

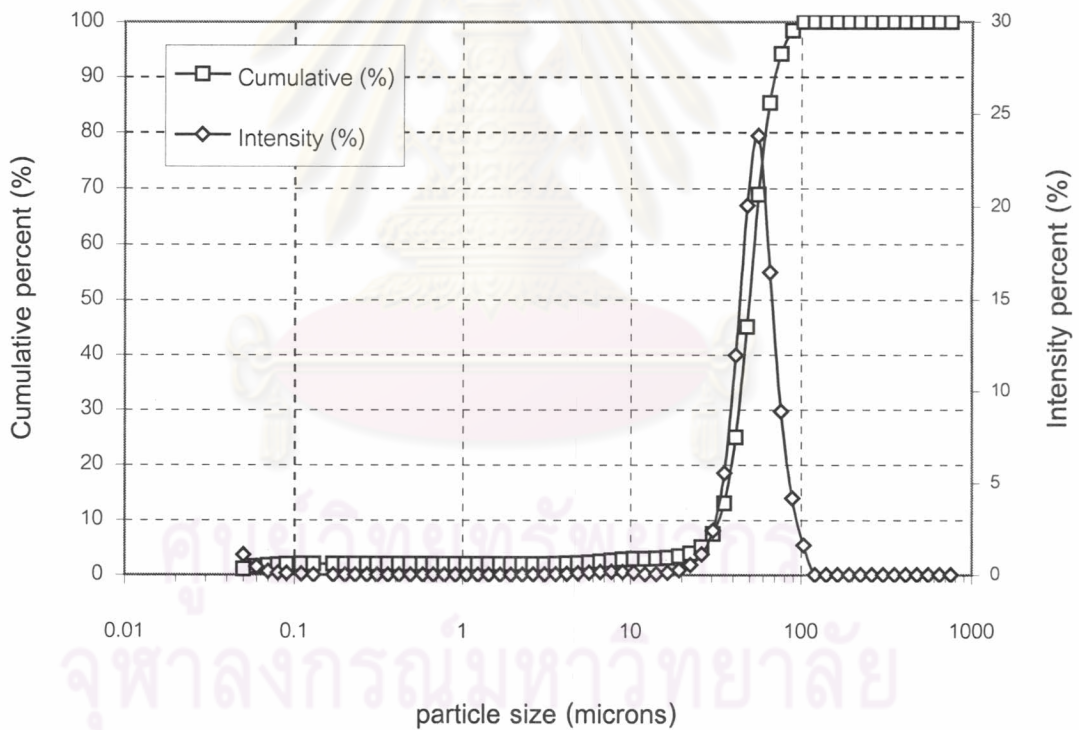
บทที่ 4

ผลการทดลอง

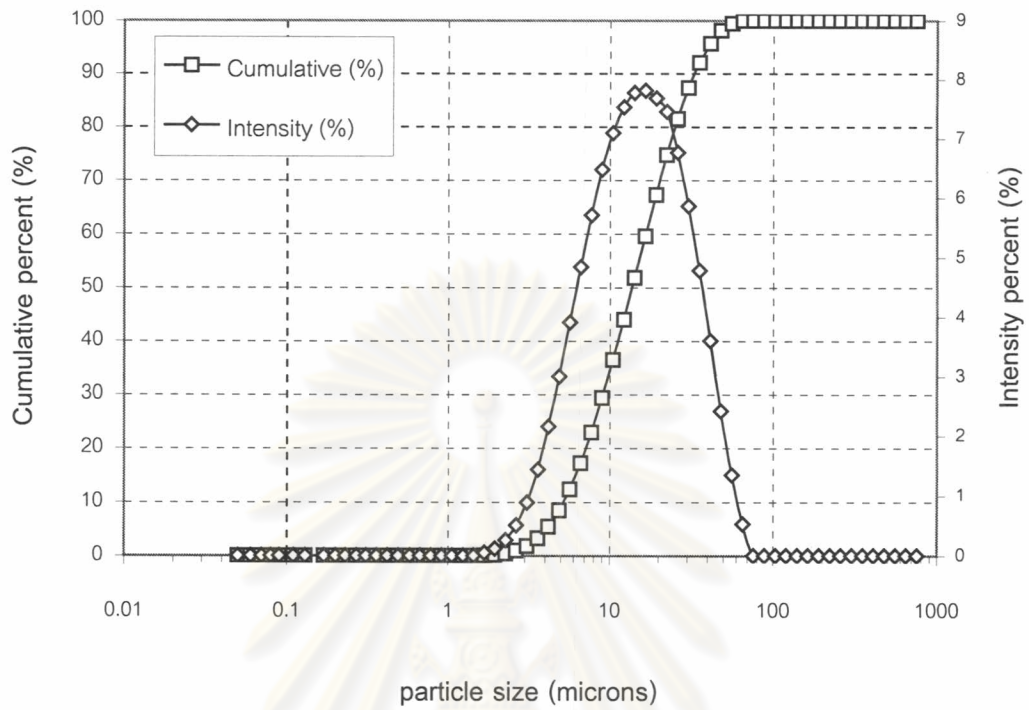
4.1 โลหะผง

โลหะผงที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์โลหะจำรูปได้แก่ โลหะผง Ti และ Ni รูปที่ 4-1 แสดงตัวอย่างผลการทดลองหาขนาดโลหะผง Ti และ Ni ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง ขนาดของผงโลหะ Ti มีขนาดประมาณ 3 เท่าของ Ni คือ ประมาณ 59.6 และ 19.6 ไมครอนตามลำดับ รูปที่ 4-2 แสดงผลการทดลองหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะผง Ti และ Ni

ก)



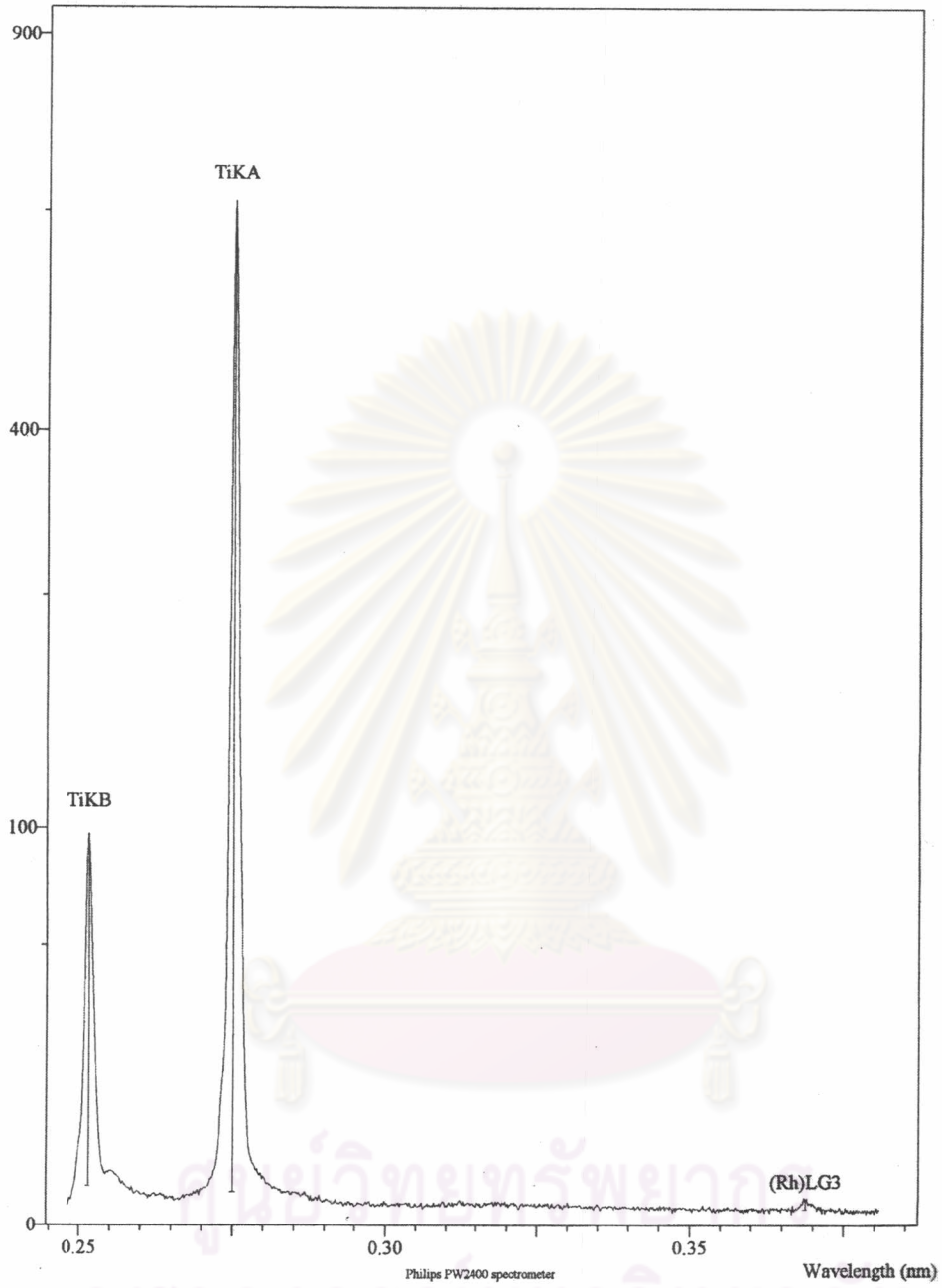
ข)



รูปที่ 4-1 แสดงตัวอย่างผลการทดลองหาขนาดโลหะผง Ti และ Ni ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง ก) Ti ข) Ni

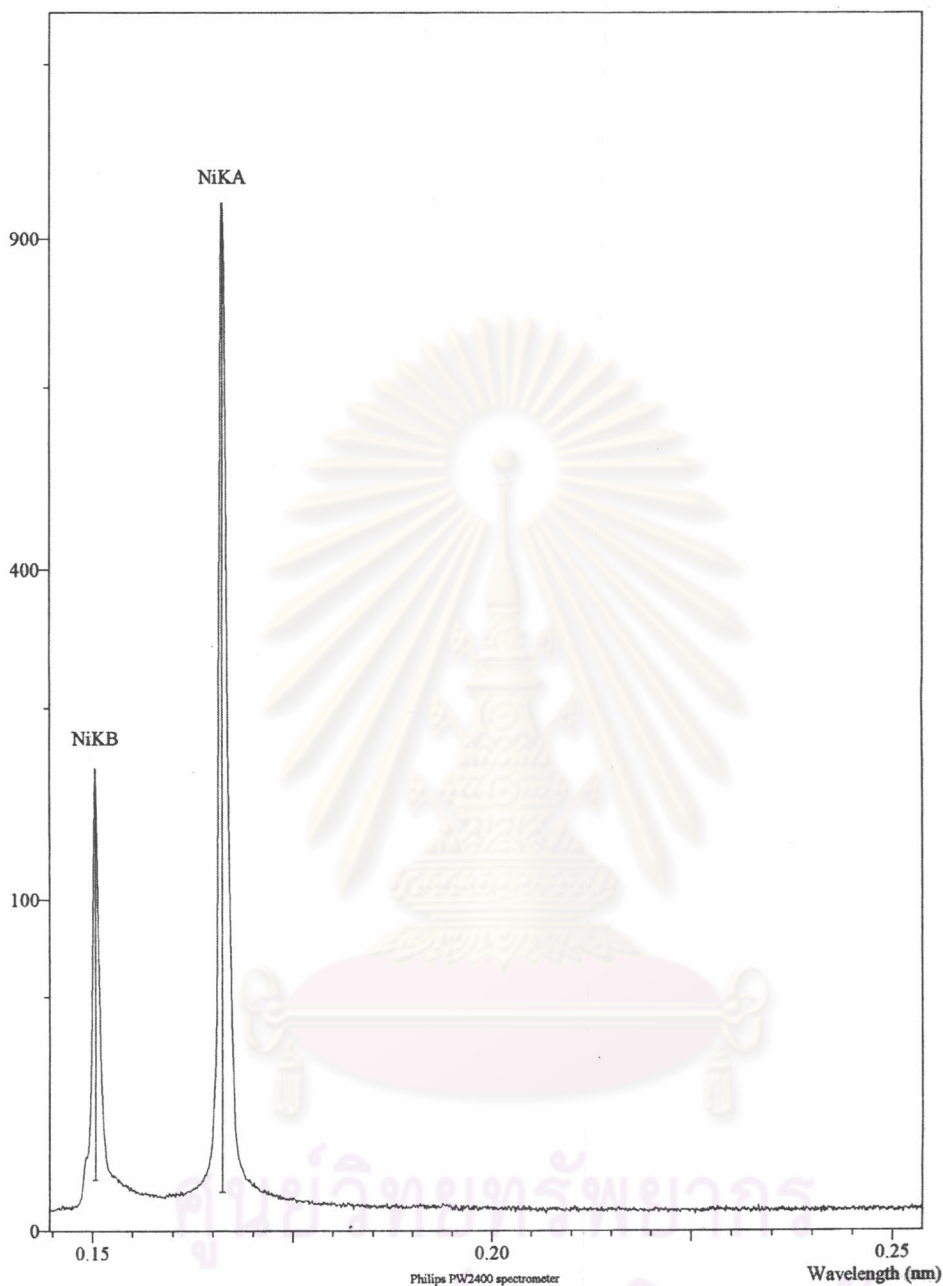
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข)



รูปที่ 4-2 แสดงผลการทดลองหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะผงที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

ก) โลหะผง Ni ข) โลหะผง Ti

โลหะผงทั้งสองชนิดที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค X-rays fluorescence ไม่พบธาตุผสมในโลหะผงในปริมาณมากพอที่จะสามารถตรวจพบได้ แม้จะทำการเจือจางด้วยสารละลายมากแล้วก็ตาม

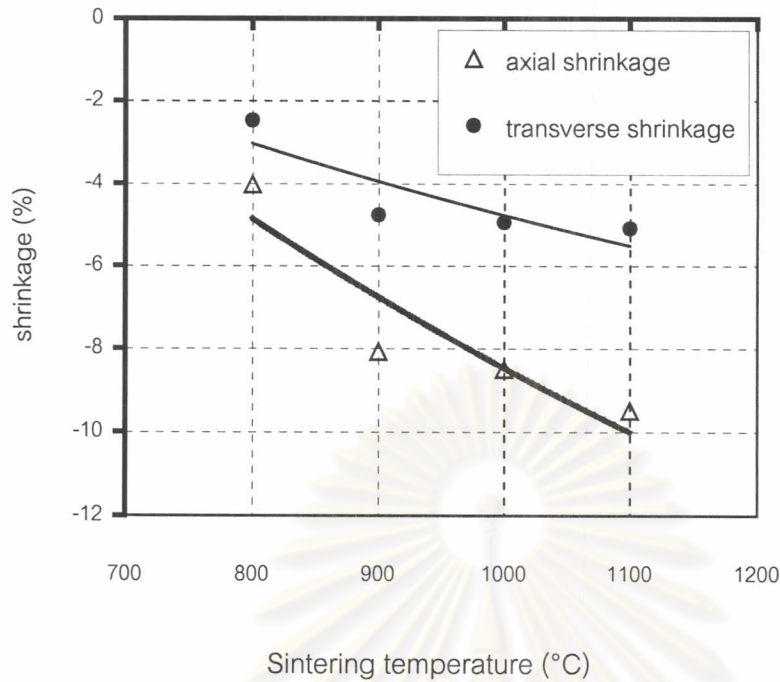
4.2 การยุบตัว

เมื่อผ่านการเผาประสานชิ้นงานจะมีการยุบตัวอันเนื่องมาจากการประสานกันภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานภายหลังการเผาประสานแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงการปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศตามแนวการอัดและตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่างกัน

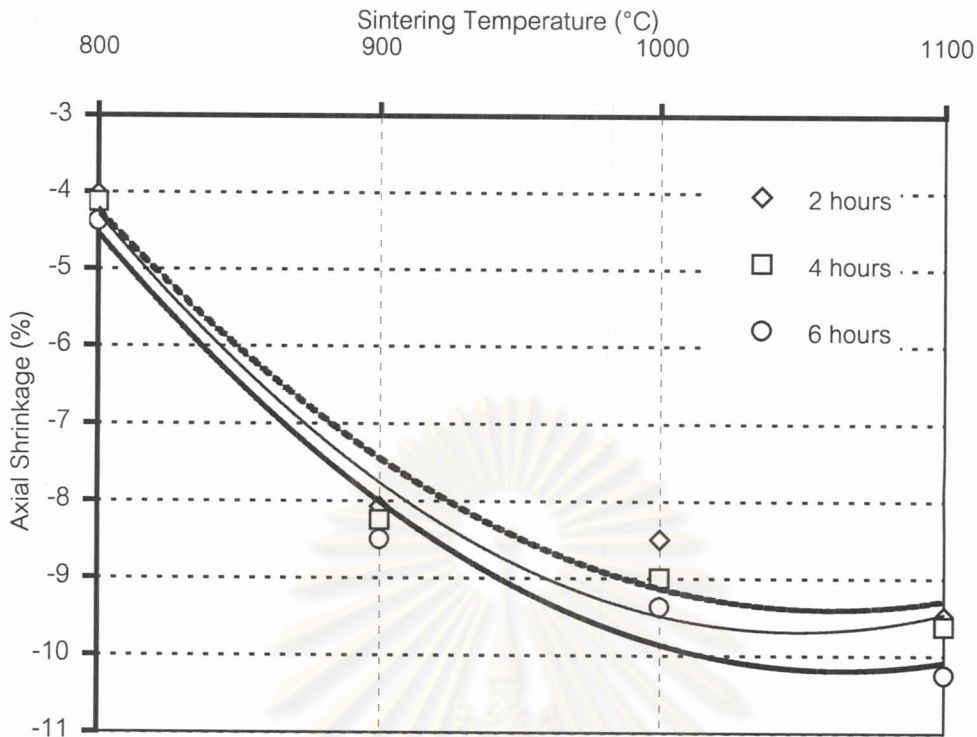
อุณหภูมิการเผา ประสาน (°C)	เวลาในการเผาประสาน (ชั่วโมง)					
	2		4		6	
	Axial shrinkage (%)	Transverse shrinkage (%)	Axial shrinkage (%)	Transverse shrinkage (%)	Axial shrinkage (%)	Transverse shrinkage (%)
800	-4.025	-2.471	-4.125	-2.588	-4.375	-2.824
900	-8.075	-4.765	-8.250	-5.000	-8.500	-5.176
1000	-8.500	-4.941	-9.000	-5.176	-9.375	-5.412
1100	-9.500	-5.094	-9.625	-5.294	-10.250	-5.882

การยุบตัวในทิศขนานกับแนวการอัดมีค่ามากกว่าการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดในทุกเงื่อนไขการเผาประสาน ปริมาณการยุบตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเผาประสานมากกว่าเวลาการเผาประสาน โดยที่อุณหภูมิ 800 °C มีปริมาณการยุบตัว 4.025% เมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานจาก 2 เป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ปริมาณการยุบตัวในทิศขนานกับแนวการอัดเพิ่มขึ้น 0.1 และ 0.35%ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาประสานเป็น 900, 1000 และ 1100 °C ปริมาณการยุบตัวในทิศขนานกับแนวการอัดเพิ่มขึ้น 4.05, 0.425 และ 1.0% ตามลำดับ โดยรูปที่ 4-3 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงานที่เผาประสานเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิเผาประสานต่างกัน



รูปที่ 4-3 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน

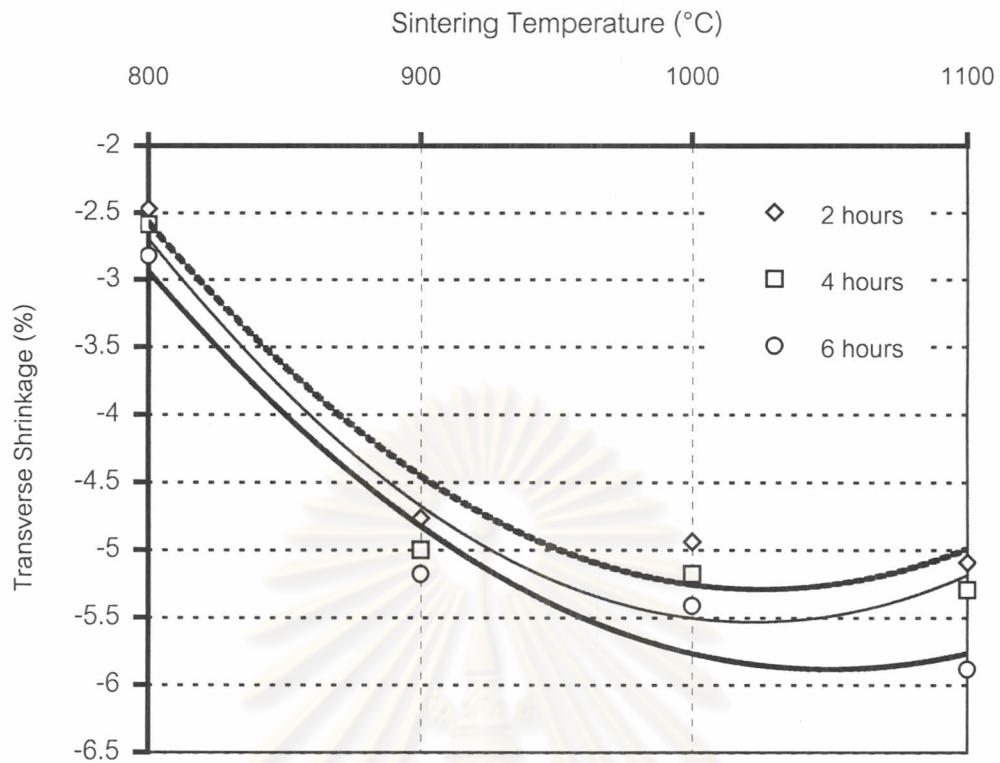
จากรูปที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาประสาน โดยปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศทางขนานกับแนวการอัดมีค่ามากกว่าในทิศทางตั้งฉากกับแนวการอัด โดยที่ 1100 °C ปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศทางขนานกับแนวการอัดมีค่าเท่ากับ 9.5% และปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดมีค่าเท่ากับ 5.094% ค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศขนานและตั้งฉากกับแนวการอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาประสานเพิ่มขึ้น



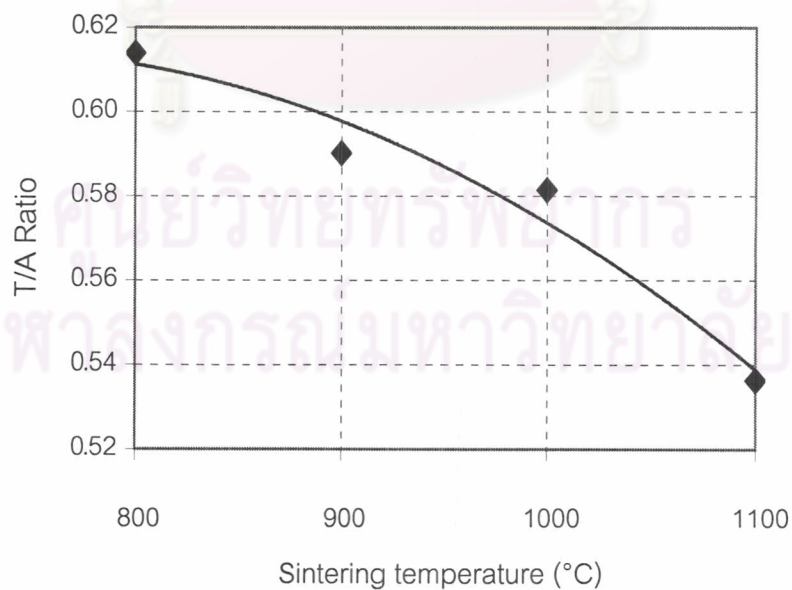
รูปที่ 4-4 แสดงปริมาณการยุบตัวในทางขนานกับแนวการอัดของชิ้นงาน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน

จากแนวโน้มของปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศทางขนานกับแนวการอัดที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานมีผลต่อปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานมากกว่าอิทธิพลของเวลาการเผาประสาน โดยปริมาณการยุบตัวในทิศทางขนานกับแนวการอัดของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงมีค่าแตกต่างกันน้อย เช่น ที่ 900 °C ปริมาณการยุบตัว 8.075, 8.250 และ 8.500 % ตามลำดับ

รูปที่ 4-5 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงาน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน และการยุบตัวของชิ้นงานอยู่ในช่วง 2-6% ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเผาประสาน เมื่อนำผลปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศทางขนานกับแนวการอัดมาเปรียบเทียบกับปริมาณการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดพบว่าการยุบตัวในทิศตามแนวการอัดมีปริมาณมากกว่าในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดโดย รูปที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของเงื่อนไขการเผาประสานต่ออัตราส่วนระหว่างปริมาณการยุบตัวในทิศตั้งฉากและตามแนวการอัด (T/A ratio) ค่าอัตราส่วน T/A มีค่าน้อยกว่า 1.0 เนื่องจากการยุบตัวในทิศขนานกับแนวการอัดมีค่ามากกว่าการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัด ค่าอัตราส่วน T/A ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเผาประสานโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.53-0.62 ที่อุณหภูมิเผาประสาน 1100 °C ค่าอัตราส่วน T/A มีค่าเข้าใกล้ 0.5 ซึ่งหมายถึงความแตกต่างระหว่างการยุบตัวทั้งสองแนวมีค่ามากกว่ากันเกือบเท่าตัว

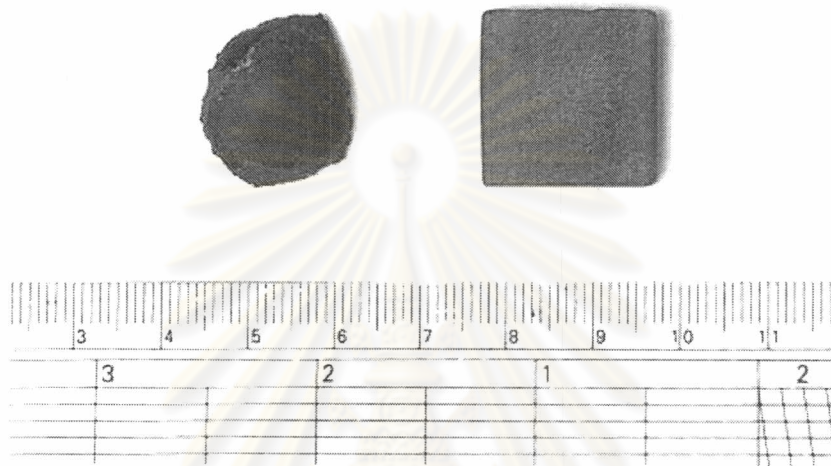


รูปที่ 4-5 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงาน 50 atom% Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานด้วยเวลาเผาประสาน 2 ชั่วโมงต่ออัตราส่วน ระหว่างปริมาณการยุบตัวในทิศตามและตั้งฉากกับแนวการอัด (T/A ratio)

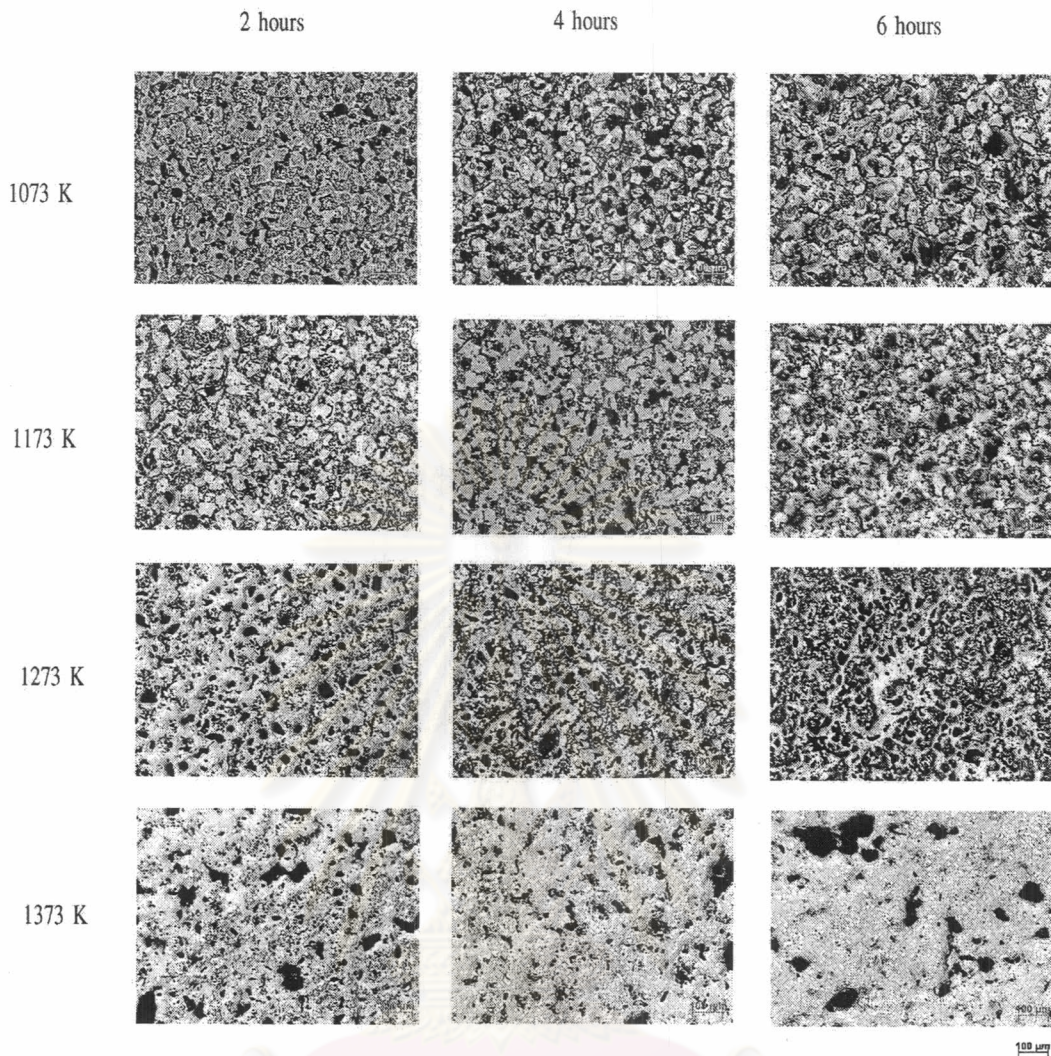
อัตราการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก็มีผลต่อการยุบตัวของชิ้นงานโดยอัตราการให้ความร้อนที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาทีพบว่าชิ้นงานเสียรูปร่างไปโดยมีลักษณะคล้ายโดมและมีส่วนหนึ่งแฟรซิมลงไป ในถาดรองอะลูมินา สำหรับชิ้นงานที่ผ่านอัตราการให้ความร้อน $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ชิ้นงานยังคงรูปร่างลักษณะเดียวกับรูปร่างก่อนการเผาประสานไว้ได้



รูปที่ 4-7 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเผาประสานโดยมีอัตราการให้ความร้อนต่างกัน (ซ้าย $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ขวา $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที)

4.3 โครงสร้างจุลภาค

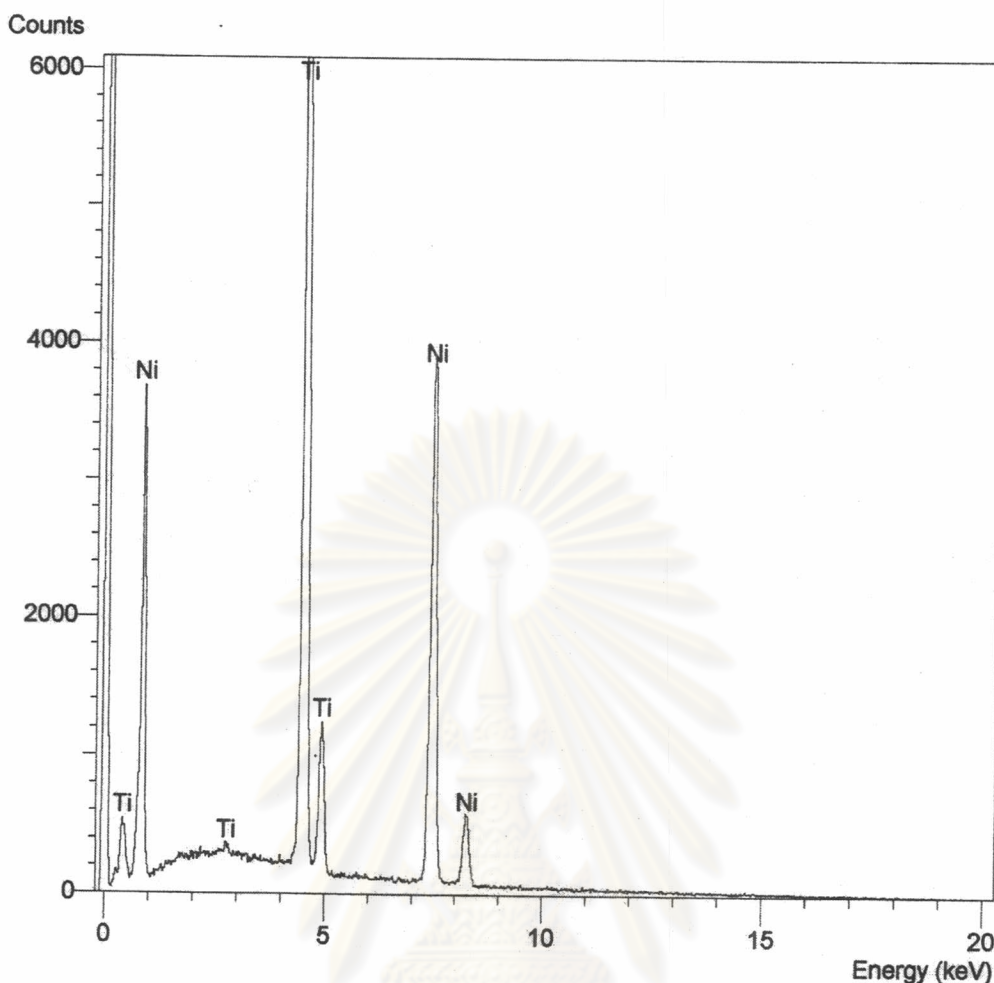
ผลการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม $50\text{ at}\%\text{Ni} - \text{Ti}$ ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ $800, 900, 1000$ และ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4-8 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ โลหะผสมยังคงไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดโครงสร้าง ด้วยระยะเวลาการเผาประสานที่ต่างกันทำให้ปริมาณเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน สำหรับอุณหภูมิเผาประสานที่สูงขึ้นและระยะเวลาการเผาประสานที่นานขึ้นมีแนวโน้มที่จะได้โครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามเฟส Ni_3Ti มีแนวโน้มที่จะยังคงปรากฏอยู่แม้จะใช้อุณหภูมิการเผาประสานสูงและ/หรือใช้ระยะเวลาการเผาประสาน 6 ชั่วโมงแล้วก็ตามภาพขยายของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4-8 แสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 4-8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผา
 ประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000, 1100 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

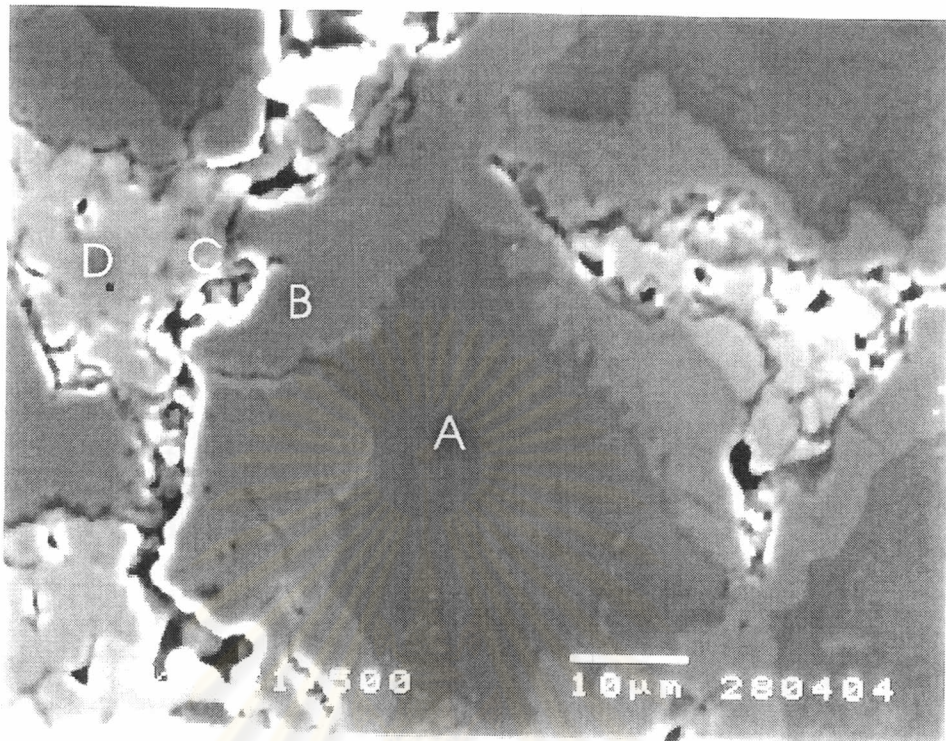
เมื่อสังเกตรูพรุนในโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิเผาประสาน 800, 900 และ 1000 °C
 รูพรุนมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยขนาดของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเผา
 ประสานยาวนานขึ้น แต่สำหรับที่ 1100 °C เมื่อเวลาการเผาประสานยาวนานขึ้นรูพรุนมีขนาดใหญ่
 ขนาดใหญ่ขึ้นมีจำนวนน้อยลงและมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการเผาประสานที่ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงมาทดสอบหาส่วน
 ผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ที่เป็นพื้นพบว่ามามีค่า 49.86 atom%Ni – 50.14 atom%Ti ซึ่งแสดงให้เห็นว่า
 เฟสส่วนใหญ่เป็น NiTi ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกับ 50.0 atom%Ni ซึ่งเป็นส่วนผสมเคมีตั้งต้น
 รูปที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ของชิ้นงานดังกล่าว



รูปที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ของ 50.0 atom%Ni ที่ผ่านการเผาประสานที่ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

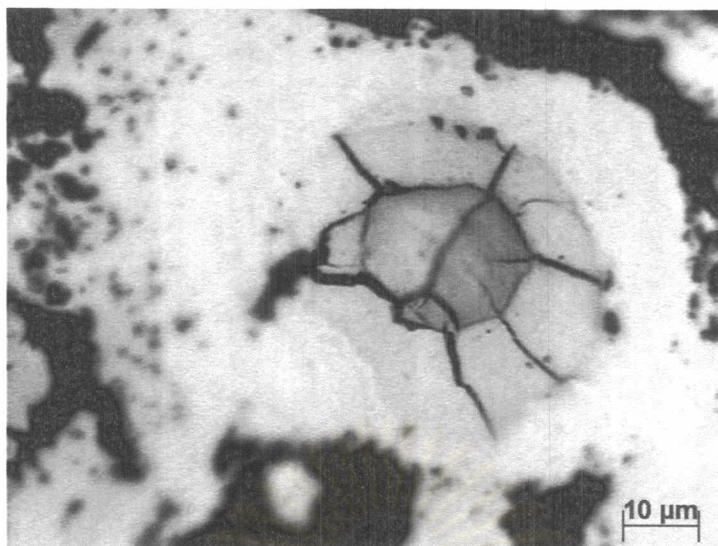
จากการพิจารณาภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดที่กำลังขยายสูงขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงพบว่าโครงสร้างจุลภาคยังคงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีการเรียงตัวของเฟสเป็นชั้น รูปที่ 4-10 แสดงการเรียงตัวของเฟสต่าง ๆ มีลักษณะเป็นชั้นของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานไปทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีในแต่ละบริเวณ พบว่ามีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป โดยที่บริเวณ A มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 99.41 atom%Ti ที่บริเวณ B มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 67.04 atom%Ti ที่บริเวณ C มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 10.12 atom%Ti และที่บริเวณ D มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 1.80 atom%Ti ผลการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีในบริเวณต่าง ๆ ด้วยเทคนิค EDX แสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4-10 แสดงการเรียงตัวของเฟสต่าง ๆ มีลักษณะเป็นชั้นของชั้นงานที่ผ่านการเผา
 ประสานที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4-10 พบว่าบริเวณ B หรือบริเวณที่มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 67.04 atom\%Ti
 ปรากฏรอยแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาค และทำนองเดียวกันชั้นงานที่ประกอบไปด้วยเฟสลักษณะ
 เดียวกันนี้มักจะปรากฏรอยแตกร้าวภายในเฟส รอยแตกร้าวเหล่านี้จะปรากฏได้ทั่วไปในชั้นงานผ่าน
 การเตรียมด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายและผงอะลูมินา รูปที่ 4-11 แสดงภาพถ่ายบริเวณเฟสที่มี
 การแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาคซึ่งทำให้เฟสที่อยู่ภายในหลุดออกจากผิวหน้าชั้นงาน

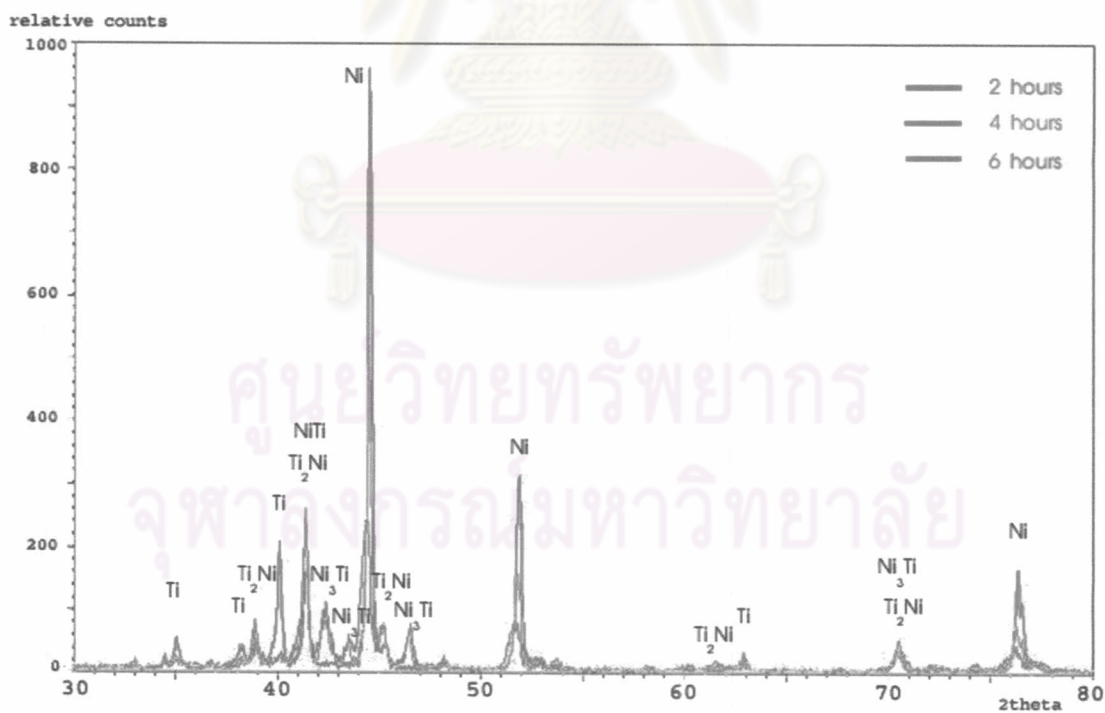
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-11 แสดงภาพถ่ายบริเวณเฟส ที่มีการแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาค

4.4 ผลการวิเคราะห์เฟส

4.4.1 ผลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณเฟส

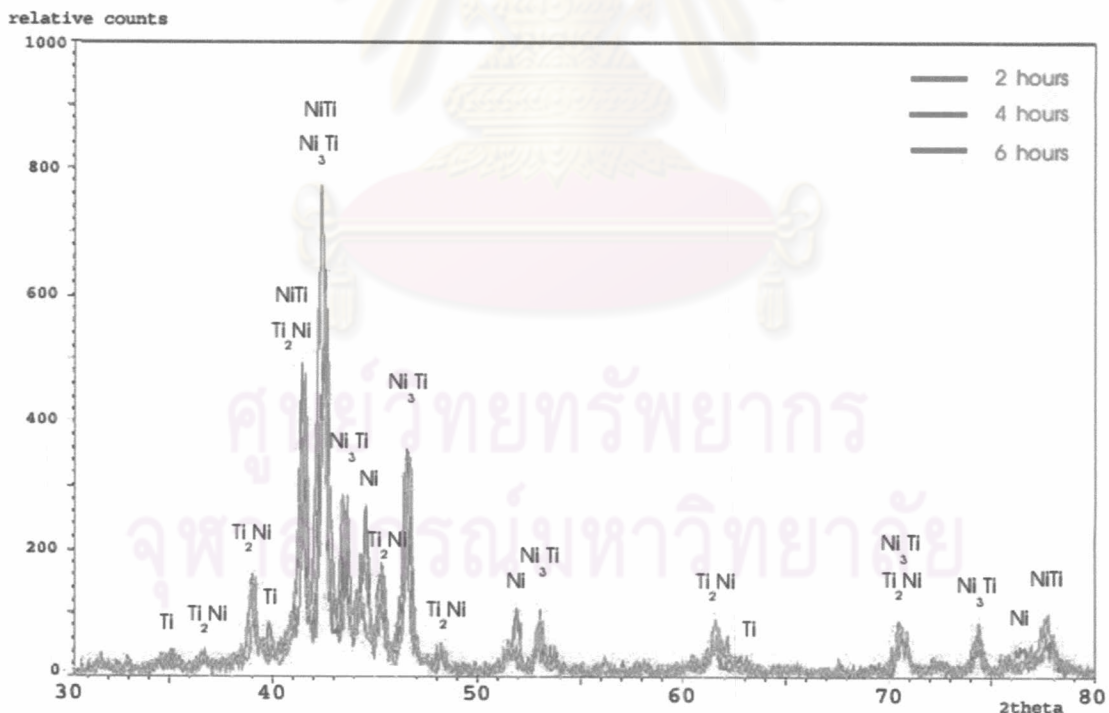


รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 at%Ni - Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4-12

จากรูปที่ 4-12 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงยังคงมีเฟสส่วนใหญ่เป็น Ni และ Ti ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาค และเมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานเป็น 4 ชั่วโมง โครงสร้างส่วนหนึ่งได้เริ่มเปลี่ยนเป็นเฟส Ni₃Ti และ Ti₂Ni และการเปลี่ยนแปลงนี้ปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานเป็น 6 ชั่วโมง

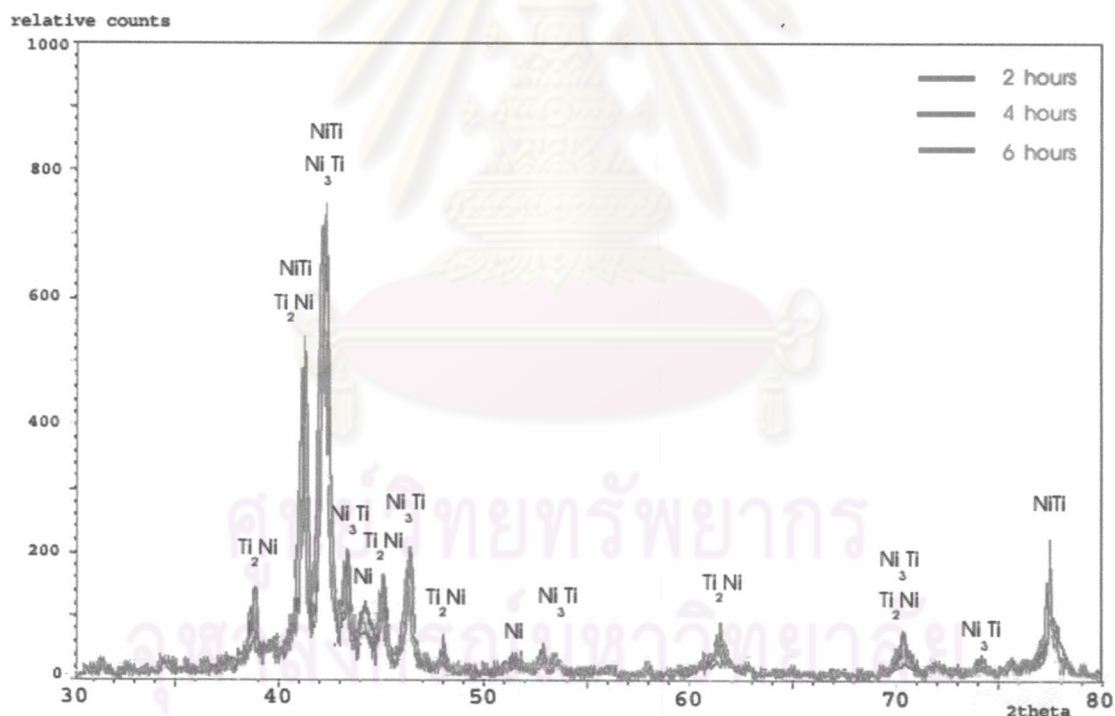
ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni–Ti ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 900 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4-13 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาประสานเป็น 900 °C ผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาประสานมีผลทำให้กระบวนการเผาประสานเดินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารภายในชิ้นงานสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงประกอบไปด้วยเฟส ได้แก่ Ni, Ni₃Ti, NiTi, Ti₂Ni, Ti และเมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานเป็น 4 และ 6 ชั่วโมงก็มีผลทำให้เฟส Ni และ Ti มีแนวโน้มลดลงในขณะที่เฟส Ni₃Ti, NiTi, Ti₂Ni มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



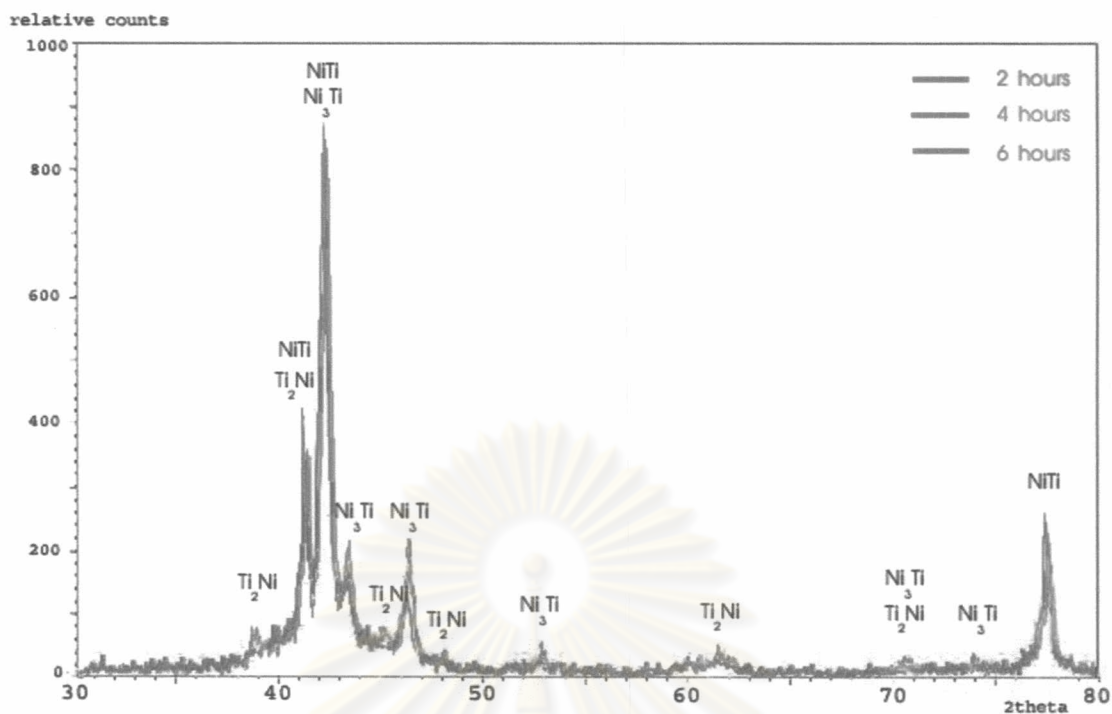
รูปที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 900 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิ 1000 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าชิ้นงานเริ่มประกอบไปด้วยเฟสหลักคือ NiTi และมีสัดส่วนปริมาณมากขึ้นเมื่อเวลาในการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิมากขึ้น ลักษณะยอดของแต่ละตัวอย่างมีความใกล้เคียงกันสูงมากแต่จะแตกต่างกันที่ส่วนสูงในแต่ละยอด ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างกันในปริมาณเฟสแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นอย่างไรก็ดีเฟส Ni_3Ti และ Ti_2Ni ยังคงสามารถพบได้

รูปที่ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิ 1100 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าเฟสหลักคือ NiTi ซึ่งปริมาณของ Ni_3Ti และ Ti_2Ni พบได้น้อยลงตั้งแต่ชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเฟส Ni_3Ti ดูเหมือนว่าจะไม่สามารถกำจัดให้ปราศจากไปได้โดยสัดส่วนปริมาณของเฟส NiTi ที่ผ่านการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิ 6 ชั่วโมงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เผาประสานครึ่งอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



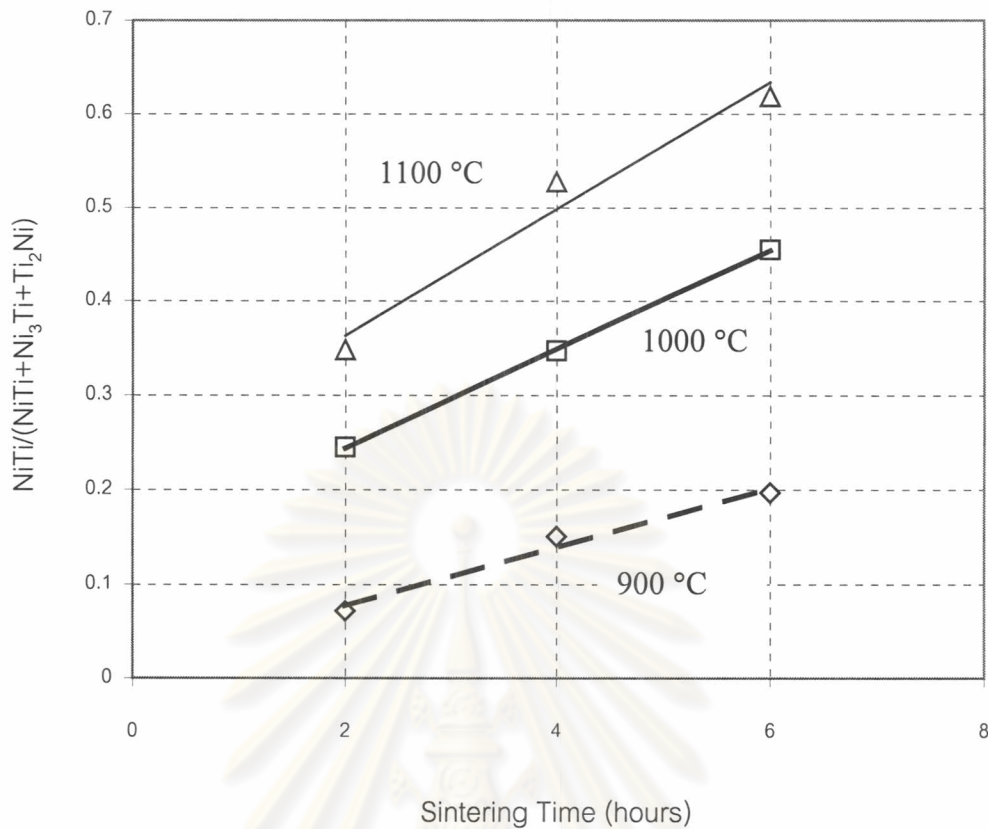
รูปที่ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานครึ่งอุณหภูมิ 1000 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1100 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

เพื่อวิเคราะห์ปริมาณเฟส NiTi ที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการเผาประสาน จึงเลือกยอดที่ $2\theta = 77.5^\circ$ มาเป็นตัวแทนของเฟส NiTi ในการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นยอดที่ไม่มีการซ้อนทับกันกับสารประกอบเชิงโลหะอื่น ๆ และนำค่าที่ได้มาสัมพันธ์กับปริมาณเฟส Ni₃Ti และ Ti₂Ni โดยเลือกยอดที่ $2\theta = 46.5^\circ$ สำหรับ Ni₃Ti และ $2\theta = 45.2^\circ$ สำหรับ Ti₂Ni เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นยอดของสารประกอบดังกล่าวที่สูงที่สุดและไม่มีการซ้อนทับกับสารประกอบอื่นเช่นกัน สำหรับค่าปริมาณสัมพันธ์ของเฟส NiTi แสดงอยู่ในรูปเศษส่วนได้แก่ ปริมาณเฟส NiTiหารด้วยปริมาณเฟสทั้งหมด (NiTi + Ni₃Ti + Ti₂Ni)

รูปที่ 4-16 แสดงอิทธิพลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณสัมพันธ์ของเฟส NiTi เมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานมีผลทำให้ปริมาณสัมพันธ์ของเฟส NiTi สูงขึ้น โดยเงื่อนไขการเผาประสานที่ให้ค่าปริมาณสัมพันธ์ของเฟส NiTi มีค่าเข้าใกล้ 1.0 ที่สุดคือการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 0.62

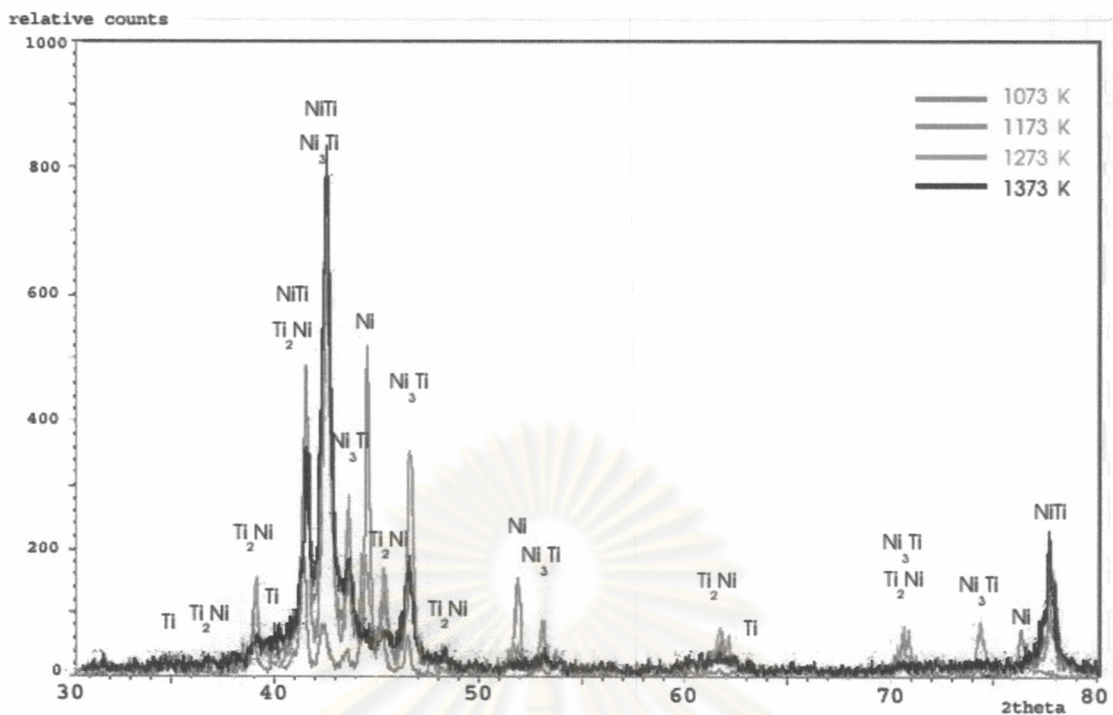


รูปที่ 4-16 แสดงอิทธิพลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi

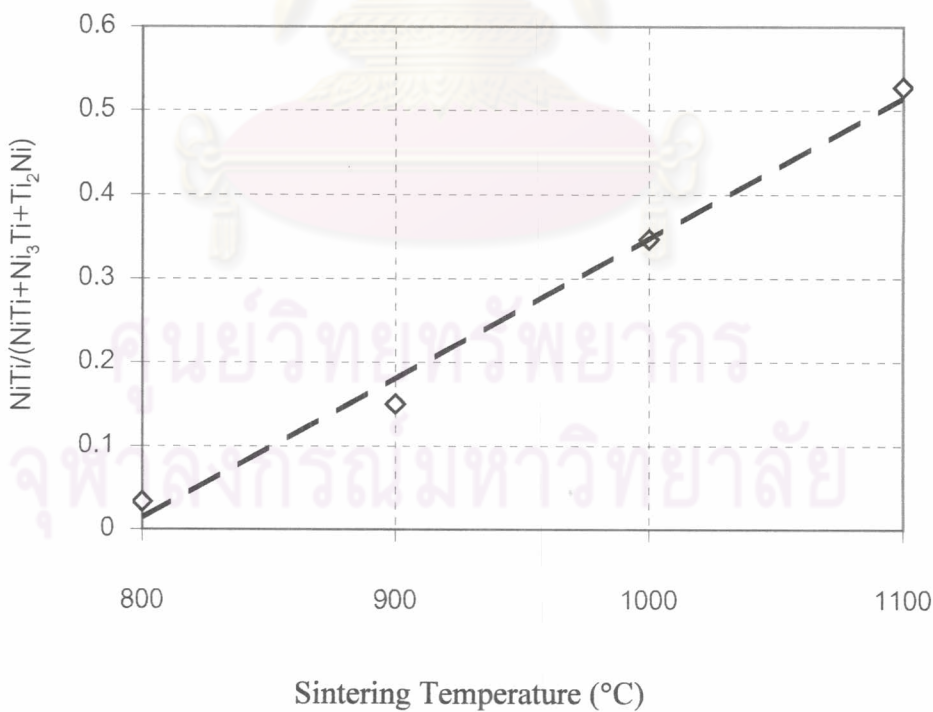
4.4.2 ผลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณเฟส

รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเผาประสานให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณเฟส NiTi เพิ่มขึ้น และสารตั้งต้นคือ Ni และ Ti มีปริมาณลดลง ในขณะที่ Ni₃Ti และ Ti₂Ni มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาประสานจาก 800 °C เป็น 900 °C แต่มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1000 °C และ 1100 °C เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารทำให้ Ni₃Ti และ Ti₂Ni เปลี่ยนเป็น NiTi ด้วยแรงขับจากส่วนผสมทางเคมี

รูปที่ 4-18 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi จากรูปจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเผาประสานที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เฟสในภาพ 4-17 เช่นกัน



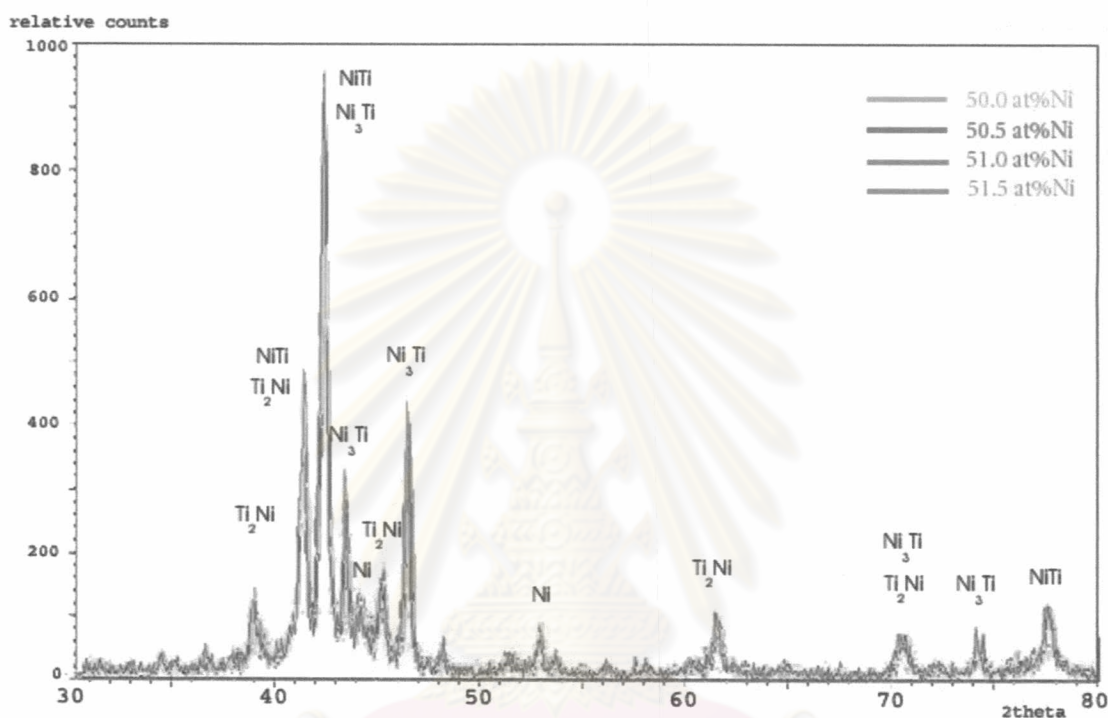
รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผา ประสานเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C



รูปที่ 4-18 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi

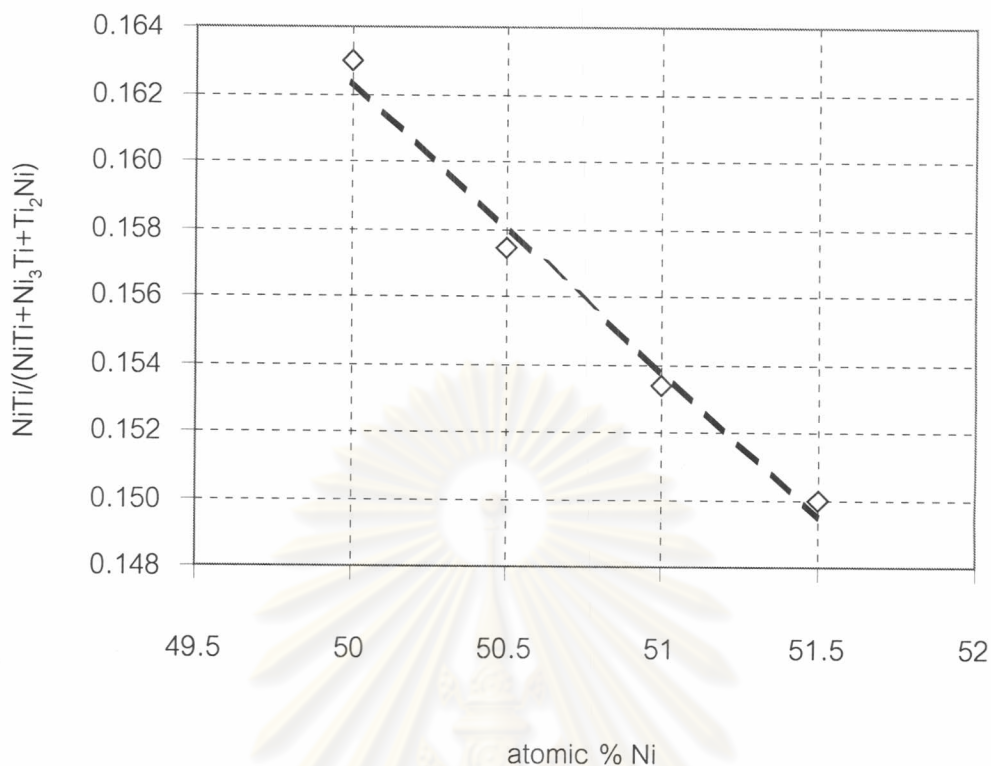
4.4.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อปริมาณเฟส

สำหรับผลของปริมาณ Ni ต่อเฟสที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4-19 แสดงให้เห็นว่าที่ยอดที่เป็นเฟสหลักของ Ni_3Ti มีส่วนสูงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Ni เพิ่มขึ้น ยอดหลัก 3 ยอด ที่มี Ni_3Ti เป็นเฟสหลักได้แก่ที่ $2\theta = 42.3^\circ$, 46.5° และ 43.5° ในทางกลับกันยอดที่มี Ti_2Ni เป็นเฟสหลักได้แก่ที่ $2\theta = 45.2^\circ$, 41.5° และ 39.0° จะมีส่วนสูงลดลงเมื่อปริมาณ Ni เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 900°C

รูปที่ 4-20 แสดงอิทธิพลของปริมาณ Ni ต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 900°C 4 ชั่วโมงเท่ากันแต่มีปริมาณ Ni ต่างกันนั้น เมื่อปริมาณ Ni เพิ่มขึ้นปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi มีค่าน้อยลง โดยที่ 50.0 atom%Ni ให้ค่าปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi สูงที่สุดเท่ากับ 0.163 และที่ 51.5 atom%Ni ให้ค่าต่ำที่สุดที่ 0.150 โดยมีปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi มีอัตราการลดลงอย่างคงที่เมื่อปริมาณ Ni เพิ่มขึ้น

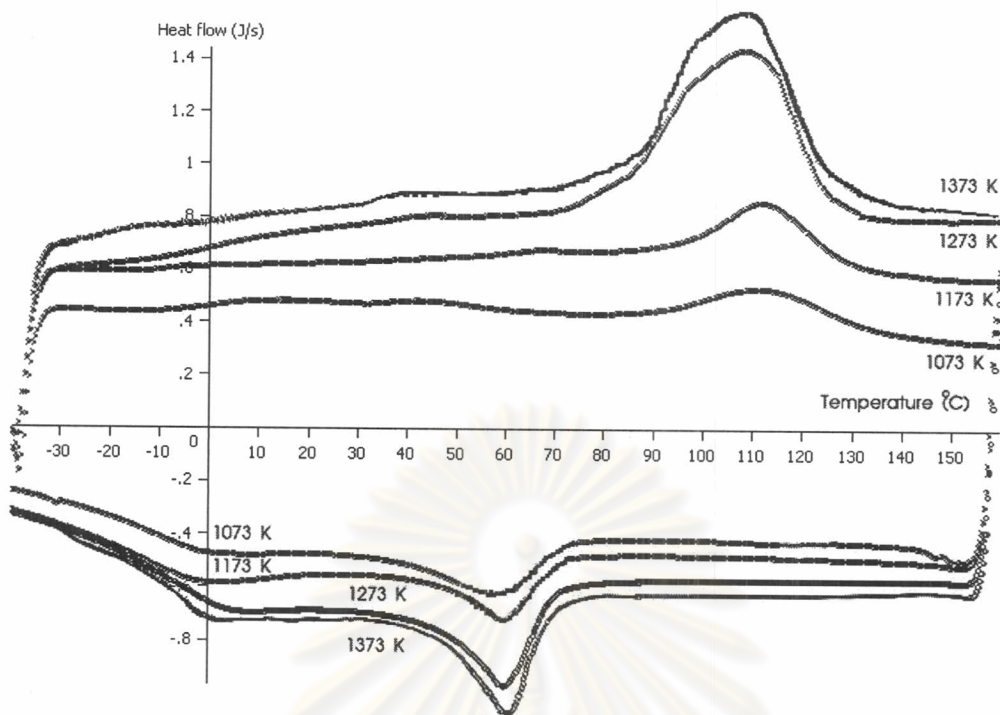


รูปที่ 4-20 แสดงอิทธิพลของปริมาณ Ni ต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi

4.5 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

4.5.1 ผลของอุณหภูมิเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

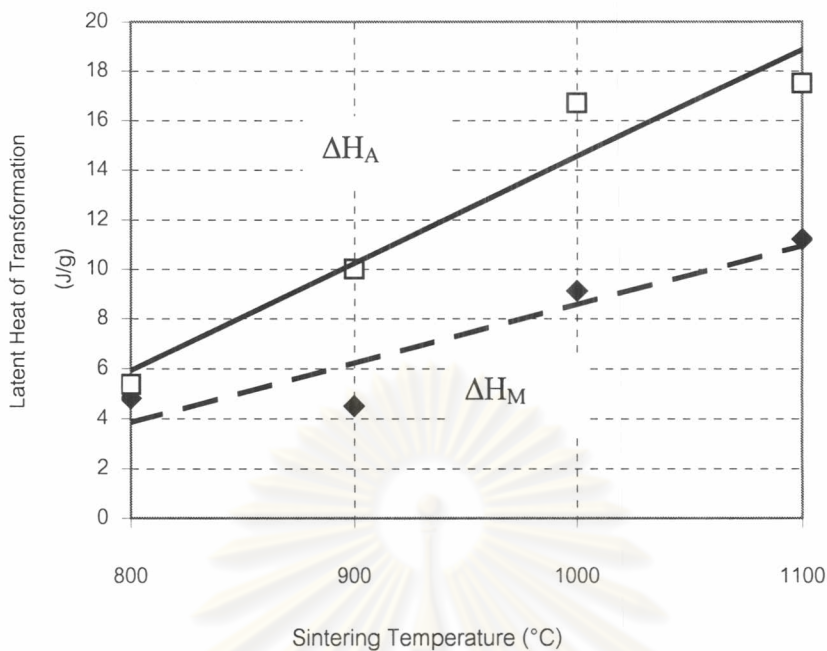
รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0 atom%Ni ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาประสาน โลหะผสมตัวอย่างจะมีปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณเฟส NiTi ที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่มีปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากที่สุดได้แก่ ชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1100 °C และชิ้นงานที่มีปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยที่สุด ได้แก่ชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 800 °C



รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni-Ti ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

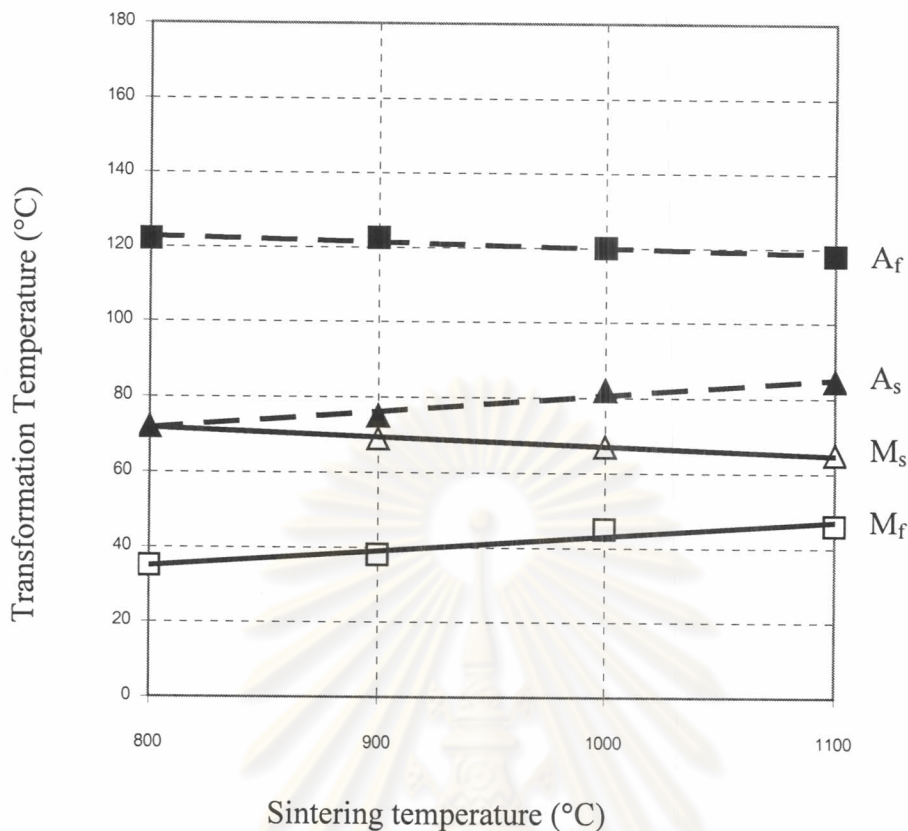
เมื่อนำรูปที่ 4-21 มาหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีหาค่าพื้นที่ระหว่างเส้นกราฟและเส้นสัมผัสของแต่ละกราฟ เพื่อหาค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนเฟสจากมาร์เทนไซต์ไปเป็นออสเทนไนต์ (ΔH_A) และค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (ΔH_M) ค่าพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4-22

จากรูปที่ 4-22 จะเห็นได้เห็นว่า ΔH_A มีค่ามากกว่าค่า ΔH_M ในทุกเงื่อนไขการเผาประสาน โดยความแตกต่างระหว่างค่า ΔH_A และ ΔH_M มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาประสานสูงขึ้น สำหรับค่า ΔH_A ที่ 800 °C มีค่าเท่ากับ 5.4 J/g เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาประสานเป็น 900 °C ค่า ΔH_A มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.1 J/g และที่อุณหภูมิเผาประสาน 1000 และ 1100 °C ค่า ΔH_A เพิ่มขึ้นเป็น 16.7 และ 17.5 J/g ตามลำดับ ค่า ΔH_A และ ΔH_M ในแต่ละเงื่อนไขการเผาประสานแสดงไว้ใน ตารางที่ ก-1 ภาคผนวก ก



รูปที่ 4-22 แสดงค่า ΔH_A และ ΔH_M ของตัวอย่าง 50 atom%Ni - Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

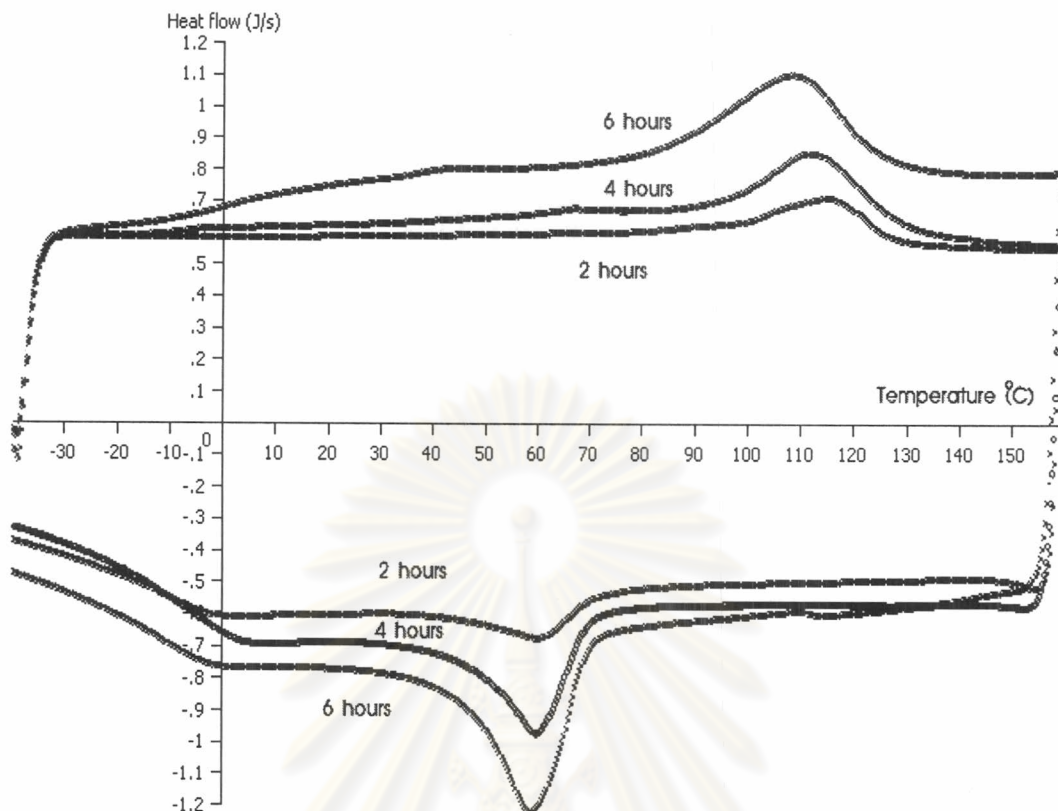
จากรูปที่ 4-21 เมื่อหาจุดตัดระหว่างเส้นพื้นของแต่ละกราฟกับเส้นความชันของแต่ละยอด จะได้อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสได้แก่ M_s , M_f , A_s และ A_f โดย M_s และ M_f เป็นอุณหภูมิเริ่มและสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่ A_s และ A_f เป็นอุณหภูมิเริ่มและสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเตนไนต์ และเมื่อนำค่าที่ได้มาแสดงเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 4-23 จากรูปจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ A_f มีค่าค่อนข้างคงที่ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาประสานโดยอยู่ในช่วง 118 – 122.5 °C ในขณะที่อุณหภูมิ A_s มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิเผาประสานที่สูงขึ้นทำให้ช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสแคบลง ($A_f - A_s$) สำหรับอุณหภูมิ M_f มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาประสานที่สูงขึ้นเช่นกันแต่ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิ M_s มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาประสานสูงขึ้น จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสแคบลงเช่นกันกับกรณีการเปลี่ยนเฟสจากมาร์เทนไซต์ไปเป็นออสเตนไนต์ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสทั้งหมดที่กล่าวถึงแสดงไว้ในตาราง ก-2 ผนวก ก



รูปที่ 4-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส A_s , A_f , M_s และ M_f กับอุณหภูมิเผาประสานของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.5.2 ผลของเวลาการเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

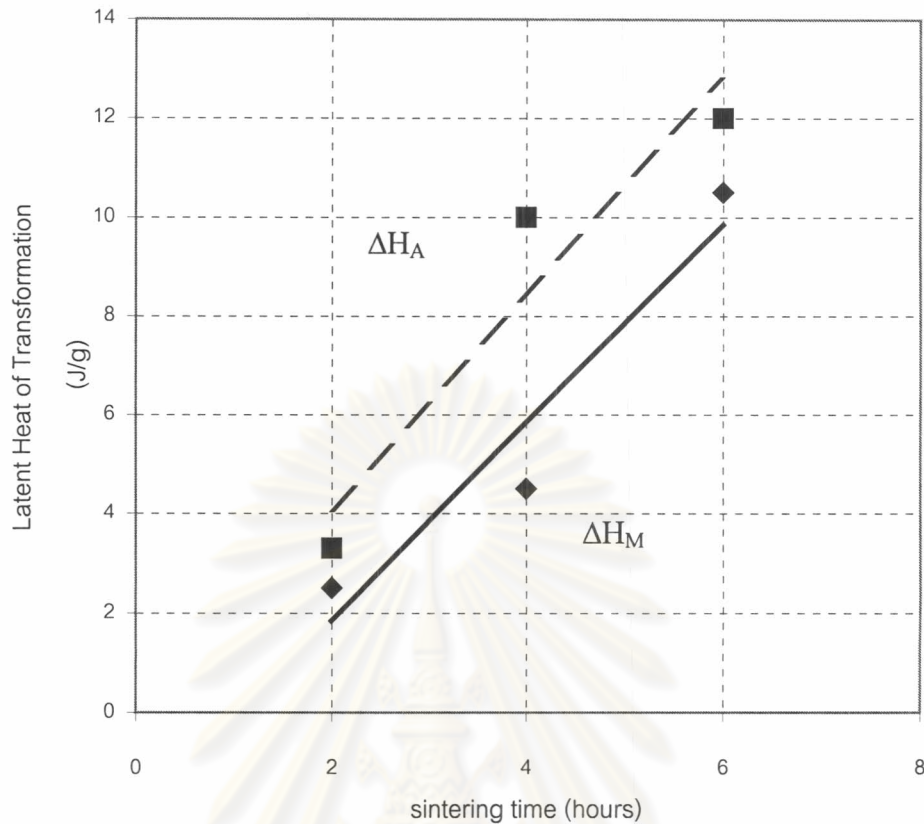
รูปที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0 atom%Ni-Ti ที่ผ่านเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เวลาในการเผาประสานที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความกว้างของช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสแคบลงและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากที่สุดได้แก่ชิ้นงานที่เผาประสานเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิกการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะผสม 50.0 atom% Ni-Ti ที่ผ่านเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

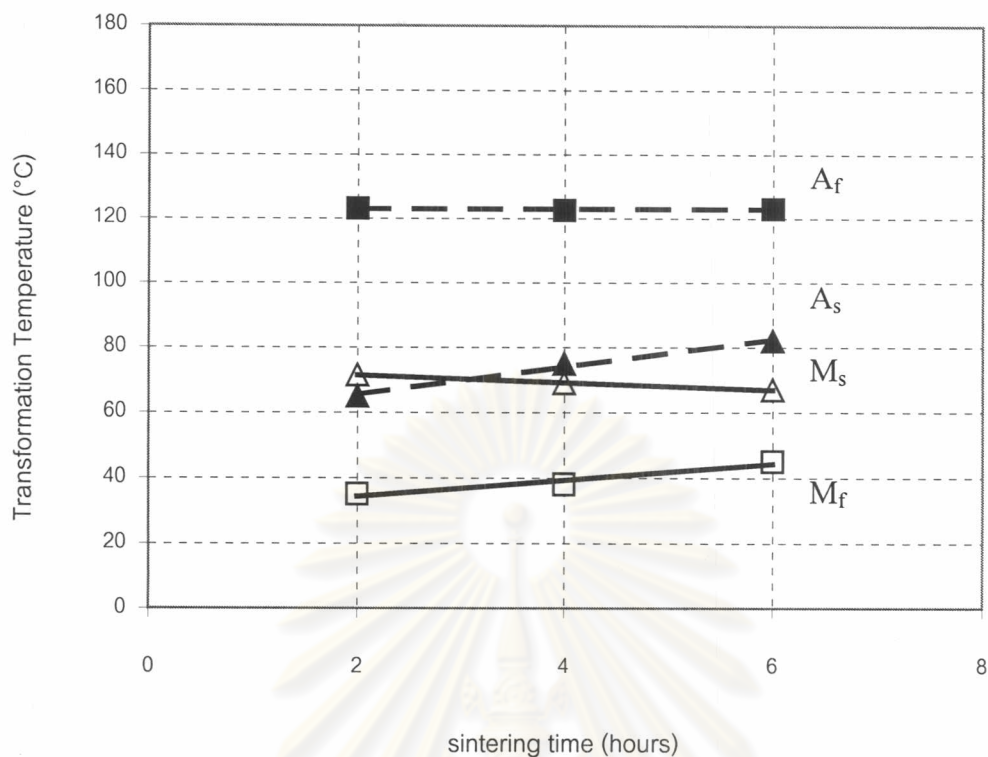
เมื่อนำรูปที่ 4-24 มาหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยระหว่งเส้นกราฟและเส้นสัมผัสของแต่ละกราฟ เพื่อหาค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนเฟสจากมาร์เทนไซต์ไปเป็นออสเตนไนต์ (ΔH_A) และค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (ΔH_M) ค่าพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4-25

จากรูปที่ 4-25 จะเห็นได้ว่าการ ΔH_A มีค่ามากกว่าค่า ΔH_M ในทุกเงื่อนไขการเผาประสาน โดยความแตกต่างระหว่างค่า ΔH_A และ ΔH_M มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเวลาการเผาประสานสูงขึ้น สำหรับค่า ΔH_A ที่เวลาการเผาประสาน 2 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 3.3 J/g เมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานเป็น 4 ชั่วโมง ค่า ΔH_A มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.1 J/g และที่เวลาการเผาประสาน 6 ชั่วโมง ค่า ΔH_A เพิ่มขึ้นเป็น 12.2 J/g ค่า ΔH_A และ ΔH_M ในแต่ละเงื่อนไขเวลาการเผาประสานแสดงไว้ใน ตารางที่ ก-3 ภาคผนวก ก



รูปที่ 4-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาประสานกับ ΔH_A และ ΔH_M ในชิ้นงาน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาประสานกับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ใน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิ A_f มีค่าค่อนข้างคงที่ต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาการเผาประสานโดยมีค่าเท่ากับ 123.2, 122.5 และ 123.0 °C เมื่อเปลี่ยนเวลาการเผาประสานจาก 2 เป็น 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิ A_s มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการเผาประสานโดยมีค่า 64.8, 74.9 และ 82.1 °C ที่เวลาการเผาประสาน 2, 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างอุณหภูมิ A_f และ A_s พบว่ามีค่าน้อยลงเมื่อเวลาการเผาประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4-26 อุณหภูมิทั้งสองมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าหากันเมื่อเวลาเผาประสานเพิ่มขึ้น ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ A_f และ A_s ที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมงเท่ากับ 58.4, 57.6 และ 40.9 °C ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิ M_s นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเผาประสานเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิ M_f มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการเผาประสานเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสแคบลงเช่นกัน ค่าอุณหภูมิ M_s , M_f , A_s และ A_f ที่กล่าวถึงแสดงไว้ในตารางที่ ก-4 ภาคผนวก ก

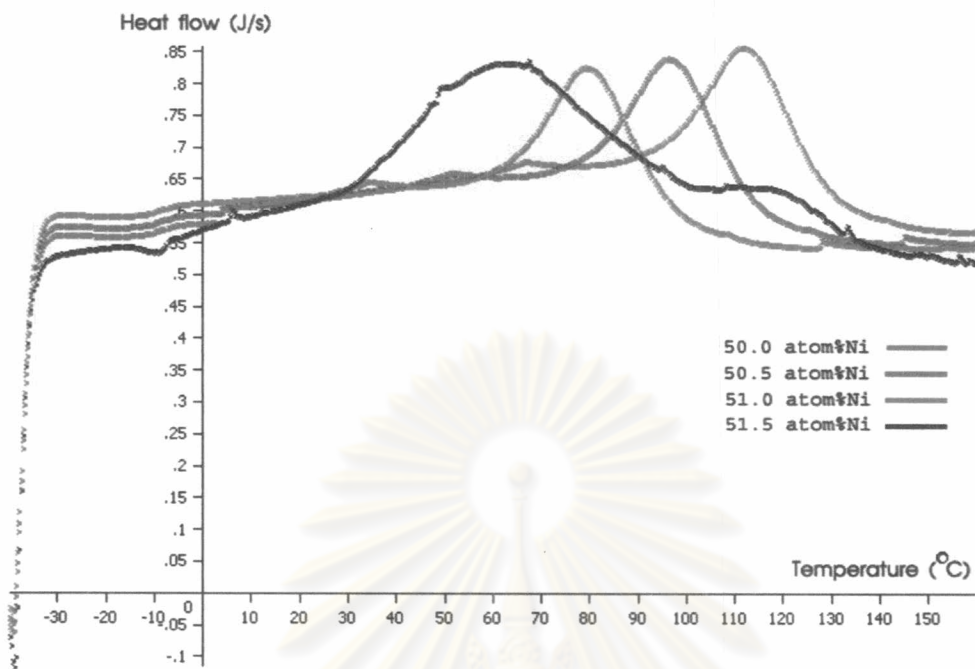


รูปที่ 4-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาประสานกับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ใน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C

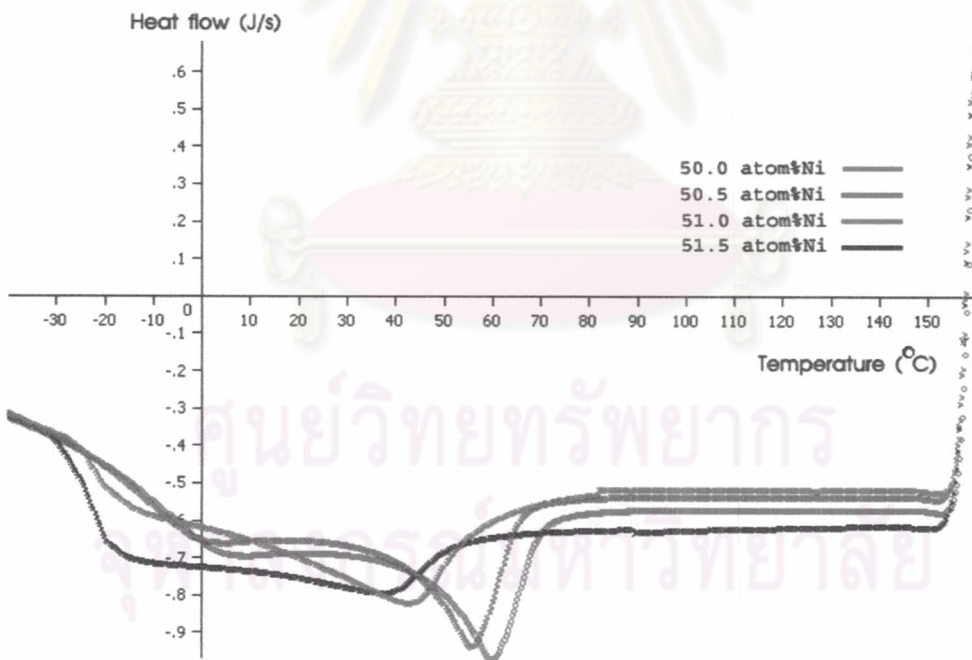
4.5.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

สำหรับผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแสดงไว้ในรูปที่ 4-27 ในเบื้องต้นสามารถสังเกตได้ว่ากราฟ DSC มีการเคลื่อนไปทางอุณหภูมิต่ำลงซึ่งทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสลดต่ำลงด้วย เมื่อทำการหาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Ni ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ M_s และ M_f มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกันค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ A_s และ A_f ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-28 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในรูปที่ 4.28 แสดงไว้ในตารางที่ ก-5 ภาคผนวก ก

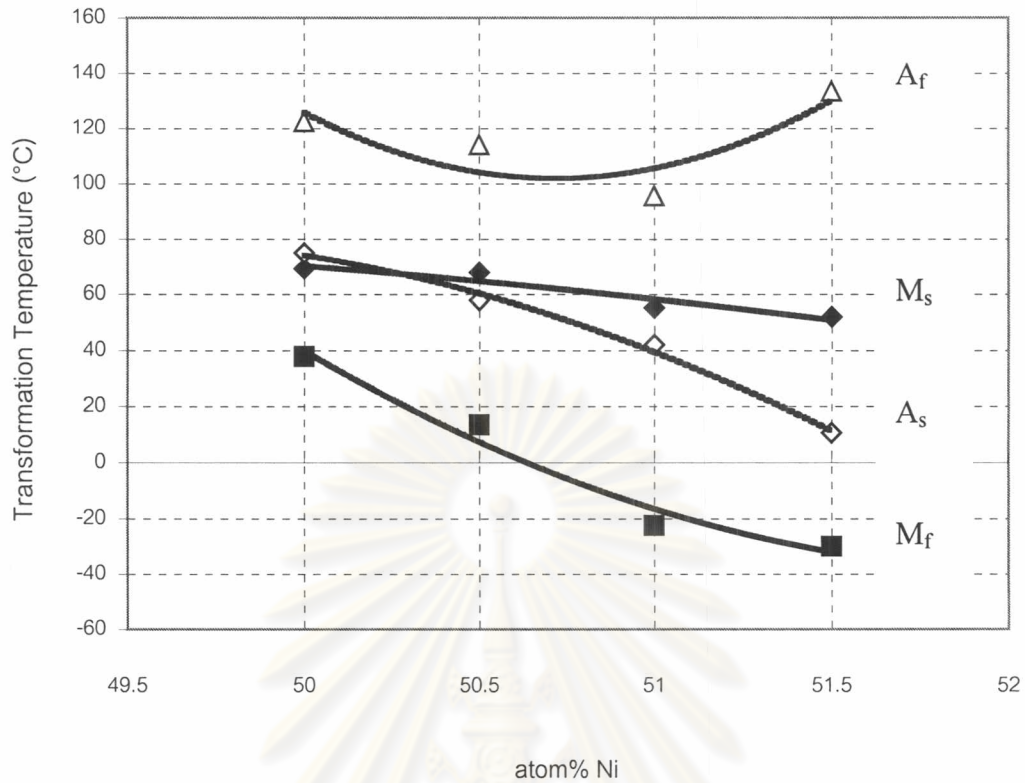
ก)



ข)



ภาพ 4-27 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิกการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 ก) endothermic ข) exothermic



รูปที่ 4-28 แสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ใน 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย