

อิทธิพลของพารามิเตอร์ของกระบวนการโลหะผงต่อการเปลี่ยนเฟสของโลหะจำรูป TiNi



นายสารัมภ์ บุญมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5402-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF POWDER METALLURGY PROCESSING PARAMETERS ON PHASE
TRANSFORMATION OF TiNi SHAPE MEMORY ALLOYS

Mr. Sarum Boonmee



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

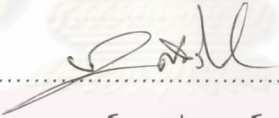
ISBN 974-17-5402-7

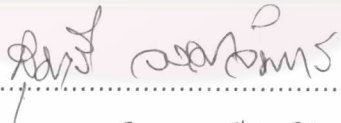
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพิพลของพารามิเตอร์ของกระบวนการโลหะผงต่อการเปลี่ยนแปลงของ
โลหะจำรูป TiNi
โดย นาย สรรัมภ์ บุญมี
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร

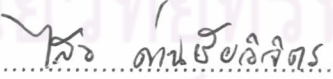
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

สารัมภ์ บุญมี : อิทธิพลของพารามิเตอร์ของกระบวนการโลหะผงต่อการเปลี่ยนเฟสของโลหะจำรูป TiNi. (INFLUENCE OF POWDER METALLURGY PROCESSING PARAMETERS ON PHASE TRANSFORMATION OF TINI SHAPE MEMORY ALLOYS) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร 80 หน้า. ISBN 974-17-5402-7

การศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนเฟสของโลหะจำรูป NiTi ที่ได้จากกระบวนการโลหะผงมีความสำคัญเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมและทางการแพทย์ของโลหะจำรูป NiTi ผงโลหะ Ni และ Ti ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโลหะจำรูป 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atomic%Ni-Ti เงื่อนไขในการเผาประสานคืออุณหภูมิเผาประสานระหว่าง 800 – 1000 °C และเวลาการเผาประสานระหว่าง 2 – 6 ชั่วโมง ในการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนเฟสของโลหะจำรูป NiTi เทคนิค X-rays Diffraction (XRD) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสัมพัทธ์ของเฟสโครงสร้างจุลภาคของโลหะจำรูป NiTi ศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์ ปฏิริยาทางความร้อนของโลหะจำรูป NiTi ทดสอบโดย Differential Scanning Calorimeter (DSC) ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนเฟสของโลหะจำรูป NiTi ที่ได้จากกระบวนการโลหะผงมีความแตกต่างจากการเปลี่ยนเฟสในโลหะจำรูป NiTi ที่ได้จากการหล่อ ผลของ DSC แสดงให้เห็นยอดที่มีความกว้างและตื้นกว่าซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเผาประสาน อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสขึ้นอยู่กับปริมาณ Ni อย่างมาก โดยปริมาณ Ni ที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสลดลง อุณหภูมิ A_s ที่ได้จากการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ อยู่ในช่วง 60-80 °C โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นการเกิดเฟส NiTi และเฟสที่สอง โดยปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการเผาประสานเพิ่มขึ้น และพบสูงที่สุดที่เงื่อนไขอุณหภูมิเผาประสาน 1100 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปริมาณการยุบตัวของตัวอย่างทดสอบขึ้นอยู่กับทิศทางการอัด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370555921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD: SHAPE MEMORY ALLOYS / POWDER METALLURGY / TRANSFORMATION TEMPERATURE / NITI / PHASE TRANSFORMATION

SARUM BOONMEE : INFLUENCE OF POWDER METALLURGY PROCESSING PARAMETERS ON PHASE TRANSFORMATION OF TINI SHAPE MEMORY ALLOYS.
THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SUMALEE VONGCHAN, Ph.D.,
THESIS COADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SAWAI DANCHAIVIJIT, Ph.D., 80 pp. ISBN 974-17-5402-7

The phase transformation behavior of NiTi alloys prepared by powder metallurgy process was investigated because it is relevant to engineering and medical applications of NiTi shape memory alloys. Ni and Ti powders were used as raw materials to produce 50.0, 50.5, 51.0 and 51.5 atomic% Ni-Ti shape memory alloys. The sintering temperatures between 800 to 1000 °C and sintering times between 2 to 6 hours were varied as sintering conditions. The influences of processing parameters on phase transformation of P/M NiTi were investigated. The microstructures were observed by optical microscopy technique. Relative amount of NiTi phase in alloys were determined by using X-rays diffraction technique and heat evolution of NiTi samples were analysed by Differential Scanning Calorimeter (DSC). It was founded that transformation behavior of P/M NiTi alloys was different from NiTi cast alloys. DSC results showed broader peak which depended on sintering conditions. Transformation temperatures were markly affected by Ni content. The greater Ni content caused the lower transformation temperature. The A_s 's were found around 60-80 °C. Microstructures revealed the evolution of NiTi and secondary phases. Relative amount of NiTi phase was increased with increasing sintering times and temperatures. The highest relative amount of NiTi phase was at sintering condition of 1100 °C for 6 hours. Anisotropy shrinkage was found on sintered samples.

Department.....Metallurgical Engineering.....Student's signature.....
Field of studyMetallurgical Engineering.....Advisor's signature.....
Academic year.....2003..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ท่าน ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่งที่ได้อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าอย่างอดทนเพื่อเอาชนะอุปสรรคในงานวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด ข้าพเจ้าขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยผู้ให้ทุนอุดหนุนและส่งเสริมในการทำวิทยานิพนธ์และขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ อ. อติศร โกรฐวิเชียร และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบชิ้นงานเป็นอย่างดี รวมทั้งเพื่อนนิสิตปริญญาโทในภาควิชาที่ให้กำลังใจและผลักดันข้าพเจ้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา มารดาของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนและให้โอกาสทางการศึกษากับข้าพเจ้ามาโดยตลอด ท่านทั้งสองเป็นที่รักของข้าพเจ้าเสมอมาและจะเป็นเช่นนั้นตลอดไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่	
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 โลหะวิทยาของโลหะจำรูป NiTi.....	5
2.2.1 แผนภูมิสมดุลย์ของ Ni-Ti.....	5
2.2.2 การเปลี่ยนเฟสในโลหะจำรูป NiTi.....	7
2.3 กลไกการเกิดเฟส NiTi ในกระบวนการโลหะผง.....	9
2.4 อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการโลหะผงที่มีต่อสมบัติของโลหะจำรูป.....	11
2.4.1 อุณหภูมิเผาประสาน.....	12
2.4.2 เวลาในการเผาประสาน.....	14
2.4.3 ส่วนผสมทางเคมี.....	14
2.5 สมบัติของโลหะจำรูป NiTi ที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.5.1 กราฟความเค้น-ความเครียด.....	17
2.5.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	19
2.5.3 ความถ่วงจำเพาะ.....	21
บทที่	
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 วัสดุดิบ.....	24
3.2 วิธีการทดลอง.....	24
3.2.1 การทดสอบโลหะผง.....	24
3.2.2 การผสมผงโลหะ.....	24
3.2.3 การอัดโลหะผง.....	24
3.2.4 การเผาประสาน.....	24
3.3 การทดสอบชิ้นงาน.....	26
3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	26
3.3.2 การวิเคราะห์เฟส.....	26
3.3.3 การทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อน.....	26
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	26
บทที่	
4 ผลการทดลอง.....	28
4.1 โลหะผง.....	28
4.2 การยู่บตัว.....	32
4.3 โครงสร้างจุลภาค.....	36
4.4 ผลการวิเคราะห์เฟส.....	40
4.4.1 ผลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณเฟส.....	40
4.4.2 ผลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณเฟส.....	44
4.4.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อปริมาณเฟส.....	46
4.5 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	47
4.5.1 ผลของอุณหภูมิเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	47
4.5.2 ผลของเวลาการเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	50
4.5.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	53
บทที่	
5 อภิปรายผลการทดลอง.....	56
5.1 การยู่บตัว.....	56
5.2 โครงสร้างจุลภาค.....	58
5.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อโครงสร้างจุลภาค.....	58

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.2 อิทธิพลของเวลาในการเผาประสานต่อโครงสร้างจุลภาค.....	60
5.3 ปริมาณเฟส.....	61
5.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณเฟส.....	61
5.3.2 อิทธิพลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณเฟส.....	61
5.3.3 อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่อปริมาณเฟส.....	62
5.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	62
5.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	62
5.4.2 อิทธิพลของเวลาการเผาประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	63
5.4.3 อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส.....	63
บทที่	
6 สรุปผลงานวิจัย.....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงผลจากการคำนวณ Gibb's free energy สำหรับสารประกอบเชิงโลหะ NiTi, Ni ₃ Ti, Ti ₂ Ni ที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C.....	12
ตารางที่ 3-1 แสดงส่วนผสมทางเคมีและมวลของผงโลหะที่นำมาผสมกันในแต่ละเงื่อนไข และรหัสเรียกชื่อ.....	25
ตารางที่ 3-2 แสดงอุณหภูมิเผาและเวลาเผาประสานในแต่ละเงื่อนไขและรหัสเรียกชื่อ.....	25
ตารางที่ 4-1 แสดงการปริมาณการยุบตัวของชิ้นงานในทิศตามแนวการอัดและตั้งฉากกับ แนวการอัดของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่างกัน.....	32
ตารางที่ ก-1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อค่าความร้อนแฝงการเปลี่ยนเฟส ΔH_M และ ΔH_A ที่เผาประสานด้วยเวลา 4 ชั่วโมง.....	69
ตารางที่ ก-2 อิทธิพลของอุณหภูมิการประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ที่เผาประสานด้วยเวลา 4 ชั่วโมง.....	69
ตารางที่ ก-3 อิทธิพลของเวลาเผาประสานต่อค่าความร้อนแฝงการเปลี่ยนเฟส ΔH_M และ ΔH_A ที่ อุณหภูมิเผาประสาน 900 °C.....	70
ตารางที่ ก-4 อิทธิพลของเวลาการประสานต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ที่อุณหภูมิเผาประสาน 900 °C.....	70
ตารางที่ ก-5 อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ที่อุณหภูมิเผาประสาน 900 °C ด้วยเวลา 4 ชั่วโมง.....	71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 แผนภูมิสมดุทธ์ของโลหะ Ni และ Ti.....	6
รูปที่ 2-2 ภาพขยายของแผนภูมิสมดุทธ์ NiTi ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเฟส NiTi ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์.....	6
รูปที่ 2-3 แสดงลักษณะฝั่ง DSC ของโลหะจำรูปที่ได้จากกระบวนการหล่อหลอม.....	8
รูปที่ 2-4 a) แสดง hysteresis และรูปที่ 4b) แสดงฝั่ง DSC ของ 50.2 atom%Ni-49.8Ti ที่ผ่านกรรมวิธีทางกลและความร้อน.....	9
รูปที่ 2-5 แสดงค่า penetration constant (k) ที่ได้จากการแพร่ Ti ₂ Ni – Ni ₃ Ti, Ti ₂ Ni – Ni และ Ti – Ni ₃ Ti ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	10
รูปที่ 2-6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ที่วัดได้จากการแพร่ Ti ₂ Ni – Ni ₃ Ti และ Ti – Ni ₃ Ti ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน.....	11
รูปที่ 2-7 อิทธิพลของปริมาณ Ni ต่ออุณหภูมิ M _s	15
รูปที่ 2-8 TTT diagram ของโลหะผสม 52 atom% Ni-Ti.....	16
รูปที่ 2-9 กราฟความเค้น-ความเครียดของลวดโลหะจำรูป Ti-50.0 atom%Ni ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปและอบอ่อนที่ 400 °C.....	18
รูปที่ 2-10 hysteresis ของความเค้น-ความเครียดของโลหะจำรูป Ti-50.2 atom%Ni ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	19
รูปที่ 2-11 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบ DSC ของโลหะจำรูป NiTi ที่ได้จากกระบวนการโลหะผง.....	20
รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะฝั่ง DSC ของ Ti - 50.1 atom%Ni ที่ทำการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ด้วยเวลาต่าง ๆ กัน.....	20
รูปที่ 2-13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะจำรูป NiTi ที่เตรียมโดยกระบวนการโลหะผง Ni และ Ti.....	22
รูปที่ 3-1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	27
รูปที่ 4-1 แสดงตัวอย่างผลการทดลองหาขนาดโลหะผง Ti และ Ni ด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง ก) Ti ข) Ni.....	28
รูปที่ 4-2 แสดงผลการทดลองหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะผงที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ก) โลหะผง Ni ข) โลหะผง Ti.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-3 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแนวการอัดของ
 ชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน33

รูปที่ 4-4 แสดงปริมาณการยุบตัวในทางขนานกับแนวการอัดของชิ้นงาน 50 atom%Ni-Ti
 ที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน.....34

รูปที่ 4-5 แสดงปริมาณการยุบตัวในทิศตั้งฉากกับแนวการอัดของชิ้นงาน
 50 atom% Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน.....35

รูปที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานด้วยเวลาเผาประสาน 2 ชั่วโมง
 ต่ออัตราส่วนระหว่างปริมาณการยุบตัวในทิศตามและตั้งฉากกับแนวการอัด
 (T/A ratio).....35

รูปที่ 4-7 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเผาประสานโดยมีอัตราการให้
 ความร้อนต่างกัน (ช้าๆ 20 °C ต่อนาที ขวา 10 °C ต่อนาที).....36

รูปที่ 4-8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่าน
 การเผาประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000, 1100 °C เป็นเวลา
 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....37

รูปที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ของ 50.0 atom%Ni
 ที่ผ่านการเผาประสานที่ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....38

รูปที่ 4-10 แสดงการเรียงตัวของเฟสต่าง ๆ มีลักษณะเป็นชั้นของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสาน
 ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....39

รูปที่ 4-11 แสดงภาพถ่ายบริเวณเฟส ที่มีการแตกร้างในโครงสร้างจุลภาค.....40

รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 at%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่
 อุณหภูมิ 800 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....40

รูปที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสาน
 ที่อุณหภูมิ 900 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....41

รูปที่ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสาน
 ที่อุณหภูมิ 1000 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....42

รูปที่ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสาน
 ที่อุณหภูมิ 1100 °C ด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....43

รูปที่ 4-16 แสดงอิทธิพลของเวลาการเผาประสานต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi.....44

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการ เผาประสานเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C.....	45
รูปที่ 4-18 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาประสานต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi.....	45
รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสของโลหะผสม 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni – Ti ที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 °C.....	46
รูปที่ 4-20 แสดงอิทธิพลของปริมาณ Ni ต่อปริมาณสัมพัทธ์ของเฟส NiTi.....	47
รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50 atom%Ni-Ti ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	48
รูปที่ 4-22 แสดงค่า ΔH_A และ ΔH_M ของตัวอย่าง 50 atom%Ni - Ti ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	49
รูปที่ 4-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส A_s , A_f , M_s และ M_f กับ อุณหภูมิเผาประสานของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0 atom% Ni-Ti ที่ผ่านเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....	51
รูปที่ 4-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาประสานกับ ΔH_A และ ΔH_M ในชิ้นงาน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....	52
รูปที่ 4-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาประสานกับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส M_s , M_f , A_s และ A_f ใน 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C.....	53
ภาพ 4-27 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม 50.0, 50.5, 51.0 และ 51.5 atom%Ni ที่ผ่านการเผาประสานที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก) endothermic ข) exothermic.....	54
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.....	55

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-1 แสดงลักษณะของรูพรุนในทิศทางตามและตั้งฉากกับแนวการอัด.....	56
รูปที่ 5-2 ภาพจำลองการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากการเผาประสาน	
a) ก่อนการเผาประสาน b) การแพร่ระหว่างอนุภาค c) ภายหลังกการเผาประสาน	
d) โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่เผาประสานที่ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	60
รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	72
รูปที่ ข-2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	72
รูปที่ ข-3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	73
รูปที่ ข-4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
รูปที่ ข-5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	74
รูปที่ ข-6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	74
รูปที่ ข-7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	75
รูปที่ ข-8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	75
รูปที่ ข-9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	76
รูปที่ ข-10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	76
รูปที่ ข-11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน	
ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	77

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข-12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ 50 atom%Ni-Ti ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1100 °Cเป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	77
รูปที่ ค-1 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมเคมีในบริเวณ A ในรูปที่ 4-10.....	78
รูปที่ ค-2 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมเคมีในบริเวณ B ในรูปที่ 4-10.....	78
รูปที่ ค-3 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมเคมีในบริเวณ C ในรูปที่ 4-10.....	79
รูปที่ ค-4 แสดงผลการทดสอบหาส่วนผสมเคมีในบริเวณ D ในรูปที่ 4-10.....	79



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย