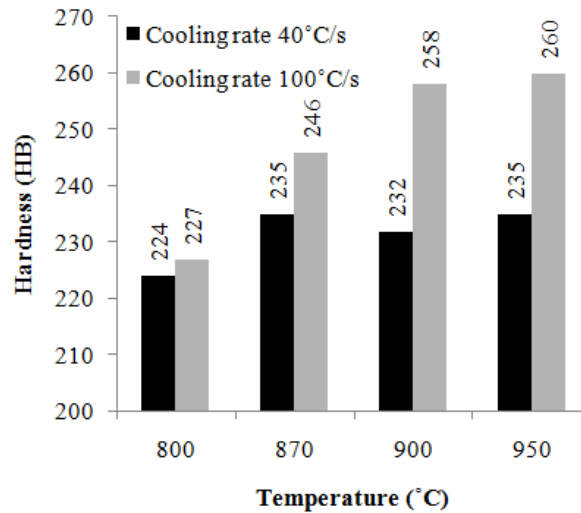
### 4.2.3 ความแข็งและเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส

การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวต่างๆ โดยหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสแต่ละชิ้นงาน ชิ้นงานละ 10 จุด และหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส ดังแสดงในตารางที่ ค.2 และตารางที่ ค.3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เฟส  $\beta'$  เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวที่สูง ( $100^{\circ}\text{C/s}$ ) จะทำให้ได้เฟส  $\beta'$  มากกว่าอัตราการเย็นตัวต่ำ ( $40^{\circ}\text{C/s}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แต่การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ  $950^{\circ}\text{C}$  และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว  $100^{\circ}\text{C/s}$  ปริมาณเฟส  $\beta'$  ลดลงเนื่องจากเกิดโครงสร้าง Widmanstätten  $\alpha$  มากขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความแข็ง ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ หลังการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวต่างๆ โดยทดสอบความแข็งแต่ละชิ้นงาน ชิ้นงานละ 3 จุด และหาค่าเฉลี่ยความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ ง.2 พบว่าค่าความแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเฟส  $\beta'$  ที่มากขึ้น และอัตราการเย็นตัวที่สูง ( $100^{\circ}\text{C/s}$ ) จะทำให้ได้โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีค่าความแข็งมากกว่าอัตราการเย็นตัวต่ำ ( $40^{\circ}\text{C/s}$ ) เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงทำให้ได้โครงสร้างที่มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส  $\beta'$

และอุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและอุณหภูมิการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (การแปลงหน่วยค่าความแข็งจาก HV เป็น HB จากรูปที่ 4.9) และค่าความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ (รูปที่ 4.20) ได้ค่าความแข็งสรุปดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C และชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวต่างๆ มีโครงสร้างจุลภาคไม่ต่างกันนัก แต่ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 800°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s มีปริมาณเฟส  $\beta'$  สูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ  $\beta'$  ของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบที่อุณหภูมิ 800°C เนื่องจากการกดขึ้นรูปทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟส  $\alpha$  เป็นเฟส  $\beta$  มากขึ้น และเมื่อเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s จึงมีปริมาณเฟส  $\beta'$  สูงขึ้น ซึ่งค่าความแข็งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเฟส  $\beta'$  ส่วนชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 900°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปริมาณเฟส  $\beta'$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 870 และ 900°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40 และ 100°C/s ปริมาณเฟส  $\beta'$  เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากการกดขึ้นรูปทำให้เกิดเฟส  $\alpha$  มากกว่าโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ไม่มีการกดขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ไม่มีการกดขึ้นรูปมีค่าสูงกว่า แต่ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 950°C

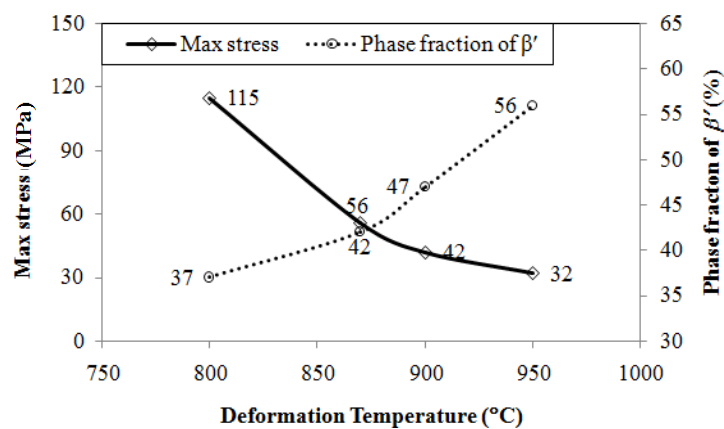
พบว่าที่อัตราการเย็นตัว  $100^{\circ}\text{C/s}$  มีปริมาณเฟส  $\beta'$  น้อยกว่าที่อัตราการเย็นตัว  $40^{\circ}\text{C/s}$  เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดโครงสร้าง Widmanstätten  $\alpha$  มากขึ้น และค่าความแข็งมากขึ้นด้วย นั่นหมายถึงอิทธิพลในกระบวนการขึ้นรูปร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ นอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปร้อนแล้ว ยังประกอบด้วยอัตราที่ใช้ในการเย็นตัวหลังการขึ้นรูปร้อนอีกด้วย โดยการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีปริมาณเฟส  $\beta'$  มากขึ้น และหากเย็นตัวหลังการขึ้นรูปด้วยอัตราการเย็นตัวสูงจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีความละเอียดมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเฟส Widmanstätten  $\alpha$  ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งมากขึ้นด้วย

**ตารางที่ 4.2** การเปรียบเทียบค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส  $\beta'$  ของชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

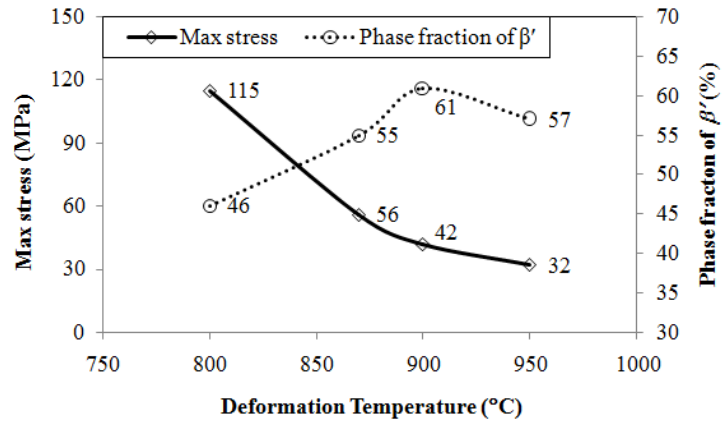
การทดสอบ	อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวด้วยอัตรา $260^{\circ}\text{C/s}$		กดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวด้วยอัตรา $100^{\circ}\text{C/s}$		กดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวด้วยอัตรา $40^{\circ}\text{C/s}$	
	ค่าความแข็ง (HB)	ปริมาณเฟส $\beta'$ (%)	ค่าความแข็ง (HB)	ปริมาณเฟส $\beta'$ (%)	ค่าความแข็ง (HB)	ปริมาณเฟส $\beta'$ (%)
800 °C	224	35	227	46	224	37
870 °C	281	62	246	54	235	42
900 °C	322	76	258	61	232	47
950 °C	328	83	260	57	235	56

#### 4.2.4 ความเค้นในการขึ้นรูปร้อนโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

รูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการขึ้นรูป ความเค้นที่ใช้ในการขึ้นรูป และเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส  $\beta'$  ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40 และ 100°C/s ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น ความเค้นที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยกว่า 870°C อัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นที่ใช้ในการขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การกดขึ้นรูปร้อน และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น ปริมาณเฟส  $\beta'$  เพิ่มมากขึ้น แต่การกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 950°C และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s ปริมาณเฟส  $\beta'$  ลดลงเนื่องจากเกิดโครงสร้าง Widmanstätten  $\alpha$  มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงและอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และหากอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปมากกว่า 870°C อัตราการเพิ่มขึ้นของเฟส  $\beta'$  จะเพิ่มสูงขึ้น สรุปได้ว่าการขึ้นรูปร้อนโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมिन้อยกว่า 870°C ต้องใช้ความเค้นมากในการขึ้นรูปร้อน และหากทำการขึ้นรูปร้อนโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 870°C จะทำให้ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายหลังการขึ้นรูปมีปริมาณเฟส  $\beta'$  สูง ดังนั้นอุณหภูมิ 870°C จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปร้อนของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้ในงานนี้ และการกดขึ้นรูปร้อน และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 100°C/s พบว่าอัตราการเย็นตัวสูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเฟส  $\beta'$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นภายหลังการขึ้นรูปร้อนโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ จึงควรวี้อัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ เพื่อลดการเกิดเฟส  $\beta'$  ภายหลังการขึ้นรูป ซึ่งจะช่วยให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเค้นที่ใช้ในการขึ้นรูป และปริมาณเฟส  $\beta'$  ของการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว 40°C/s



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเค้นที่ใช้ในการขึ้นรูป และปริมาณเฟส  $\beta'$  ของการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัว  $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$