

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส  
ของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน

นายครรชณะ จรรย์ยานนท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-160-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**THE STUDY OF TRANSITIONAL TEMPERATURE CHANGE  
IN HEAT TREATED NICKEL TITANIUM ALLOY WIRE**

**Mr.Kamchana Charanyananda**

สถาบันวิทยบริการ

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Orthodontics**

**Department of Orthodontics**

**Graduate School**

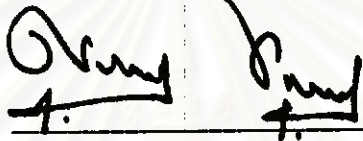
**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1997**


**ISBN 974-638-160-1**


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวด  
 โลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน  
 โดย                              นายครรชณะ จรรย์ยานนท์  
 ภาควิชา                            ทัศนกรรมจัดพิมพ์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วิชระ เพชรคุปต์  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

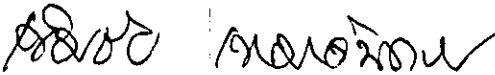
  
 (ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ สุติวงศ์)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

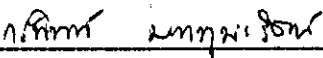
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ กนก สรเทศน์)  
 ประธานกรรมการ

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วิชระ เพชรคุปต์)  
 อาจารย์ที่ปรึกษา

  
 (อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เข็มชัย เหมะจันทร์)  
 กรรมการ

  
 (อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง กรพินท์ มหาทุมะรัตน์)  
 กรรมการ

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน  
ทางด้านวิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชระ เพชรคุปต์  
อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ คณาจารย์ภาควิชาทัศนกรรมจัดพิมพ์ คณะทันตแพทยศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ ดร.อำรุง จันทวานิช และอาจารย์ ดร.บัญญัติ  
สมบัติ

ทางด้านการทดลองและการรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาทัศน  
กรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องอบ  
ฟอร์ชเลนที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงาน  
พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่อนุเคราะห์เครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คา  
ลอรیمیเตอร์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำเครื่อง คุณ  
ปิยวรรณ สุรัญขนาจรัสกุล และคุณอภิชาติ เหล็กงาม ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโลห  
การ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อีกทั้งขอขอบพระคุณบริษัท ทันตสยาม  
วิสาหกิจ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุสำหรับการวิจัย

เนื่องจากทุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้บางส่วน ได้มาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของ  
บัณฑิตวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณอื่นๆ ที่มีสามารถกล่าวนามได้หมด ณ ที่นี้

คุณความดีอันเกิดจากการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ ร.ต.อ. ศิระ จรรย์ยานนท์ บิดา  
และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ครรรชนะ จรรย์ยานนท์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครุชณะ จรรย์ยานนท์ : การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน (THE STUDY OF TRANSITIONAL TEMPERATURE CHANGE IN HEAT TREATED NICKEL TITANIUM ALLOY WIRE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ทพ. วัชร เพชรคุปต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์, 90 หน้า. ISBN 974-638-160-1

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนสองขั้นตอนและผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนเดียว และศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สองกับอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมหลังจากอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสประกอบด้วย อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์, อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด, อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์ และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด ชิ้นตัวอย่างคือลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup> ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ดัดให้มีขนาดยาว 4 มม. รวม 90 ชิ้น นำชิ้นตัวอย่างทั้งหมดเข้าอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่หนึ่ง ที่อุณหภูมิ 440<sup>o</sup>ซ. เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อลดความเค้นที่มีอยู่ในลวดด้วยเตาเผาพอร์ซเลนสูญญากาศ หลังจากนั้นแบ่งชิ้นตัวอย่างเป็น 6 กลุ่มๆ ละ 15 ชิ้น กลุ่มหนึ่งเป็นกลุ่มควบคุม กลุ่มที่เหลือนำมาอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สอง ที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600<sup>o</sup>ซ. เป็นเวลา 15 นาทีตามลำดับในเตาเผาพอร์ซเลนสูญญากาศเช่นเดียวกัน ทาค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ เมื่อใช้ค่าสถิติ ที เทสต์ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์ของกลุ่มที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สอง ที่อุณหภูมิ 400<sup>o</sup>ซ. ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนกลุ่มที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สอง ที่อุณหภูมิ 450, 500, 550 และ 600<sup>o</sup>ซ. พบว่ามีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในขณะที่อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดและอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด พบว่ากลุ่มที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สองทุกกลุ่มมีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สองกับอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมหลังจากอบชุบด้วยความร้อนด้วยค่าสถิติ เพียร์สัน โพรดักต์โมเมนต์ พบว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมหลังจากอบชุบด้วยความร้อนทุกค่า มีความสัมพันธ์อย่างมากในทางบวกกับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่สอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

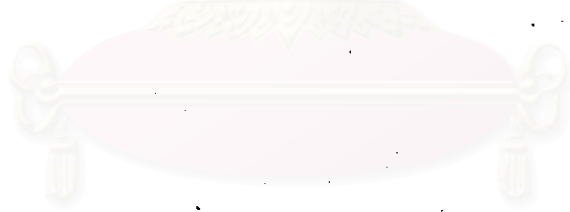
ภาควิชา.....บัณฑิตกรรมจัดพื้น.....  
สาขาวิชา.....บัณฑิตกรรมจัดพื้น.....  
ปีการศึกษา.....2540.....

ลายมือชื่อนิติศ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## C865023 : MAJOR ORTHODONTICS

KEY WORD: NICKEL TITANIUM ALLOY WIRE / NITINOL / HEAT TREATMENT / DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETER / VACUUM PORCELAIN FURNACE  
KARNCHANA CHARANYANANDA : THE STUDY OF TRANSITIONAL TEMPERATURE CHANGE IN HEAT TREATED NICKEL TITANIUM ALLOY WIRE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. VACHARA PHETCHARAKUPT THESIS CO-ADVISOR : SUMALEE VONGCHAN, Ph.D. 73 PP. ISBN 974-638-160-1

The objectives of this research were to compare the transitional temperature of the nickel titanium alloy wires which had been heat treated for one and two steps and to study the relationship between the second heat treatment temperature and the transitional temperature of the heat treated nickel titanium alloy wires. Ninety pieces of one distal end of preformed Nitinol<sup>®</sup> wire were cut into 4 mm. and heat treated in the vacuum porcelain furnace. The heat treatment procedure consisted of two steps. In the first step, the 90 pieces were treated together at 440°C for 15 minutes for relieving the internal stress. After this, the wires were randomized into 6 groups which one was a control group. The second step was the treatment at a temperature between 400-600°C, in increments of 50°C, for 10 minutes. The differential scanning calorimeter was used to measuring the transitional temperature. The t-test was used to compare the mean of each term of the transitional temperature between the control and the treatment group. The result for M<sub>s</sub> and A<sub>s</sub> temperature did not show a significant difference in the 400°C-treated group (P<0.05) but showed a significant difference in the other groups (P<0.05) while M<sub>t</sub> and A<sub>t</sub> temperature showed a significant difference in every group (P<0.05). The relationship between the second heat treatment temperature and the transitional temperature of the heat treated nickel titanium alloy wires was analysed by the Pearson's product moment test. The result was the transitional temperature which consist of M<sub>s</sub>, M<sub>t</sub>, A<sub>s</sub> and A<sub>t</sub> showed the positive correlation with the second heat treatment temperature (P<0.05).



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ทันตกรรมจัดฟัน.....

สาขาวิชา ทันตกรรมจัดฟัน.....

ปีการศึกษา 2540.....

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย .....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
สมมติฐานของการวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย .....	2
ขอบเขตของการวิจัย .....	2
ข้อดกลงเบื้องต้น .....	3
ความไม่สมบูรณ์ของการวิจัย .....	3
คำจำกัดความ .....	3
ระเบียบวิธีวิจัย .....	4
บทที่ 2 วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง .....	5
โลหะจํารูป .....	5
การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซด์ .....	5
อุณหพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงเฟส .....	7
ลักษณะทางผลึก .....	9
ปรากฏการณ์จํารูป .....	13
ความยืดหยุ่นเทียมของการเปลี่ยนรูป .....	14
โลหะผสม นิกเกิล ไทเทเนียม .....	15
คุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม .....	17
คุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม .....	19
การนำมาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน .....	20
การให้ความร้อนกับลวด นิกเกิล ไทเทเนียม .....	21
ดีฟเฟอร์เรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ .....	23
ส่วนประกอบของเครื่องมือ .....	24
ตัวตรวจจับสัญญาณ .....	25
คู่มือและชุดควบคุม .....	25
คอมพิวเตอร์และตัวแสดงผล .....	25
วัสดุอ้างอิง .....	25

## สารบัญ ( ต่อ )

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย .....	27
ประชากร.....	27
กลุ่มตัวอย่าง.....	27
การรวบรวมข้อมูล .....	27
ตัวแปรในการวิจัย.....	28
การวิเคราะห์ข้อมูล .....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	33
การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์.....	34
การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด.....	36
การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์ .....	38
การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด .....	40
การทดสอบความสัมพันธ์ .....	43
วิจารณ์ผลการวิจัย .....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	47
รายการอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก .....	51
ก. ข้อมูลจากวิธิตีเฟออร์เรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมทรี.....	51
ข. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ เอส พี เอส เอสบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ .....	60
ประวัติผู้วิจัย.....	72

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงโลหะผสมที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเครียดได้อย่างสมบูรณ์ .....	9
ตารางที่ 2 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ .....	34
ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ .....	34
ตารางที่ 4 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ .....	36
ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด .....	36
ตารางที่ 6 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์ของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ .....	38
ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์ .....	38
ตารางที่ 8 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุดของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ .....	40
ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด .....	40
ตารางที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อน .....	43
ตารางที่ 11 ค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสค่าต่างๆของสวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol <sup>®</sup> ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 .....	59

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดงการยกตัวของผิวและการโค้งงอของรอยช่วนจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ .....	6
รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงผลึกในรูปแบบต่างๆกัน .....	7
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระทางเคมีและอุณหภูมิของเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ .....	8
รูปที่ 4 แสดงลักษณะโครงผลึกแบบ CsCl -B <sub>2</sub> Superlattice พร้อมทั้งแสดงอะตอมในระนาบ (110) .....	10
รูปที่ 5 แสดงลักษณะโครงผลึกแบบ Fe <sub>3</sub> Al-DO <sub>3</sub> Superlattice พร้อมทั้งแสดงอะตอมในระนาบ (110) .....	10
รูปที่ 6 แสดงการเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่ต่อเนื่องกันของรูปผลึกแบบมาร์เทนไซต์ ที่เกิดจากเฟสดั้งเดิม ในโครงร่างผลึกแบบ CsCl- β <sub>2</sub> .....	11
รูปที่ 7 แสดงการเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่ต่อเนื่องกันของรูปผลึกแบบมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากเฟสดั้งเดิมในโครงผลึกแบบ Fe <sub>3</sub> Al-DO <sub>3</sub> .....	11
รูปที่ 8 แสดงการเรียงตัวที่เป็นไปได้ของเฟสมาร์เทนไซต์แบบต่างๆ.....	12
รูปที่ 9 แสดงรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์เปรียบเทียบกับรูปผลึกในเฟสดั้งเดิมของ CuAlNi แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเลื่อนของอะตอมระหว่างรูปผลึกทั้งสอง.....	12
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้มาจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน .....	13
รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบกับจุดต่าง ๆ บนกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด .....	14
รูปที่ 12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่อุณหภูมิตดสอบ (T <sub>s</sub> ) ต่างๆกัน .....	18
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ไ้ยังลวดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวด.....	19
รูปที่ 14 แสดงรูปของกราฟที่มีระดับพลังงานที่แตกต่างกันของตัวอย่างและวัดดูอย่างอิง (ΔP).....	24
รูปที่ 15 แสดงลักษณะของเครื่อง DSC , Δ แสดงถึงระดับสัญญาณที่ต่างกัน.....	24
รูปที่ 16 ลวดโลหะนิเกิลไทเทเนียมชนิดส่วนโค้งสำเร็จรูปจากบริษัทยูนิเทค	
ชื่อทางการค้า Nitinol <sup>®</sup> ขนาด 0.016 นิ้ว.....	30
รูปที่ 17 ลวดโลหะนิเกิลไทเทเนียมชนิดส่วนโค้งสำเร็จรูปที่ถูกตัดปลายยาว 4 มม.....	30
รูปที่ 18 แสดงวัสดุและวิธีการบรรจุขึ้นตัวอย่างเพื่อทำการอบชุบด้วยความร้อน.....	31
รูปที่ 19 แสดงเตาเผาพอร์ซเลนสูญญากาศ .....	31
รูปที่ 20 เครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์และอุปกรณ์ประกอบ .....	32

**สารบัญรูปภาพ (ต่อ)**

รูปที่ 21 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนสู่เฟสมาร์เทนไซต์ของลวดโลหะ  
 นิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 35

รูปที่ 22 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่การเปลี่ยนสู่เฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดของลวดโลหะ  
 นิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 37

รูปที่ 23 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนสู่เฟสออสเทนไนท์ของลวดโลหะ  
 นิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 39

รูปที่ 24 แสดงค่าอุณหภูมิที่การเปลี่ยนสู่เฟสออสเทนไนท์สิ้นสุดของลวดโลหะ  
 นิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 41

รูปที่ 25 แสดงค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม  
 ค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ..... 42

รูปที่ 26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส  
 แต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อน ..... 43

รูปที่ 27 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของ  
 ลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup> ที่ได้รับมา ..... 52

รูปที่ 28 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 1 ..... 53

รูปที่ 29 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 400°ซ ..... 54

รูปที่ 30 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 450°ซ ..... 55

รูปที่ 31 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 500°ซ ..... 56

รูปที่ 32 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°ซ ..... 57

รูปที่ 33 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol<sup>®</sup>  
 ที่ผ่านการอบชุบความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 600°ซ ..... 58