

การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด
ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง



นางสาว สราวดี กัลยาณภักย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

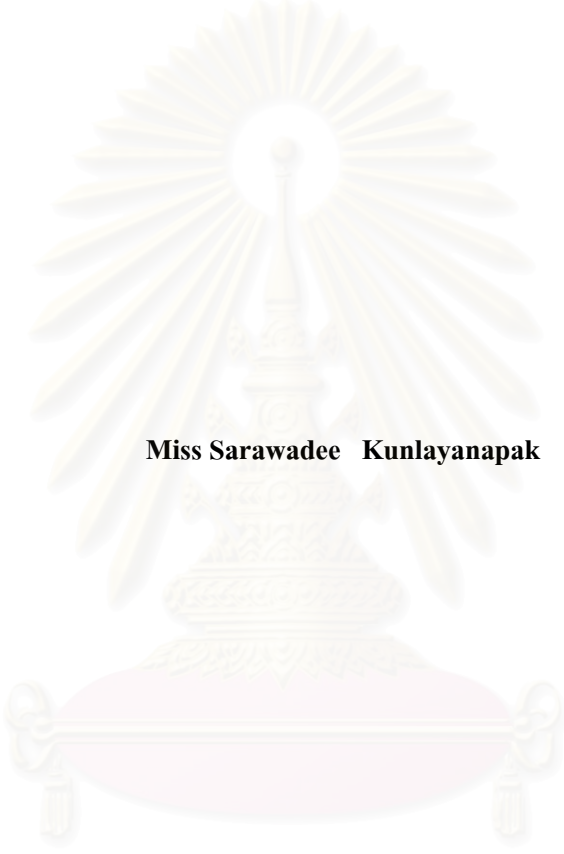
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4087-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A STUDY OF THE DEACTIVATION FORCE
OF TREATED SUPERELASTIC NICKEL-TITANIUM ALLOY WIRE
BY THE DIRECT ELECTRIC RESISTANCE HEAT TREATMENT METHOD**

Miss Sarawadee Kunlayanapak



**สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Orthodontics

Department of Orthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4087-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง
โดย	นางสาว ศรารดี กัลยาณภักย์
สาขาวิชา	ทันตกรรมจัดฟัน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง จินตนา ศิริชุมพันธ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สุรสิทธิ์ เกียรติพงษ์สาร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ กนก สรเทศน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง จินตนา ศิริชุมพันธ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง กรพินท์ มหาทุมะรัตน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดอกเตอร์ ชาตรี แก้วสุริยธำรง)

ศรวาดิ่ กัลยาณภาคย์ : การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง. (A STUDY OF THE DEACTIVATION FORCE OF TREATED SUPERELASTIC NICKEL-TITANIUM ALLOY WIRE BY THE DIRECT ELECTRIC RESISTANCE HEAT TREATMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : (ผศ.ทพ. วัชระ เพชรคุปต์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ทพญ. จินตนา ศิริชุมพันธ์, 119 หน้า. ISBN 974-17-4087-5.)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และเพื่อเปรียบเทียบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมดังกล่าว กับลวดโลหะผสมยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร โดยศึกษาจากส่วนปลายของลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² จำนวน 2 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี และยี่ห้อไนไท ของบริษัททอมโก ความยาว 21.5 มิลลิเมตร ด้วยวิธีทดสอบความงอสามจุด การกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง จะใช้กระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นระยะเวลา 3, 4 และ 5 วินาที และได้อ้างอิงถึงค่าคุณสมบัติทางทฤษฎี ที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับการกระตุ้น จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกระยะการคืนกลับ โดยขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมที่ถูกกระตุ้นดังกล่าว จะมีค่ามากกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับการกระตุ้น และการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับจะแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียส

ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4476124232 : MAJOR ORTHODONTICS

KEY WORD: DEACTIVATION FORCE / NICKEL TITANIUM ALLOY WIRE / SUPERELASTIC / SENTALLOY HEAVY TYPE / NITI / DIRECT ELECTRIC RESISTANCE HEAT TREATMENT METHOD / THREE POINT BENDING TEST / LAW OF CONSERVATION OF ENERGY

SARAWADEE KUNLAYANAPAK : A STUDY OF THE DEACTIVATION FORCE OF TREATED SUPERELASTIC NICKEL-TITANIUM ALLOY WIRE BY THE DIRECT ELECTRIC RESISTANCE HEAT TREATMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. VACHARA PHETCHARAKUPT, THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. CHINTANA SIRICHOMPUN, 119 pp. ISBN 974-17-4087-5

The objectives of this research were to study the deactivation force of treated superelastic nickel-titanium alloy wires by the direct electric resistance heat treatment method and to compare the deactivation forces of treated and non-treated groups in the same brand at 4 deactivation distance: 2.0, 1.5, 1.0 and 0.5 millimeters. The distal end of preformed rectangular archwires, 0.016x0.022 inches², 2 brands: Sentalloy Heavy type (Tomy Co.Ltd.) and NiTi (Ormco Co.Ltd.) were cut into 21.5 millimeters and tested by three point bending method. The optimum electric current for wire bending in 3, 4 and 5 seconds was used for treating the wires, and the theoretical temperatures which were calculated following the Law of Conservation of Energy had been referred. The means of the deactivation forces were analytically compared by a Oneway ANOVA at $p = 0.05$. The deactivation forces between the treated and non-treated groups in each brand were significantly different ($p < 0.05$) in every deactivation distance. Moreover, the deactivation forces in the treated group were higher than that in the untreated group of each brand. Additionally, the increasing in the deactivation forces of the treated group varied with the increasing in the theoretical temperatures which were calculated following the Law of Conservation of Energy during 421.4 to 520.5 °C.

Department/Program.....Orthodontics.....	Student's signature.....
Field of study.....Orthodontics.....	Advisor's signature.....
Academic year.....2003.....	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง จินตนา ศิริชุมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และคณาจารย์ในภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ทางสถิติ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ ฝ่ายวิจัยคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และนายอนุชาติ ศรีจันบาล ที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องลดยด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีน

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณนายภรณ์ดี ลิ้มไพฑูรย์ วิศวกรอิสระสาขาโลหวิทยา ที่ให้คำแนะนำเรื่องความรู้พื้นฐาน ที่มาของสูตรและการคำนวณค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีตามกฎอนุรักษพลังงาน

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ รวมทั้งกำลังใจที่มีให้กันเสมอมา

ขอขอบคุณบริษัท ออมโก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา) บริษัท แอคคอร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัด บริษัทโทมี (ประเทศญี่ปุ่น) และบริษัทไอคอนเท็กซ์ สำหรับลวดที่ใช้ในการวิจัย

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นางเดือนเพ็ญ ลิ้มปกานัญจนเวช มารดาผู้คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศาสตราจารย์พิเศษ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....		จ
กิตติกรรมประกาศ.....		ฉ
สารบัญ.....		ช
สารบัญตาราง.....		ฅ
สารบัญภาพ.....		ด
บทที่		
1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
	สมมติฐานการวิจัย.....	4
	ขอบเขตของการวิจัย.....	5
	ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
	ข้อจำกัดของการวิจัย.....	6
	คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	7
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
	โลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	10
	การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมาร์เทนไซต์.....	10
	คุณสมบัติจำรูป.....	13
	คุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด.....	14
	การใช้งานทางทันตกรรมจัดฟัน.....	17
	การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	19
	การให้ความร้อนกับลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	24
	วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3	ระเบียบวิธีวิจัย..... 33
	ประชากร..... 33
	กลุ่มตัวอย่าง..... 33
	วิธีดำเนินการวิจัย..... 33
	ขั้นตอนที่ 1..... 34
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 34
	การเก็บรวบรวมข้อมูล..... 38
	ตัวแปรของการวิจัย..... 39
	การวิเคราะห์ข้อมูล..... 40
	ขั้นตอนที่ 2..... 41
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 41
	การเก็บรวบรวมข้อมูล..... 45
	ตัวแปรของการวิจัย..... 47
	การวิเคราะห์ข้อมูล..... 48
4	ผลการทดลองและสรุปผลการวิจัย..... 50
	ผลการทดลอง..... 50
	ขั้นตอนที่ 1..... 50
	ขั้นตอนที่ 2..... 59
	สรุปผลการวิจัย..... 69
5	อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 70
	อภิปรายผลการวิจัย..... 70
	ข้อเสนอแนะ..... 75
	รายการอ้างอิง..... 76
	ภาคผนวก..... 80
	ภาคผนวก ก..... 81
	ภาคผนวก ข..... 85
	ภาคผนวก ค..... 102
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 119

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1:	แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ เปรียบเทียบกับระดับกระแสไฟฟ้าที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องเบนเดอร์ โซเวอร์-II.....	50
ตารางที่ 2:	แสดงค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด เมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสตรงในระดับที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที.....	51
ตารางที่ 3:	แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 3 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี.....	52
ตารางที่ 4:	แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี.....	53
ตารางที่ 5:	แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี.....	54
ตารางที่ 6:	แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 3 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท.....	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

- ตารางที่ 7: แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท.....56
- ตารางที่ 8: แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท.....57
- ตารางที่ 9: แสดงระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดและค่ามุมที่ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก เมื่อระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3, 4 และ 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท.....58
- ตารางที่ 10: แสดงการแบ่งกลุ่มตัวอย่างของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ตามระยะเวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้า ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง และค่าคุณสมบัติทางทฤษฎี ที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน.....59
- ตารางที่ 11: แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับหน่วยเป็นนิวตัน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ.....60
- ตารางที่ 12: แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร และสถิติ Tamhane ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร.....61

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 13: แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับหน่วยเป็นนิวตัน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ.....	63
ตารางที่ 14: แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร และสถิติ Tamhane ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร.....	64
ตารางที่ 15: แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ที่แต่ละระยะการคืนกลับ โดยเรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษพลังงาน จากน้อยไปมาก.....	66
ตารางที่ 16: แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ที่แต่ละระยะการคืนกลับ โดยเรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษพลังงาน จากน้อยไปมาก.....	67
ตาราง ก1: แสดงค่ามุมที่วัดได้จากการอ่านค่าโดยผู้วิจัยและบันทึกโดยผู้ช่วยวิจัย จำนวน 2 ครั้ง ในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง.....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ก2:	แสดงการทดสอบความสัมพันธ์ของค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ด้วยสถิติสหสัมพันธ์ของ Pearson ในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวดที่ถูกดัดเป็นมุมฉากโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง.....	84
ตาราง ก3:	แสดงการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ด้วยสถิติทีแบบจับคู่.....	84
ตาราง ข1:	การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	85
ตาราง ข2:	การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	86
ตาราง ข3:	การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	87
ตาราง ข4:	การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ข5:	การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	89
ตาราง ข6:	การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	90
ตาราง ข7:	การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	91
ตาราง ข8:	การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni.....	92
ตาราง ข9:	การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ข10: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	94
ตาราง ข11: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	95
ตาราง ข12: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Tamhane.....	96
ตาราง ข13: การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	97
ตาราง ข14: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	98
ตาราง ข15: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ข16: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่น ยิงยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni..... 100

ตาราง ค1: การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิงยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม สำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov..... 102

ตาราง ค2: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิงยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene..... 103

ตาราง ค3: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิงยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว..... 104

ตาราง ค4: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่น ยิงยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni..... 105

ตาราง ค5: การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิงยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม สำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	106
ตาราง ค6: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	107
ตาราง ค7: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	108
ตาราง ค8: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Tamhane.....	109
ตาราง ค9: การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม สำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	110
ตาราง ค10: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	111
ตาราง ค11: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ค12: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni.....	113
ตาราง ค13: การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า(กลุ่มที่ 1) และลวดยืดหยุ่นเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม สำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov.....	114
ตาราง ค14: การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene.....	115
ตาราง ค15: การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว.....	116
ตาราง ค16: การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ยืดหยุ่น ไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni.....	117

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 1:	แสดงโครงสร้างโมเลกุลบอดีเซ็นเตอร์คิวบิกหรือเตตระโกนอล ในวัฏภาคออสเทไนต์ และโครงสร้างโมเลกุลเฟสเซ็นเตอร์ เฮกซะโกนอลโคลสแพ็ก ในวัฏภาคมาร์เทนไซต์ ของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	11
รูปที่ 2:	แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกในวัฏภาคออสเทไนต์และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ ของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	12
รูปที่ 3:	แสดงการเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคออสเทไนต์ เมื่อได้รับความร้อน โดยปราศจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	12
รูปที่ 4:	แสดงการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก ชนิดฮุกเกียน และการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในลักษณะลื่นไถลหรือเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม โดยไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม.....	12
รูปที่ 5:	แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม.....	13
รูปที่ 6:	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	14
รูปที่ 7:	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม.....	15
รูปที่ 8:	แสดงการประเมินคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงเริ่มต้นกับค่าความแข็งแรงในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงในแนวระนาบ.....	17
รูปที่ 9:	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากการทดสอบความยืดของลวด 4 ชนิด หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว.....	20
รูปที่ 10:	แสดงการทดสอบความงอแบบแคนดิลีเวอร์ของลวดโลหะที่ถูกนำมาใช้ทางทันตกรรมจัดฟัน จำพวกโลหะไม่มีตระกูล ตามข้อกำหนดการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดทางทันตกรรม หมายเลข 32 ของทันตแพทยสมาคมประเทศสหรัฐอเมริกา.....	21
รูปที่ 11:	แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุดโดยการวางปลายลวดทั้งสองข้างบนจุดสัมผัสที่ปราศจากการยึดติด.....	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 12: แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุดโดยการยึดปลายลวดทั้งสองข้าง ด้วยแบร็กเกิดในแนวระนาบ.....22

รูปที่ 13: แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุดโดยการใช้แบบจำลองที่มีแบร็กเกิด แทนตำแหน่งพินทุกชิ้นในการยึดเส้นลวด..... 23

รูปที่ 14: แสดงตำแหน่งที่จับคีมบนลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณ 3.5 แอมแปร์ ที่จุด A กับ A' เป็นเวลา 45 นาที และที่จุด B กับ B' เป็นเวลา 15 นาที.....25

รูปที่ 15: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค ที่จุด Af และ Ms กับค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนครั้งที่สอง หน่วยเป็นเคลวิน..... 26

รูปที่ 16: แสดงการหาขนาดแรงกระทำของลวดขณะเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคออสเทนไนต์ (Af) หรือ ทรานซิชั่นนอล โหลด จากระยะในแนวตั้งของกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม.....27

รูปที่ 17: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานซิชั่นนอล โหลด กับค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนครั้งที่สองในช่วง 733 ถึง 813 เคลวิน (460 ถึง 540 องศาเซลเซียส).... 27

รูปที่ 18: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับการตัดลวดเจแปนีสไนไทเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง.....31

รูปที่ 19: แสดงผลการทดสอบความงอแบบแคนดิลีเวอร์ของลวดต่างชนิด ที่มีหน้าตัด วงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว..... 32

รูปที่ 20: แสดงเครื่องวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือแอมมิเตอร์ ของบริษัท Daiichi รุ่น DM209 ที่แสดงความละเอียด 0.01 แอมแปร์.....34

รูปที่ 21: แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ ไฮเรอร์-II ของบริษัทโทมี ประเทศญี่ปุ่น..... 35

รูปที่ 22: แสดงเครื่องมือช่วยตัดลวดเป็นมุมฉาก ซึ่งประกอบด้วยที่ยึดคีมปากนกสองอันในลักษณะที่ทำให้ลวดสามารถงอเป็นมุม 90 องศา หรือมุมฉากได้ เมื่อยึดลวดเส้นตรงกับคีมปากนกทั้งสองข้าง..... 36

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 23:	แสดงเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา ที่สามารถปรับตั้งระยะเวลาทำงานเป็นวินาทีได้ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 วินาที.....	36
รูปที่ 24:	แสดงไม้บรรทัดวัดมุม หรือ รูลเลอร์ โพเรทแทรกเตอร์ ยี่ห้อ HOL ประเทศไต้หวัน ที่สามารถอ่านค่าได้ที่ความละเอียด 0.5 องศา.....	37
รูปที่ 25:	แสดงแบบจำลองโลหะที่ยึดแบรกกเกตโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมแบบพินส์ จำนวน 2 ตัว โดยกำหนดให้ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของแบรกกเกตทั้งสองตัวเท่ากับ 14.5 มิลลิเมตร และแนวกึ่งกลางร่องแบรกกเกตทั้งสองตัวมีความขนานกันทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบ.....	42
รูปที่ 26:	แสดงฐานโลหะสำหรับยึดคีมปากนก 2 ตัวในแนวระนาบ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขอบด้านประชิดของคีมทั้งสองตัว เท่ากับ 19.5 มิลลิเมตร.....	42
รูปที่ 27:	แสดงเครื่องลอบด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงมาชีน รุ่น LR 10K.....	43
รูปที่ 28:	แสดงหัวกดลวดสำหรับต่อเข้ากับคอรอสเฮด ของเครื่องลอบด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงมาชีน ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 2.5 x 3 มิลลิเมตร ² ซึ่งเทียบได้กับขนาดความกว้างของแบรกกเกต 1 ซี.....	44
รูปที่ 29:	แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอบด์ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม กับระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร.....	60
รูปที่ 30	แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม กับระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร.....	63

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด เป็นลวดทางทันตกรรมจัดฟันชนิดหนึ่ง ที่มีโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก มีคุณสมบัติเฉพาะคือคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด (superelasticity)^(1,2) ซึ่งหมายถึง การที่ลวดสามารถให้แรงในปริมาณน้อยและเกือบคงที่อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ลวดคืนกลับ (deactivation) สู่รูปร่างเดิม หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไป ซึ่งเทียบได้กับแรงที่ลวดกระทำต่อฟันและ/หรืออวัยวะปริทันต์เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ตามการคืนกลับของลวด และจัดเป็นลวดที่มีความสามารถในการคืนกลับสูง (high springback) ลวดชนิดนี้จึงได้รับความนิยมอย่างมากในทางทันตกรรมจัดฟัน

คุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนวัฏภาค (phase transformation) ของโลหะ⁽³⁾ ซึ่งแบ่งได้ 2 วัฏภาคตามโครงสร้างโมเลกุล คือ วัฏภาคออสเทนไนต์ (austenitic phase) และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ (martensitic phase) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็น บอดีเซ็นเตอร์คิวบิกหรือเตตระโกนอล (body centered cubic or tetragonal) และเฟสเซ็นเตอร์ เฮกซะโกนอลโคลด์แพ็ค (faced centered hexagonal closed packed) ตามลำดับ โลหะผสมในแต่ละวัฏภาคจะมีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน โลหะผสมในวัฏภาคออสเทนไนต์ จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง มีลักษณะแข็งและคงรูปได้ดี ตรงข้ามกับในวัฏภาคมาร์เทนไซต์ ที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำ มีลักษณะนิ่มและถูกเปลี่ยนรูปได้ง่าย โลหะผสมในทั้งสองวัฏภาคสามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (reversible) ด้วยวิธีปราศจากการแพร่ (diffusionless transformation)⁽³⁻⁴⁾ ซึ่งเป็นวิธีที่อะตอมภายในเนื้อโลหะเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม โดยผิวสัมผัสระหว่างผลึกยังคงต่อเนื่องกัน เป็นผลให้รูปร่างโครงสร้างโดยรวมเปลี่ยนแปลงแต่องค์ประกอบโดยรวมคงเดิม อีกนัยหนึ่งคือการที่อะตอมจัดเรียงตัวใหม่ในรูปแบบที่บิดเบี้ยวหรือผิดไปจากเดิม แต่ผิวสัมผัสยังเชื่อมติดกัน การเปลี่ยนวัฏภาคของโลหะผสมดังกล่าวสามารถเกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงเหตุปัจจัย 2 ประการ คือ อุณหภูมิและความเค้น (stress)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนวัฏภาคของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เนื่องจากโลหะผสมในวัฏภาคออสเทนไนต์และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่างกัน ทำให้โลหะผสมในวัฏภาคหนึ่งสามารถเปลี่ยนสู่อีกวัฏภาคหนึ่งได้ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงถึงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค (transitional temperature range : TTR)⁽⁵⁾ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามองค์ประกอบและกรรมวิธีในการผลิตของแต่ละบริษัท การเปลี่ยนวัฏภาคของโลหะผสมโดย

อาศัยการเปลี่ยนอุณหภูมินี้ถูกเรียกว่าคุณสมบัติยืดหยุ่นตามอุณหภูมิ (thermoelasticity) หรือคุณสมบัติจำรูป (shape memory)^(1-3,5)

ความเค้นหรือแรงกระทำเพื่อให้ลวดหรือโลหะเปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม เป็นอีกปัจจัยที่สามารถทำให้โลหะเปลี่ยนวัฏภาคได้ กล่าวคือ โลหะผสมในวัฏภาคออสเทนไนต์จะสามารถเปลี่ยนสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์เมื่อได้รับความเค้นหรือแรงกระทำในปริมาณที่เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงนี้ถูกเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น (stress induced martensitic transformation)⁽³⁾ และเมื่อปลดปล่อยความเค้นหรือแรงกระทำดังกล่าว โลหะผสมในวัฏภาคมาร์เทนไซต์จะสามารถคืนกลับสู่วัฏภาคออสเทนไนต์ได้อีก ซึ่งเป็นการแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด แม้จะมีคุณสมบัติที่ดีดังกล่าวข้างต้น แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการสำหรับการใช้งานในทางคลินิก กล่าวคือ สามารถดัดหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (permanent deformation) ได้ยาก ลวดชนิดนี้จึงถูกผลิตออกจำหน่ายในรูปของลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ (preformed archwire) แต่การรักษาทางทันตกรรมจัดฟันบางกรณี มีความจำเป็นต้องทำการดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างลวด เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการรักษาในผู้ป่วยแต่ละราย และเพื่อสามารถใช้ประโยชน์จากลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวดได้อย่างเต็มที่ จึงน่าจะเป็นสิ่งที่ดีหากทันตแพทย์จัดฟันสามารถดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างของลวดโค้งได้อย่างถาวรตามต้องการขณะใช้งานในทางคลินิก จากความรู้ที่ว่าการใช้แรงเพื่อดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างลวดโดยมีขนาดของแรงกระทำไม่เกินขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (elastic deformation limit)⁽⁶⁻⁷⁾ ลวดจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ภายหลังปลดปล่อยความเค้นหรือแรงกระทำดังกล่าว และเนื่องจากลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด มีความสามารถในการคืนกลับเป็นเลิศ⁽¹⁻²⁾ ดังนั้นหากต้องการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรภายหลังการดัดด้วยแรงปกติที่ไม่เกินขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยการเปลี่ยนอุณหภูมิเพื่อปรับรูปแบบการเรียงตัวของโมเลกุลภายใน ทำให้สามารถงอรูปร่างใหม่ภายหลังการดัดได้อย่างถาวร

Miura, Mogi และ Ohura⁽⁸⁾ จึงคิดค้นเครื่องมือที่สามารถให้พลังงานความร้อน โดยอาศัยคุณสมบัติความต้านทานกระแสไฟฟ้าของโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของเส้นลวดหรือเรียกว่าวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (direct electric resistance heat treatment method)⁽⁸⁾ เพื่อสามารถดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างลวดได้อย่างถาวรตามต้องการขณะใช้งานในทางคลินิก ระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดจะมีความสัมพันธ์กันคือ ถ้าใช้ระดับกระแสไฟฟ้าสูง ระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดจะน้อย แต่ถ้าใช้ระดับกระแสไฟฟ้าต่ำ ระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดต้องนานขึ้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากการ

ทดสอบในลวดเจแปนีสไนไท (Japanese NiTi) ที่ถูกตัดเป็นมุม 90 องศา โดยระยะห่างระหว่างคีมที่จับเส้นลวดเท่ากับ 6 เซนติเมตร จึงเป็นที่น่าสนใจว่าลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด บริเวณที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด จะมีขนาดแรงคืนกลับแตกต่างจากลวดยี่ห้อนี้อย่างมากที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าหรือไม่ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์อลลอย ชนิดเฮฟวี (Sentalloy Heavy) ของบริษัทโทมี (Tomy) ที่มีช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคเท่ากับ 9-22 องศาเซลเซียส และลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท (NiTi) ของบริษัทออร์มโก (Ormco) ที่มีช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคเท่ากับ 5-16 องศาเซลเซียส โดยลวดทั้งสองยี่ห้อจะแสดงวัฏภาคออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง⁽⁹⁾



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด
2. เปรียบเทียบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด กับลวดดังกล่าวที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ที่แต่ละระยะการคืนกลับ
3. ศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด
4. เปรียบเทียบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด กับลวดดังกล่าวที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ที่แต่ละระยะการคืนกลับ

สมมติฐานการวิจัย

1. มีความแตกต่างกันของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด กับลวดดังกล่าวที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ที่แต่ละระยะการคืนกลับ
2. มีความแตกต่างกันของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด กับลวดดังกล่าวที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ที่แต่ละระยะการคืนกลับ

ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² จำนวน 2 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัท โทมี และยี่ห้อไนไท ของบริษัทออมโก จากการทดสอบความงอสามจุด (three point bending test) ในแต่ละระยะการคืนกลับ
2. การกระตุ้นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยวิธีให้ความร้อน จากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง จะเลือกใช้ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด กระทำที่ระยะเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเบนเดอร์ โซเรอร์-ทู (Bender Soarer-II) ของบริษัทโทมี ประเทศญี่ปุ่น
3. ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงในการศึกษานี้ หมายถึง ระดับกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด ที่ทำให้ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวด ภายหลังการตัดเป็นมุมฉากและให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด โดยไม่เกิดลักษณะร้อนแดงของเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไป สำหรับการใช้งานในทางคลินิก⁽⁵⁾

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การศึกษากระทำในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด จำนวน 2 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี และยี่ห้อไนไท ของบริษัทออมโก โดยความยาวลวดส่วนที่ได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 21.5 มิลลิเมตร ซึ่งได้จากผลรวมของความกว้างเฉลี่ยในแนวใกล้กลางและไกลกลางของพื้นที่ขั้วลวด ฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งและฟันกรามน้อยล่างซี่ที่สอง ของคนไทย⁽¹⁰⁾
2. การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ถูกประเมินจากการทดสอบความงอสามจุด ซึ่งลวดถูกทำให้เปลี่ยนมิติ (dimension) ไปจากเดิมและคืนกลับสู่รูปร่างเดิมในแนวตั้ง ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร

3. การกระตุ้นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงในการศึกษานี้ จะกระทำที่ระยะเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเบนเดอร์ โซเรอร์-ทู เท่านั้น
4. การศึกษากระทำในห้องปฏิบัติการ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และจัดกระทำในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน โดยทำการทดลองให้เสร็จภายในเวลา 4 สัปดาห์

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. การวัดผลไม่ครอบคลุมถึงคุณสมบัติบางประการ ที่มีผลต่อขนาดแรงคืนกลับของลวด เช่น การกัดกร่อนบริเวณผิวโลหะของลวด ความขรุขระของผิวลวดและผิวแบร็กเกต ซึ่งมีผลต่อค่าความเสียดทาน (friction)
2. วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง กระทำโดยใช้เครื่องเบนเดอร์ โซเรอร์-ทู ของบริษัทโทมี ประเทศญี่ปุ่น ที่ระยะเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น จึงไม่สามารถอ้างถึงเวลาอื่นที่นอกเหนือจากนี้ได้
3. การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ในงานวิจัยนี้ จะกระทำเฉพาะในแนวตั้ง ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะคือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร และความยาวลวดส่วนที่ได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 21.5 มิลลิเมตรเท่านั้น จึงไม่สามารถอ้างถึงแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางอื่นและ/หรือระยะทางที่นอกเหนือจากนี้ได้
4. ผลการวิจัยไม่สามารถอ้างถึงลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้ออื่น จากบริษัทผู้ผลิตอื่นและ/หรือขนาดอื่นนอกเหนือจากที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี และยี่ห้อไนไท ของบริษัททอมโก ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว²

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1. ขนาดแรงคืนกลับ (deactivation force)

หมายถึง ขนาดของแรงขณะลวดคืนกลับสู่รูปร่างเดิม หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไป มีหน่วยเป็นนิวตัน (newtons)
2. ระยะการคืนกลับ (deactivation distance)

หมายถึง ระยะทางในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ เพื่อคืนกลับสู่รูปร่างเดิมของลวด หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนมิติไป มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
3. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม (nickel-titanium alloy wire)

หมายถึง ลวดทางทันตกรรมจัดฟันชนิดหนึ่งที่มีโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก ได้รับความนิยมนอย่างมากในปัจจุบัน ด้วยคุณสมบัติเด่น คือ มีค่าความแข็งแรงต่ำ (low stiffness) และความสามารถในการคืนกลับสูง ตามลักษณะลวดทันตกรรมจัดฟันในอุดมคติ⁽¹¹⁾
4. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด (superelastic nickel-titanium alloy wire)

หมายถึง ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติคือ สามารถให้แรงในปริมาณน้อยและเกือบคงที่อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ลวดคืนกลับสู่รูปร่างเดิม หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไป ซึ่งเทียบได้กับแรงที่ลวดกระทำต่อฟันและ/หรืออวัยวะปริทันต์เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ตามการคืนกลับของลวด
5. ลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ (preformed archwire)

หมายถึง ลวดที่ถูกเตรียมจากบริษัทหรือโรงงานผู้ผลิตให้มีลักษณะเป็นส่วนโค้งแนวฟัน (dental arch) มีขนาดและรูปแบบหลากหลายให้เลือกใช้ ตามการสั่งจำหน่ายของบริษัทผู้ผลิต
6. วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (direct electric resistance heat treatment method)

หมายถึง วิธีที่ทำให้เกิดความร้อนโดยอาศัยคุณสมบัติความต้านทานกระแสไฟฟ้าของโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในเส้นลวด โดยเป็นการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

7. การดัดลวดโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (wire bending by the direct electric resistance heat treatment method)

หมายถึง การปรับเปลี่ยนรูปร่างของลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ลวดสามารถคงรูปร่างใหม่ภายหลังการดัดลวดได้อย่างถาวรตามต้องการ

8. ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

หมายถึง ระดับกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด ที่ทำให้ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวด ภายหลังการดัดเป็นมุมฉากและให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด โดยไม่เกิดลักษณะร้อนแดงของเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก⁽⁵⁾

9. ขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (elastic deformation limit)

หมายถึง ขนาดแรงสูงสุดที่ลวดถูกกระทำเพื่อเปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม และสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อปลดปล่อยแรงกระทำดังกล่าว หากขนาดของแรงกระทำมีค่าสูงเกินขีดจำกัดนี้ ลวดจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรและไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้

10. การทดสอบความงอสามจุด (three point bending test)

หมายถึง การทดสอบเพื่อหาขนาดแรงในแต่ละระยะการเปลี่ยนมิติของลวด ตำแหน่งตรงกลาง เมื่อยึดลวดตำแหน่งข้างเคียงทั้งสองข้างให้อยู่กับที่ หรือเทียบได้กับขนาดแรงที่เกิดกับพื้นที่กลางเมื่อพื้นที่ข้างเคียงทั้งสองถูกยึดให้อยู่กับที่ เพื่อออกเขียนลักษณะจริงของแรงกระทำในทางคลินิก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อ เซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการใช้งานในทางคลินิก
2. ได้ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อ ไนไท ของบริษัททอมโก ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการใช้งานในทางคลินิก
3. ได้ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ยี่ห้อยี่ห้อ เซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี และยี่ห้อยี่ห้อ ไนไท ของบริษัททอมโก เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในทางคลินิก
4. เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาคุณสมบัติของลวด รวมทั้งเครื่องมือและวิธีการตัดลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวดต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมนิเกิล-ไทเทเนียม

โลหะผสมนิเกิล-ไทเทเนียม เป็นโลหะจำรูป (shape memory alloy)⁽³⁾ ชนิดหนึ่งที่ถูกคิดค้นขึ้นในปี 1961 โดย William J. Buehler นักวิจัยทางโลหะวิทยาและคณะ แห่งห้องทดลองสรรพาวุธกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา ในชื่อสามัญว่า ไนตินอล (Nitinol) ซึ่งบ่งบอกถึงองค์ประกอบและแหล่งที่มาของโลหะ กล่าวคือ Ni มาจาก nickel, ti มาจาก titanium และ nol มาจาก Naval Ordnance Laboratory หรือห้องทดลองสรรพาวุธกองทัพเรือ ด้วยคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ที่อุณหภูมิต่ำและคืนกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

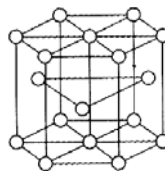
ไนตินอล ประกอบด้วยโลหะนิเกิลและโลหะไทเทเนียม ในปริมาณร้อยละ 50 โดยสัดส่วนจำนวนอะตอม ไนตินอลมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ ปริมาณความเครียดที่สามารถคืนกลับได้ (recovery strain) มีค่าสูงถึงร้อยละ 8⁽³⁾ ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี (corrosion resistance) และไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ ทำให้ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์หลายชนิด ได้แก่ วัสดุปลูกฝัง (implant materials) เพื่อยึดกระดูกสันหลังในรายที่มีการคดงอของกระดูกดังกล่าว หรือข้อต่อเทียม (joint prosthesis) เป็นต้น สำหรับการใช้งานทางทันตกรรมจัดฟัน Andreasen และ Hilleman⁽¹²⁾ ได้นำเสนอเป็นครั้งแรกในรูปของลวดโค้ง (arch wire) ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น คือ คุณสมบัติจำรูป และพัฒนาจนได้คุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ยาวในเวลาต่อมา

การเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์

จากการศึกษาทางโลหะวิทยาของโลหะผสมนิเกิล-ไทเทเนียม พบว่าโลหะผสมดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 2 วัฏภาคตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุล คือ วัฏภาคดั้งเดิม (parent phase) หรือวัฏภาคออสเทนไนต์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นบอดีเซ็นเตอร์คิวบิกหรือเตตระโกนอล และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเฟซเซ็นเตอร์เฮกซะโกนอลโคลสแพ็กดังแสดงในรูปที่ 1



A



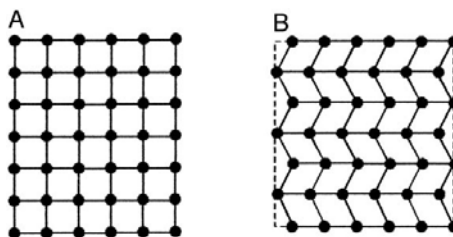
B

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลบอดีเซ็นเตอร์คิวบิกหรือเตตระโกนอลในวัฏภาคออสเทนไนต์ (A) และโครงสร้างโมเลกุลเฟสเซ็นเตอร์เฮกซะโกนอลโคลสแพ็ก ในวัฏภาคมาร์เทนไซต์ (B) ของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม

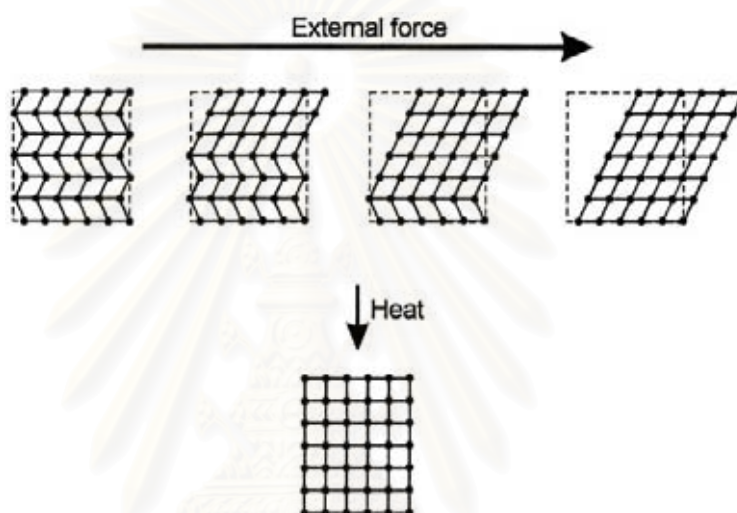
โลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ในแต่ละวัฏภาคจะแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนี้

วัฏภาคออสเทนไนต์	มีความแข็งแรง สามารถคงรูปได้ดี มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง
วัฏภาคมาร์เทนไซต์	มีลักษณะอ่อนนุ่ม เปลี่ยนรูปได้ง่าย มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำ

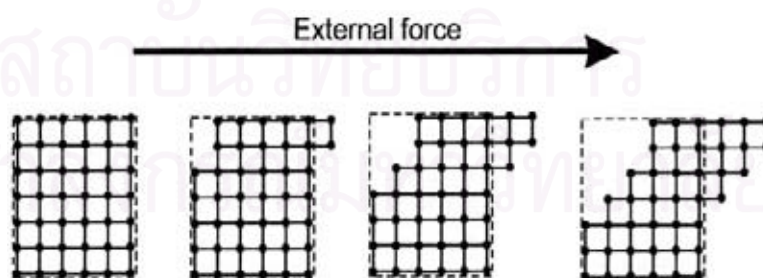
โลหะผสมในวัฏภาคออสเทนไนต์สามารถเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์ได้ จากการเปลี่ยนแปลงเหตุปัจจัย 2 ประการ คือ การลดอุณหภูมิลงต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค และ/หรือ การให้ความเค้นหรือแรงกระทำสูงถึงระดับที่เหมาะสม จะทำให้โลหะผสมสามารถเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์ และแสดงคุณสมบัติจำรูปและคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดอันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมได้ ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป การเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์นี้ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกที่ปราศจากการแพร่ของอะตอมโลหะ ซึ่งหมายถึง การที่อะตอมภายในเนื้อโลหะเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมโดยผิวสัมผัสระหว่างผลึกยังคงต่อเนื่องกัน เป็นผลให้รูปร่างโครงสร้างโดยรวมเปลี่ยนแปลงแต่องค์ประกอบโดยรวมคงเดิม อีกนัยหนึ่งคือการที่อะตอมจัดเรียงตัวใหม่ในรูปแบบที่บิดเบี้ยวหรือผิดไปจากเดิมแต่ผิวสัมผัสยังเชื่อมติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค และ/หรือปลดปล่อยความเค้นหรือแรงกระทำ อะตอมภายในของโลหะจะเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้โลหะสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ดังแสดงในรูปที่ 3 คุณสมบัตินี้จัดเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่ปรากฏในโลหะผสมชนิดอื่น เช่น โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรในลักษณะลื่นไถลหรือเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม (slip or dislocation) โดยไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้⁽³⁾ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกในวัฏภาคออสเทนไนต์ (A) และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ (B) ของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม



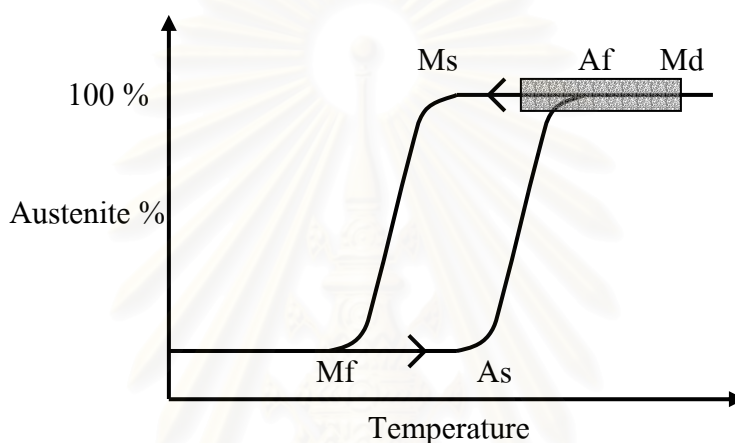
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโครงสร้างโดยรวมของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ในวัฏภาคมาร์เทนไซต์เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก (External force) ซึ่งสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเมื่อได้รับความร้อน (Heat)



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรในลักษณะลื่นไถลหรือเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิมของอะตอมภายใน โดยไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

คุณสมบัติจำรูป

หมายถึง คุณสมบัติของโลหะที่สามารถเปลี่ยนกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้ เมื่อได้รับความร้อนสูงถึงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค⁽⁵⁾ หรือเรียกว่ามีคุณสมบัติยืดหยุ่นตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนวัฏภาคของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมตามการเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค โลหะผสมจะแสดงวัฏภาคมาร์เทนไซต์ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ถูกทำให้เปลี่ยนรูปได้ง่าย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โลหะผสมจะสามารถคืนกลับรูปร่างเดิม กล่าวคือ สามารถเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคออสเทนไนต์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม

โดย Ms คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่โลหะแสดงวัฏภาคมาร์เทนไซต์ (martensitic start)

Mf คือ อุณหภูมิที่โลหะแสดงวัฏภาคมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์ (martensitic finish)

As คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่โลหะแสดงวัฏภาคออสเทนไนต์ (austenitic start)

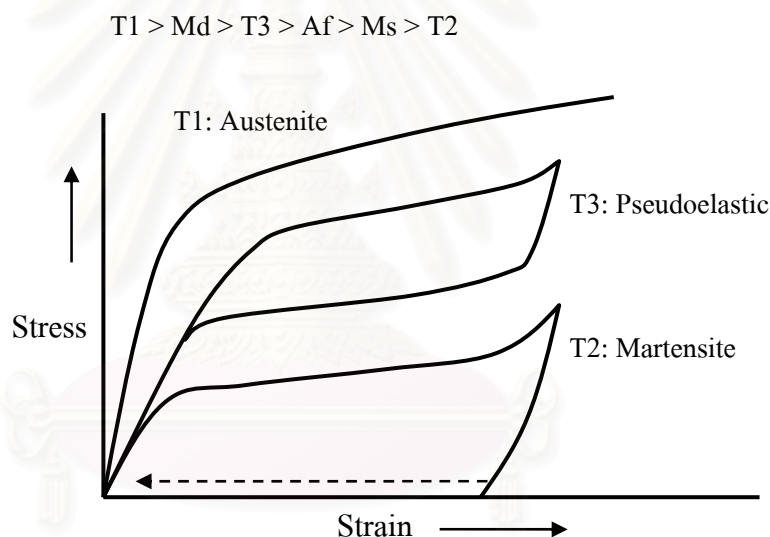
Af คือ อุณหภูมิที่โลหะแสดงวัฏภาคออสเทนไนต์โดยสมบูรณ์ (austenitic finish)

Md คือ อุณหภูมิสูงสุดที่โลหะสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จากการเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นได้

ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค จะมีค่าจำเพาะขึ้นกับชนิดและปริมาณของโลหะที่เป็นองค์ประกอบ รวมถึงกระบวนการ ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิต⁽¹³⁾ เนื่องจากโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม อาจปรากฏได้ในหลายรูปแบบ เช่น NiTi, Ti₂Ni₃ หรือ Ti₂Ni เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต แต่โดยส่วนใหญ่ปริมาณอะตอมของโลหะไทเทเนียมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 49.7 – 50.7 เนื่องจากถ้าต่ำกว่าร้อยละ 49.4 โลหะผสมจะอยู่ในรูปของ TiNi₃ ซึ่งขาดความเสถียร และไม่สามารถคงรูปอยู่ได้

คุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด

หมายถึง การที่ลวดสามารถให้แรงในปริมาณน้อยและเกือบคงที่อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ลวดคืนกลับสู่รูปร่างเดิม หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไป⁽¹⁻²⁾ อันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น และการเปลี่ยนกลับสู่สัณฐานวิทยาเดิมหรือสัณฐานวิทยาออสเทนไนต์ได้เมื่อความเค้นหรือแรงกระทำถูกปลดปล่อย คุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดนี้จะปรากฏในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ที่มีค่าอุณหภูมิที่จุด Af ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง⁽¹⁵⁾ ซึ่งทำให้โลหะผสมดังกล่าวแสดงโครงสร้างในสัณฐานวิทยาออสเทนไนต์ขณะนำมาใช้งาน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นนี้ จะต้องกระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า Md เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ โลหะจะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6

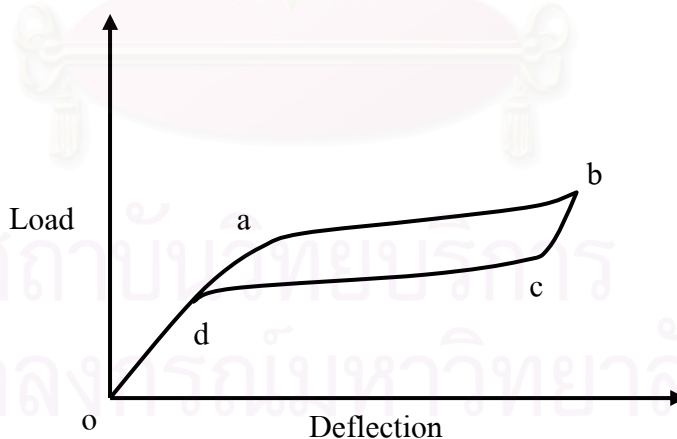


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้

T1 คือ อุณหภูมิที่สูงกว่า Md ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิสูงสุดที่โลหะผสมสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จากการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นได้ ดังนั้นที่อุณหภูมินี้โลหะผสมจึงแสดงสัณฐานวิทยาออสเทนไนต์โดยสมบูรณ์ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้

- T2 คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า M_s ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิเริ่มต้นที่โลหะผสมจะแสดงวัฏภาค มาร์เทนไซต์ ทำให้ที่อุณหภูมินี้ โลหะผสมจะแสดงคุณสมบัติเฉพาะในวัฏภาค มาร์เทนไซต์เท่านั้น โดยไม่สามารถเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคออสเทนไนต์ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้
- T3 คือ อุณหภูมิที่สูงกว่า A_f ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิที่โลหะผสมแสดงวัฏภาคออสเทนไนต์ โดยสมบูรณ์ แต่ไม่เกิน M_d ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิสูงสุดที่โลหะผสมสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จากการเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาค มาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นได้ ทำให้ที่อุณหภูมินี้โลหะผสมสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้ เมื่อได้รับความเค้นหรือแรงกระทำในระดับที่เหมาะสม จึงเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการใช้งานทางทันตกรรมจัดฟัน

คุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด สามารถอธิบายได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain) จากการทดสอบความยืด (tensile test)^(2,9) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม (load-deflection) จากการทดสอบความงอ (bending test)^(4,16-17) หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความงอ (bending moment) กับค่ามุมในการงอของลวด^(8,18-20) ซึ่งจะปรากฏกราฟในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันทั้งสิ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรง (Load) กับระยะทาง (Deflection) ที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม

ลักษณะของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ระยะ $o - a$

เป็นระยะที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม หรือเรียกว่า ค่าความแข็งแกร่งเริ่มต้น (initial stiffness) ซึ่งระยะนี้ของกราฟจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบฮิสเทรีติกของโลหะผสมในวัฏภาคออสเทนไนต์

2. ระยะ $a - b$

เป็นระยะที่เมื่อให้แรงขนาดหนึ่งในปริมาณคงที่หรือเกือบคงที่ โลหะจะสามารถเปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิมได้เป็นระยะทางไกล กราฟจะปรากฏเป็นเส้นตรงเกือบขนานกับแกนนอนในแนวระนาบ ขนาดแรงดังกล่าวนี้จะทำให้โลหะผสมสามารถเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นได้

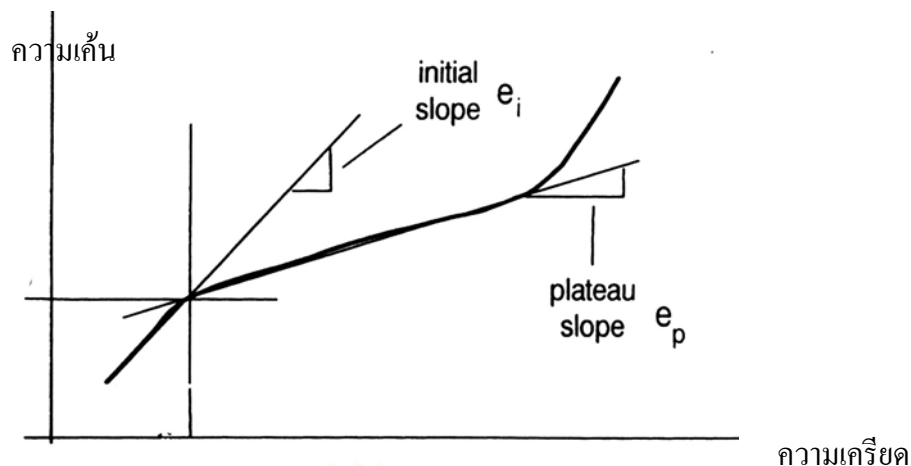
3. ระยะ $b - c$

เป็นระยะที่เส้นกราฟเอียงลงเมื่อความเค้นหรือแรงกระทำถูกปลดปล่อย ทำให้โลหะผสมสามารถเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคดั้งเดิมหรือวัฏภาคออสเทนไนต์ได้

4. ระยะ $c - d$

เป็นระยะที่โลหะผสมสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จากการเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคออสเทนไนต์เมื่อปลดปล่อยความเค้นหรือแรงกระทำ กราฟจะปรากฏเป็นเส้นตรงเกือบขนานกับแกนนอนในแนวระนาบ คล้ายกับระยะ $a - b$ ซึ่งทางทันตกรรมจัดฟัน มักจะให้ความสำคัญกับขนาดแรงในระยะนี้ เนื่องจากเป็นขนาดแรงที่ได้จากการคืนกลับสู่รูปร่างเดิมของโลหะ เช่นเดียวกันกับการคืนตัวของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน

Segner และ Ibe⁽¹⁷⁾ ให้นิยามเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม จากอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแกร่งเริ่มต้นกับค่าความแข็งแกร่งในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงในแนวระนาบ ซึ่งค่าความแข็งแกร่งสามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 8 ถ้าอัตราส่วนของค่าความแข็งแกร่งดังกล่าว มีค่ามากกว่า 8 แสดงว่า มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด
 มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 8 แสดงว่า มีแนวโน้มของคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด
 มีค่าน้อยกว่า 2 แสดงว่า ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด



รูปที่ 8 แสดงการประเมินคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงเริ่มต้น (initial slope, e_i) กับค่าความแข็งแรงในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงในแนวระนาบ (plateau slope, e_p)

การใช้งานทางทันตกรรมจัดฟัน

การใช้งานของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมในทางทันตกรรมจัดฟัน มาจากแนวคิดที่ต้องการลวดซึ่งมีคุณสมบัติในอุดมคติ เพื่อประโยชน์สูงสุดสำหรับการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน โดย Burstone⁽²¹⁾ ได้สรุปคุณสมบัติในอุดมคติของลวดไว้ดังนี้

1. มีค่าความยืดหยุ่น (resilience) สูง
2. มีค่าอีลาสติคโมดูลัส (modulus of elasticity) หรือค่าความแข็งแรง (stiffness) ต่ำ
3. ให้แรงในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่อง (light continuous force)
4. มีระยะเวลาทำงาน (durability) มาก

ต่อมา Andreasen และ Hilleman⁽¹²⁾ จึงริเริ่มการนำลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม มาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน โดยร่วมกับบริษัทยูนิเทค (Unitek) ในการผลิตลวดโลหะผสมดังกล่าว ออกวางจำหน่ายเป็นครั้งแรกในชื่อของ Nitinol™ ซึ่งมีอัตราส่วนจำนวนอะตอมของโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียมในปริมาณที่เท่ากัน (equiatomic nickel titanium alloy) ด้วยข้อได้เปรียบของคุณสมบัติเชิงกลบางประการเมื่อเทียบกับลวดชนิดดั้งเดิม เช่น ลวดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม คือ ค่าอีลาสติคโมดูลัสหรือค่าความแข็งแรงต่ำ และค่าขีดจำกัดแบบอีลาสติกสูง ในระยะแรกของการใช้งาน อาศัยเพียงคุณสมบัติของลวดที่มีค่าขีดจำกัดแบบอีลาสติก และความทนต่อการสึกกร่อน (corrosion resistance) สูงกว่าลวดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดพันเกลียวหลายเส้น (multiflex wire) เท่านั้น⁽¹²⁾ ต่อมาจึงเริ่มใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติจำรูป กล่าวคือ ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมที่นำมาใช้ สามารถคืนกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ถ้าถูกยืดหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างไม่เกินร้อยละ 7 ถึง 8 ของความยาวเดิม^(22,23) และได้ปรับปรุงคุณสมบัติอย่างต่อเนื่องจนมีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จนเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

โดยเฉพาะในขั้นตอนแรกของการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน หรือระยะปรับระดับฟัน (leveling phase)⁽²⁴⁾

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ที่ใช้ในทางทันตกรรมจัดฟันปัจจุบัน แบ่งได้ 3 ชนิด ตามความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกล⁽²⁴⁾ ดังนี้

1. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดดั้งเดิม (Conventional type)

เป็นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดหนึ่ง ที่แสดงวัฏภาคมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิห้อง (martensitic stabilized) ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติการเปลี่ยนวัฏภาค คุณสมบัติจำรูป หรือคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้ เนื่องจากกรรมวิธีในการผลิตเป็นแบบโคลเวิร์ก (cold work) แต่มีคุณสมบัติเด่น คือ มีค่าความแข็งแรงต่ำ และมีความสามารถในการคืนกลับสูง อย่างไรก็ตามขนาดของแรงที่เกิดขึ้นจากลวดโลหะผสมชนิดนี้จะมีค่าไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ถ้าลวดถูกทำให้เปลี่ยนมิติไปมากก็ต้องใช้แรงกระทำมากและขนาดแรงขณะคืนกลับของลวดก็จะมากตามไปด้วย จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม จะปรากฏเป็นเส้นตรง ลวดในกลุ่มนี้ได้แก่ เวิร์ก ฮาร์ดเดนด ไนทินอล (work hardened Nitinol) ของบริษัทยูนิตек เป็นต้น

2. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด (Superelastic type)

เป็นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดหนึ่ง ที่แสดงวัฏภาคออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง (austenitic active) เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงสามารถเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคมาร์เทนไซต์ได้โดยอาศัยความเค้น ลวดโลหะผสมชนิดนี้ถูกคิดค้นครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษ 1980 ด้วยคุณสมบัติเด่นคือ ให้แรงปริมาณน้อยและคงที่อย่างต่อเนื่องขณะคืนกลับสู่รูปร่างเดิม ลวดในกลุ่มนี้ได้แก่ ไชนีสไนไท (Chinese NiTi)⁽¹⁹⁾ และเจแปนีสไนไท⁽²⁾ เป็นต้น

3. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นตามอุณหภูมิ (Thermoelastic type)

เป็นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดหนึ่ง ที่แสดงวัฏภาคมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิห้อง (martensitic active) สามารถเปลี่ยนแปลงสู่วัฏภาคออสเทนไนต์ได้ เมื่อได้รับความร้อนสูงถึงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค ซึ่งมักถูกกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในร่างกายหรืออุณหภูมิในช่องปาก⁽²⁵⁻²⁷⁾ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยทั่วไปจะระบุช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคมาให้ เช่น คอปเปอร์ไนไทที่ 37 องศาเซลเซียส (Copper NiTi 37^o) ของบริษัทออมโก เป็นต้น ลวดชนิดนี้จะมีลักษณะอ่อนนุ่มและถูกเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถใส่เข้าไปในร่องแปรงเกดได้สะดวกแม้ในรายที่มีฟันซ้อนเกค่อนข้างมาก และเมื่อลวดได้รับความร้อนสูงเท่ากับอุณหภูมิในช่องปากซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค จะทำให้ลวดโลหะผสมสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมตามแนวโค้งขึ้นรูปสำเร็จที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ เป็นผลให้เกิดการ

เคลื่อนที่ของฟันไปสู่ตำแหน่งใหม่ตามรูปร่างแนวโค้งของลวดดัดง่าม ด้วยแรงในปริมาณน้อยและคงที่อย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ สามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้เช่นเดียวกับลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ในข้อ 2

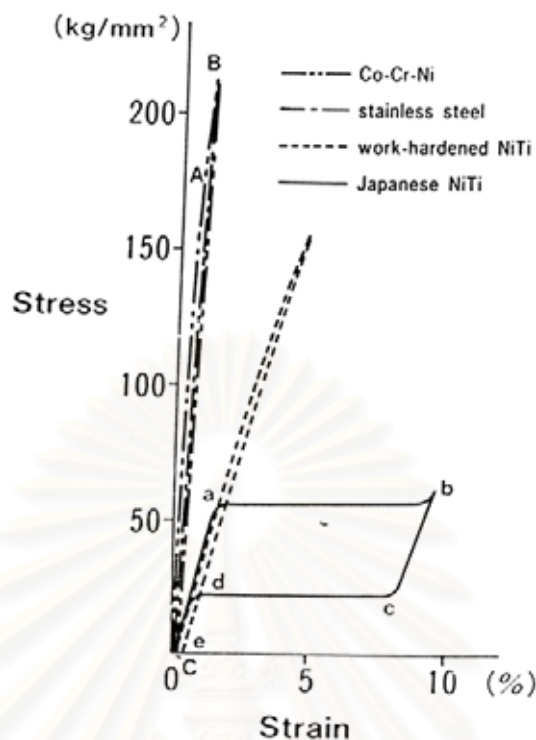
การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การทดสอบความยืด

กระทำได้ด้วยเครื่องทดสอบ (testing machine) โดยยึดปลายลวดข้างหนึ่งให้อยู่กับที่ และให้แรงยืดที่ปลายลวดอีกข้าง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ กับความยาวลวดที่เปลี่ยนไป หรือในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะทำให้ทราบค่าคุณสมบัติเชิงกลบางประการ ได้แก่ ค่าอิลาสติคโมดูลัสหรือค่าความแข็งแรง หมายถึง ขนาดแรงที่ทำให้ลวดเปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม 1 หน่วยความยาว ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ

จากหลายการศึกษาพบว่าเมื่อทำการทดสอบความยืดในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม จะต้องทำให้ลวดโลหะผสมดังกล่าวมีความยาวเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 7 ถึง 8 ของความยาวเดิม^(22,23) จึงจะสามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดได้



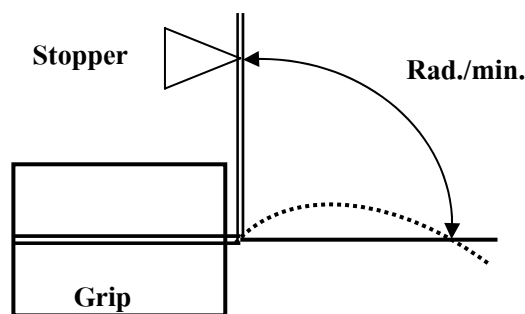
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากการทดสอบความยืดของ ลวด 4 ชนิด หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว⁽²⁾

2. การทดสอบความงอ

เนื่องจากการทดสอบความยืดในข้อที่ 1 มีข้อด้อย คือ การยืดลวดเป็นสิ่งที่ไม่ปรากฏจริง สำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงมีการคิดค้นวิธีทดสอบความงอในหลายรูปแบบเพื่อให้ใกล้เคียงกับลักษณะใช้งานจริงในทางคลินิก ได้แก่

2.1 การทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ (cantilever bending test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะที่ถูกนำมาใช้ทางทันตกรรมจัดฟัน จำพวกโลหะไม่มีตระกูล (not containing precious metals) ตามข้อกำหนดหมายเลข 32 ของทันตแพทย์สมาคมประเทศสหรัฐอเมริกา (American Dental Association)⁽²⁸⁾ ซึ่งกระทำได้โดยการงอลวดเป็นมุม 90 องศาหรือมุมฉาก จากนั้นกดปลายด้านหนึ่งจนลวดกลายเป็นเส้นตรงในแนวระนาบแล้วปล่อย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความงอ หน่วยเป็นกรัม-มิลลิเมตร กับค่ามุมที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนมิติไปจากเดิม หน่วยเป็นองศา ดังแสดงในรูปที่ 10



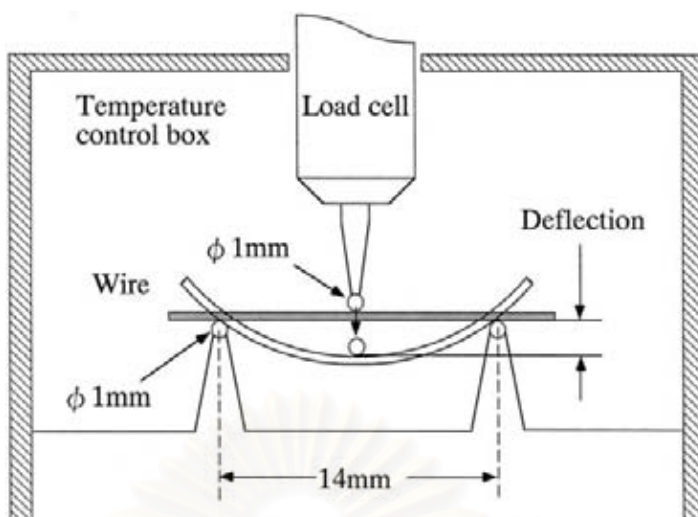
รูปที่ 10 แสดงการทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ของลวดโลหะที่ถูกนำมาใช้ทางทันตกรรม จัดฟัน จำพวกโลหะไม่มีตระกูล ตามข้อกำหนดการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของลวดทางทันตกรรม หมายเลข 32 ของทันตแพทยสมาคมประเทศสหรัฐอเมริกา

การทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ จะทำให้ทราบค่าความสามารถในการคืนกลับสู่รูปร่างเดิมของลวดได้ โดยพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่ามุมที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนไปอย่างถาวรภายหลังปลดปล่อยความเค้นหรือแรงกระทำ กับค่ามุมของลวดที่ถูกตัดไว้ในตอนเริ่มต้น จากหลายการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จะแสดงความสามารถในการคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ดีกว่าลวดที่ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด^(8,13,18,19,29)

อย่างไรก็ดีการทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ดังกล่าวข้างต้น ก็ยังไม่สามารถลอกเลียนลักษณะจริงทางคลินิก ในกรณีที่ลวดถูกยึดกับฟันซี่ข้างเคียงทั้งสองได้ เนื่องจากการทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ ปลายลวดด้านหนึ่งจะถูกปล่อยเป็นอิสระ จึงมีการเสนอวิธีทดสอบความงอสามจุดในเวลาต่อมา

2.2 การทดสอบความงอสามจุด (three point bending test)

การทดสอบความงอสามจุด กระทำได้โดยยึดปลายลวดทั้งสองข้างอยู่กับที่ ขณะทำการทดสอบความงอของลวดบริเวณกึ่งกลาง เครื่องมือในการทดสอบด้วยวิธีนี้อาจมีได้หลากหลายรูปแบบขึ้นกับวัตถุประสงค์ของผู้ทดลอง เช่น การวางปลายเส้นลวดทั้งสองข้างลงบนจุดสัมผัสผิวโดยปราศจากการยึดติด⁽³⁰⁾ การยึดปลายลวดทั้งสองข้างด้วยแบรคเกตในแนวระนาบ⁽³¹⁾ หรือการใช้แบบจำลองที่มีแบรคเกตแทนตำแหน่งฟันทุกซี่ในการยึดเส้นลวด⁽³¹⁾ ดังแสดงในรูปที่ 11 ถึง 13 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ผลการทดลองโดยเฉพาะค่าของขนาดแรงกระทำมีความแตกต่างกัน^(17,30,33)



รูปที่ 11 แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุด โดยการวางปลายลวดทั้งสองข้างบนจุดสัมผัสที่ปราศจากการยึดติด⁽³⁰⁾



รูปที่ 12 แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุด โดยการยึดปลายลวดทั้งสองข้างด้วยแบรACKET ในแนวระนาบ⁽³¹⁾



รูปที่ 13 แสดงรูปแบบการทดสอบความงอสามจุด โดยการใช้แบบจำลองที่มีแบร็กเกตแทนตำแหน่งพื้นทุกซี่ในการยึดเส้นลวด⁽³¹⁾

อย่างไรก็ตาม แม้จะใช้เครื่องมือแตกต่างกันหลากหลายรูปแบบในการทดสอบความงอสามจุด แต่ผลการทดลองในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่แสดงจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม จะมีลักษณะไม่แตกต่างไปจากที่แสดงไว้ในรูปที่ 7

Segner และ Ibe⁽¹⁷⁾ ได้ทดสอบความงอสามจุดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.014 นิ้ว และ 0.016 นิ้ว และลวดโลหะผสมดังกล่าว หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² และ 0.017×0.025 นิ้ว² จำนวน 16 ยี่ห่อ จาก 9 บริษัทผู้ผลิต เพื่ออธิบายการแสดงความสัมพันธ์ยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของค่าความแข็งแรงเริ่มต้น กับค่าความแข็งแรงในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงในแนวระนาบ ซึ่งอัตราส่วนนี้จะต้องมีค่ามากกว่า 8 จึงจะถือว่ามีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด ถ้ามีค่าน้อยกว่า 2 จะถือว่าไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด ผลการศึกษาพบว่าลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.014 นิ้ว และ 0.016 นิ้ว ทุกยี่ห่อที่ทำการศึกษา จะไม่แสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดตามข้อกำหนดข้างต้น ส่วนลวดโลหะผสมดังกล่าว หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² จำนวน 3 ยี่ห่อ และขนาด 0.017×0.025 นิ้ว² จำนวน 2 ยี่ห่อเท่านั้น ที่แสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดตามข้อกำหนดข้างต้น

Nakano และคณะ⁽³⁰⁾ ได้ทดสอบความงอสามจุดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว จำนวน 19 ยี่ห่อ และลวดโลหะผสมดังกล่าว หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² จำนวน 23 ยี่ห่อ จาก 9 บริษัทผู้ผลิต เพื่อศึกษาขนาดแรงคืนกลับและการแสดงความสัมพันธ์ยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของ

ขนาดแรงที่ระยะการคืนกลับ 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบกับลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครม (Cobalt-chrome alloy wires) และลวดโลหะผสมไทเทเนียม-โมลิบดีนัม (Titanium-molybdenum alloy wires) ผลการศึกษาพบว่าลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว จำนวน 17 ยี่ห้อ และลวดโลหะผสมดังกล่าว หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016 x 0.022 นิ้ว² จำนวน 15 ยี่ห้อ มีค่าความแตกต่างของขนาดแรงที่ระยะการคืนกลับ 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร น้อยกว่า 100 กรัม ในขณะที่ลวดบางยี่ห้อ มีค่าความแตกต่างของขนาดแรงดังกล่าวสูงใกล้เคียงกับลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครม และลวดโลหะผสมไทเทเนียม-โมลิบดีนัม ซึ่งจัดว่าไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด

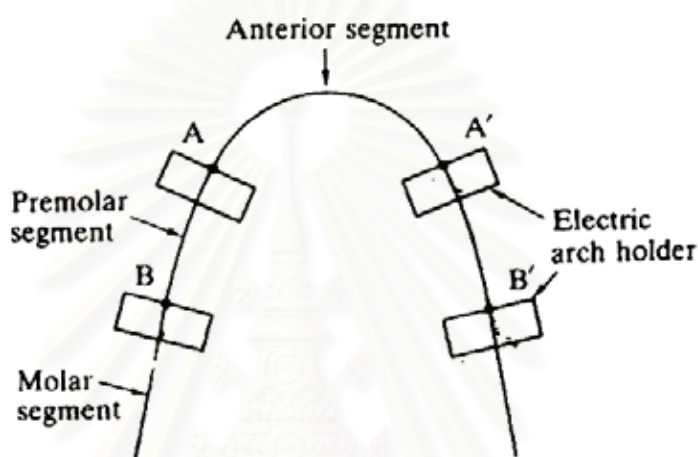
การให้ความร้อนกับลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม

จากความรู้ทางโลหวิทยาที่ว่าลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม สามารถถูกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงมีหลายการศึกษาที่ทำการทดลองโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันในหลากหลายรูปแบบ แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

Miura และคณะ⁽²⁾ ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เจแปนีสไนไท หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ภายหลังจากได้รับความร้อนจากการแช่ในอ่างบรรจุเกลือไนเตรทที่อุณหภูมิ 200, 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10, 60 และ 120 นาทีตามลำดับ โดยทำการทดสอบความงอสามจุดที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ขนาดแรงคืนกลับของลวดขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่ได้รับความร้อนนานขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ลวดจะสูญเสียคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดอย่างสิ้นเชิงแม้จะได้รับความร้อนเพียง 5 นาที

Miura, Mogi และ Ohura⁽⁶⁾ ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เจแปนีสไนไท ภายหลังจากได้รับความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ในลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในปริมาณ 3.5 แอมแปร์ โดยจับคีมที่จุด A กับ A' เป็นเวลา 45 นาที และที่จุด B กับ B' เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งทำให้ลวดส่วนที่อยู่ระหว่างจุด A กับ A' ได้รับกระแสไฟฟ้าเป็นเวลารวมทั้งสิ้น 60 นาที จากนั้นทำการทดสอบความงอสามจุดที่อุณหภูมิห้อง ของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันหน้า (Anterior segment) คือ ระหว่างจุด A กับ A' ลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันกรามน้อย (Premolar segment) คือ ระหว่างจุด A กับ B และจุด A' กับ B' และลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันกราม (Molar

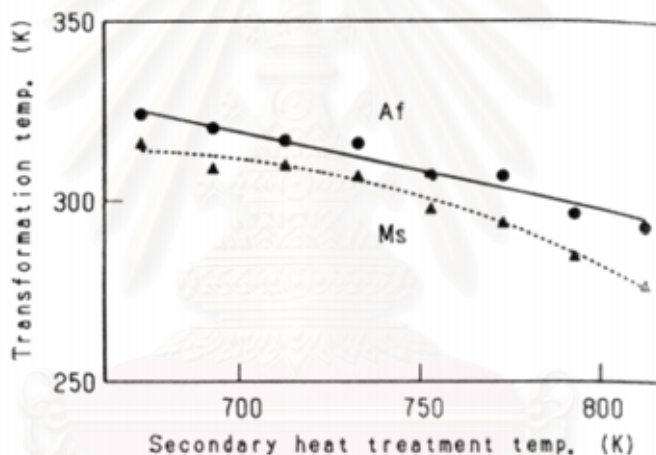
segment) ซึ่งเป็นลวดส่วนท้ายที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า โดยกำหนดให้ระยะทางไกลสุดที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนมิติไปจากรูปร่างเดิมเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่าขนาดแรงคืนกลับขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด ของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นหน้า ลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นกรามน้อย และลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นกราม มีค่าเท่ากับ 80, 180 และ 280 กรัม ตามลำดับ กล่าวคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 14 แสดงตำแหน่งที่จับคีมบนลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณ 3.5 แอมแปร์ ที่จุด A กับ A' เป็นเวลา 45 นาที และที่จุด B กับ B' เป็นเวลา 15 นาที

Khier, Bantley และ Fournelle⁽¹⁸⁾ ทำการทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ ในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ความยาว 6 เซนติเมตร ทั้งชนิดที่มีและไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จำนวนชนิดละ 3 ยี่ห้อ ภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และ 2 ชั่วโมง พบว่าลวดโลหะผสมชนิดที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดทั้ง 3 ยี่ห้อ ภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ความงอขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดน้อยมาก แต่ที่เวลา 2 ชั่วโมง ค่าโมเมนต์ความงอดังกล่าวจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในทั้งสองช่วงเวลา ลวดโลหะผสมจะสูญเสียคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดอย่างสิ้นเชิง และพบการเปลี่ยนรูปร่างถาวรที่ค่ามุมประมาณ 20-35 องศา แต่ลวดโลหะผสมชนิดที่ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด จะได้รับผลจากการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลน้อยมาก ในทั้งสองระดับอุณหภูมิและทั้งสองช่วงเวลา

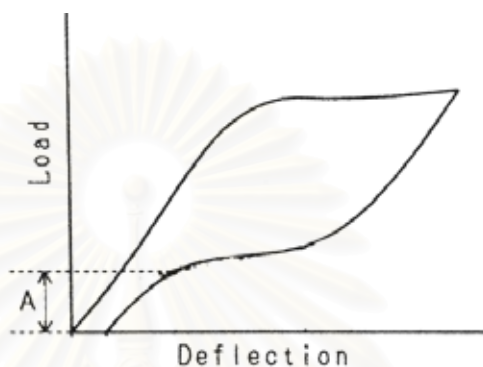
Yoneyama และคณะ⁽³⁴⁾ ทำการศึกษาช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค ในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ของบริษัท Furukawa Electric จำกัด หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร ความยาว 50 มิลลิเมตร โดยทดลองให้ความร้อนจากการแช่ในอ่างบรรจุเกลือไนเตรทจำนวน 2 ครั้ง ครั้งแรกลวดจะถูกใส่ในท่อโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 713 เคลวิน (440 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ลวดถูกขึ้นรูปได้ง่าย แล้วให้ความร้อนอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิ 673 ถึง 813 เคลวิน (400 ถึง 540 องศาเซลเซียส) โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 20 เคลวิน เป็นเวลาครั้งละ 30 นาที การให้ความร้อนครั้งที่สองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถตัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างลวดได้ จากนั้นปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคที่จุด Af และ Ms (รูปที่ 5) จะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในครั้งที่สองเพิ่มขึ้น อย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 15



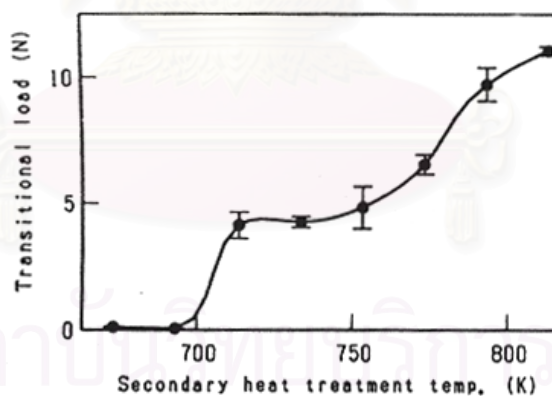
รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค (Transformation temperature) ที่จุด Af และ Ms กับค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนครั้งที่สอง หน่วยเป็นเคลวิน

นอกจากนี้ Yoneyama และคณะ⁽³⁴⁾ ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมดังกล่าวข้างต้น จากการทดสอบความอมงสามจุด ที่ระยะไกลสุดของการเปลี่ยนมิติในแนวตั้ง 1.5 มิลลิเมตร โดยกระทำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส คุณสมบัติเชิงกลที่ศึกษา คือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดหรือเรียกว่า ทรานซิชันนอล โหลด (transitional load) ซึ่งพิจารณาจากระยะในแนวตั้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกับ

ระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม ที่ระยะการเปลี่ยนมิติในแนวตั้งมากที่สุด เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 16 และเมื่อเปรียบเทียบค่าทรานซิชันนอล โหลด กับค่า อุณหภูมิในการให้ความร้อนครั้งที่สอง ในช่วง 733 ถึง 813 เคลวิน (460 ถึง 540 องศาเซลเซียส) ผลการศึกษาพบว่าทรานซิชันนอล โหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 16 แสดงการหาขนาดแรงคืนกลับของลวดขณะสวดคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด หรือ ทรานซิชันนอล โหลด จากระยะในแนวตั้ง (A) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรง (Load) กับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือมิติไปจากเดิม (Deflection)



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานซิชันนอล โหลด กับค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนครั้งที่สอง ในช่วง 733 ถึง 813 เคลวิน (460 ถึง 540 องศาเซลเซียส)

วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

การให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เป็นวิธีที่ทำให้เกิดความร้อนโดยอาศัยคุณสมบัติความต้านทานกระแสไฟฟ้าของโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของเส้นลวด โดยเมื่อพิจารณาตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy)⁽³⁵⁾ ที่ว่า พลังงานไม่มีการสูญหายหรือถูกทำลาย แต่สามารถถูกเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งได้ การให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการวิจัยนี้ จึงเป็นการเปลี่ยนรูปแบบจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนซึ่งหมายถึงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเส้นลวด โดยกำหนดให้การสูญเสียพลังงานในรูปแบบอื่น เช่น การแผ่รังสีความร้อน มีค่าเท่ากับศูนย์ และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} \Rightarrow \text{พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเส้นลวด} + \text{การแผ่รังสีความร้อน.....(1)}$$

พลังงานไฟฟ้า

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = Pt \text{.....(2)}$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

t คือ เวลา (วินาที)

$$\text{จาก } P = I^2R$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = I^2Rt \text{.....(3)}$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

$$\text{จาก } R = \rho L/A$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = I^2t * \rho * L/A \text{.....(4)}$$

เมื่อ ρ คือ ค่ารีซิสติวิตี (Resistivity) (โอห์ม-เมตร)

L คือ ความยาวเส้นลวด (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

พลังงานความร้อน

$$\text{พลังงานความร้อน} = m \cdot c \cdot (T - T_r) \dots \dots \dots (5)$$

เมื่อ m คือ มวล (กิโลกรัม)

c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

(จูล / กิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

T คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น (องศาเซลเซียส)

T_r คือ อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)

แทนค่าสมการที่ 4 และ 5 ในสมการที่ 1 ได้ดังนี้

$$I^2 \cdot t \cdot \rho \cdot L / A = m \cdot c \cdot (T - T_r) \dots \dots \dots (6)$$

$$T = T_r + I^2 \cdot t \cdot \rho \cdot L / (A \cdot m \cdot c) \dots \dots \dots (7)$$

จากสมการ $D = m / V$ แทนค่า m ลงในสมการที่ 7 ได้ดังนี้

$$T = T_r + I^2 \cdot t \cdot \rho \cdot L / (A \cdot D \cdot V \cdot c) \dots \dots \dots (8)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น

(กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร)

m คือ มวล (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

จากสมการ $V = A \cdot L$ แทนค่า V ลงในสมการที่ 8 ได้ดังนี้

$$T = T_r + I^2 \cdot t \cdot \rho \cdot L / (A^2 \cdot D \cdot c) \dots \dots \dots (9)$$

$$T = T_r + K I^2 \cdot t \dots \dots \dots (10)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่

$$= \rho \cdot L / (A^2 \cdot D \cdot c) \dots \dots \dots (11)$$

จากสมการที่ 11 แทนค่า ρ , D และ c จากค่าเฉลี่ยอันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด⁽³⁶⁾ ดังนี้

$$\rho = 1.00 \times 10^{-6} \text{ อนุกรม-เมตร}$$

$$A = (4 \times 10^{-4})(5.5 \times 10^{-4}) \text{ ตารางเมตร}$$

$$(0.016 \times 0.022 \text{ ตารางนิ้ว})$$

$$\begin{aligned}
 D &= 6450 \text{ กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร} \\
 c &= 836.8 \text{ จูล / กิโลกรัม-องศาเซลเซียส} \\
 \text{ทำให้ได้ค่า } K &= 1.85 \times 10^{-13}
 \end{aligned}$$

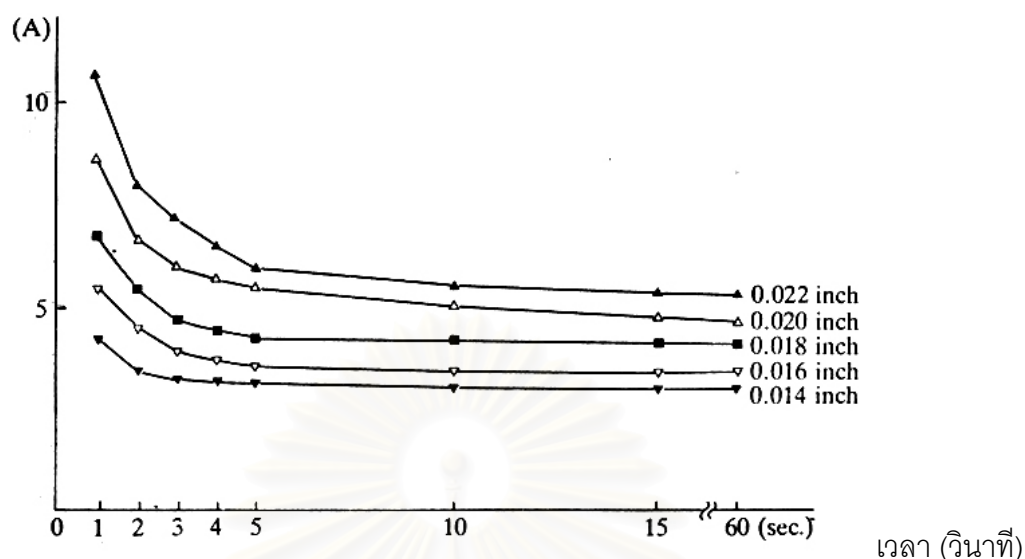
แทนค่า K ลงในสมการที่ 10 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเส้นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม สำหรับเป็นแนวทางในคำนวณค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T &= Tr + K I^2 t \\
 &= Tr + (1.85 \times 10^{-13}) I^2 t \dots \dots \dots (12)
 \end{aligned}$$

สำหรับการใช้งานทางทันตกรรมจัดฟัน วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ถูกคิดค้นขึ้นจากปัญหาที่ว่า การให้ความร้อนแก่ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมโดยวิธีแช่ในเตาอบหรือในอ่างบรรจุเกลือไนเตรท จะต้องใส่ลวดทั้งเส้นที่ต้องการให้ความร้อน ไม่สามารถเจาะจงเฉพาะตำแหน่งได้ และเตาอบหรืออ่างบรรจุเกลือไนเตรทดังกล่าวมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ต้องใช้เวลานานในการให้ความร้อนแก่เส้นลวด จึงไม่สะดวกสำหรับการใช้งานในทางคลินิก วิธีการให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงจึงถูกพัฒนาขึ้นในปี 1986⁽⁸⁾ ด้วยข้อได้เปรียบคือสามารถใช้คีมที่มีสายต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ในการจับเส้นลวดเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการให้กระแสไฟฟ้าได้⁽⁸⁾ อุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาและใช้เวลาไม่นานในการให้ความร้อนแก่เส้นลวด

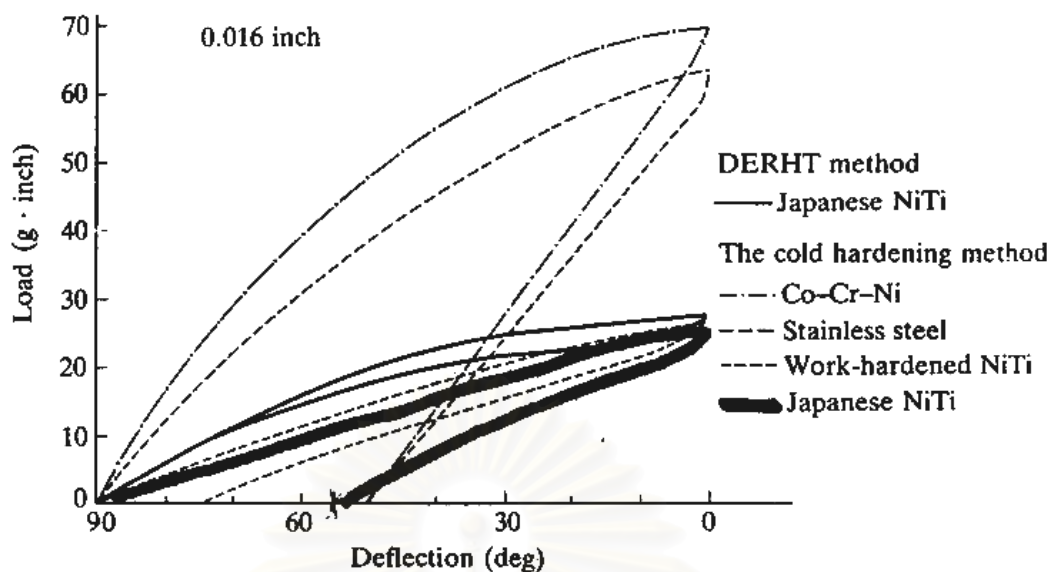
Miura, Mogi และ Ohura⁽⁸⁾ ทำการศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเจแปนีสไนไทด์เส้นตรง หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.014, 0.016, 0.018, 0.020 และ 0.022 นิ้ว โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้คีม 2 อัน ที่มีสายต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า จับเส้นลวดโดยให้ระยะห่างระหว่างคีมเท่ากับ 6 เซนติเมตร พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างระดับกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นมุมฉาก กล่าวคือ ถ้าระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดมีค่ามาก ระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ก็มีปริมาณน้อย แต่ถ้าให้กระแสไฟฟ้าในระยะเวลาที่สั้น ระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากขึ้น ดังตัวอย่างการศึกษาในลวดเจแปนีสไนไทด์ หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ถ้าให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 1 วินาที ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นมุมฉากจะเท่ากับ 5.5 แอมแปร์ แต่ถ้าให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 5 วินาที ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมดังกล่าวจะเท่ากับ 3.5 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 18

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)



รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับกระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) กับระยะเวลาที่เหมาะสม (แกนนอน) สำหรับการตัดลวดเจแปนีสไนไทเป็นมุ่มจาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสดตรง

Miura, Mogi และ Ohura⁽⁸⁾ ได้ทำการทดสอบลวดเจแปนีสไนไท หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ที่ถูกตัดเป็นมุ่มจากโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสดตรง เมื่อใช้คีม 2 อันที่มีสายต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า จับเส้นลวดโดยให้ระยะห่างระหว่างคีมเท่ากับ 6 เซนติเมตร จากการทดสอบความงอแบบแคนดิลีเวอร์พบว่าลวดโลหะผสมดังกล่าวสามารถคืนกลับเป็นมุ่ม 90 องศาได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร และยังคงคุณสมบัติการคืนกลับและคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดไว้ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับลวดชนิดอื่น เช่น ลวดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิกเกิล (Co-Cr-Ni alloy wire) ที่สามารถคืนกลับได้เพียง 50 องศา และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร 40 องศา ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดเวิร์ก ฮาร์ดเดน สามารถคืนกลับได้ 75 องศาและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร 15 องศา หรือลวดเจแปนีสไนไท ที่ถูกตัดเป็นมุ่มจากด้วยคีมสามขา (triple beak pliers) สามารถคืนกลับได้ 55 องศาและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร 35 องศา ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงผลการทดสอบความงอแบบแคนติลิวเวอร์ของลวดต่างชนิด ที่มีหน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีการให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงแก่ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม จะมีข้อดีหลายประการดังกล่าวแล้วข้างต้น แต่มีข้อพึงระวังในการใช้งาน คือ ขณะให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวด จะต้องไม่ทำให้เส้นลวดได้รับความร้อนมากเกินไปสำหรับการใช้งานทางคลินิก ซึ่งถูกกล่าวอ้างโดย Andreasen ในปี 1978⁽⁵⁾ ว่าการให้ความร้อนดังกล่าวจะต้องไม่ทำให้เกิดลักษณะร้อนแดงของเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ประชากร

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ของบริษัทโทมี และ ยี่ห้อไนโท ของบริษัทออมโก

กลุ่มตัวอย่าง

ส่วนปลายของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ประเภทลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² สำหรับซากกรไกรล่าง ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี รูปร่างแอกคิว (Accu form) ของบริษัทโทมี และยี่ห้อไนโท รูปร่างยูโร (Euro form) ของบริษัทออมโก

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นจะต้องทราบระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเพื่อสามารถคงรูปร่างใหม่ได้อย่างถาวร ในลวดโลหะผสมที่เลือกมาศึกษาจำนวน 2 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนโท วิธีดำเนินการวิจัยจึงถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ส่วนปลายของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ประเภทลวดโค้ง ขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² สำหรับซากกรรไกรล่าง ความยาว 25 มิลลิเมตร ของยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท จำนวนยี่ห้อละ 90 เส้น
2. เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ (Veneer caliper) ซึ่งอ่านค่าได้ที่ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร
3. เครื่องวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือแอมมิเตอร์ ของบริษัท Daiichi รุ่น DM209 ที่แสดงความละเอียด 0.01 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 20

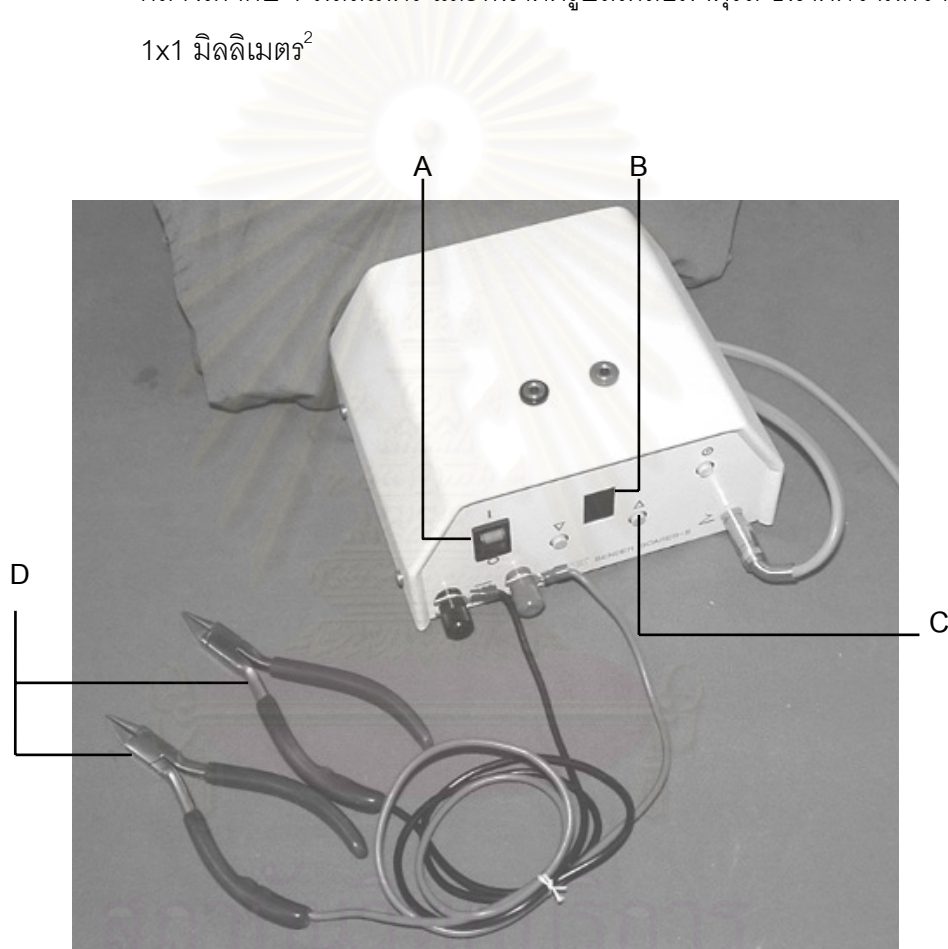


รูปที่ 20 แสดงเครื่องวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือแอมมิเตอร์ ของบริษัท Daiichi รุ่น DM209 ที่แสดงความละเอียด 0.01 แอมแปร์

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ โซเรอร์-ทู ของบริษัทโทมี ดังแสดงในรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วย
 - 4.1 ตัวเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า
 - 4.1.1 ปุ่มควบคุมการเปิด-ปิด (A)
 - 4.1.2 หน้าจอแสดงระดับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 (B)
 - 4.1.3 ปุ่มควบคุมและปรับระดับกระแสไฟฟ้า (C)

4.2 คีมปากนก (bird beak pliers) 2 อัน (D)

สำหรับจับลวด เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดบริเวณที่ต้องการได้ครบวงจร ปลายด้ามของคีมทั้งสองอันจะมีสายไฟสีดำและสีแดงสำหรับต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าบริเวณข้อต่อสีดำและสีแดงเช่นกัน คีมแต่ละอันจะประกอบด้วยส่วนปลายคีมสองข้าง ซึ่งมีหน้าตัดรูปวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดความกว้างเท่ากับ 1×1 มิลลิเมตร²

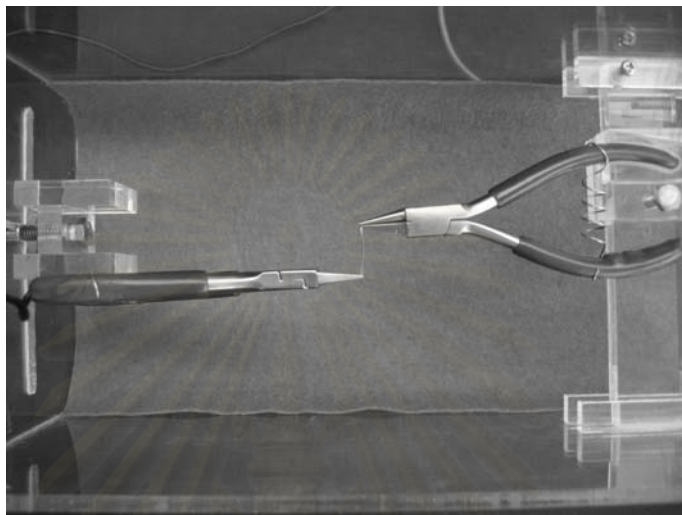


รูปที่ 21 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ โซเรอร์-ทู ของบริษัทโทมิ ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

- A คือ ปุ่มควบคุมการเปิด-ปิด
- B คือ หน้าจอแสดงระดับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9
- C คือ ปุ่มควบคุมและปรับระดับกระแสไฟฟ้า
- D คือ คีมปากนก

5. เครื่องมือช่วยตัดลวดเป็นมุมฉาก ประกอบด้วย

ที่ยึดด้ามคีมปากนกสองอัน ในลักษณะที่ทำให้ลวดสามารถงอเป็นมุม 90 องศาหรือมุมฉากได้ เมื่อยึดลวดเส้นตรงกับคีมปากนกทั้งสองข้าง ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 แสดงเครื่องมือช่วยตัดลวดเป็นมุมฉาก ซึ่งประกอบด้วยที่ยึดด้ามคีมปากนกสองอัน ในลักษณะที่ทำให้ลวดสามารถงอเป็นมุม 90 องศาหรือมุมฉากได้ เมื่อยึดลวดเส้นตรงกับคีมปากนกทั้งสองข้าง

6. เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา ที่สามารถปรับตั้งระยะเวลาทำงานเป็นวินาทีได้ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา ที่สามารถปรับตั้งระยะเวลาทำงานเป็นวินาทีได้ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 วินาที

7. ไม้บรรทัดวัดมุม หรือ ฐเลอร์ โพรแทรกเตอร์ (Ruler protractor) ยี่ห้อ HOL ประเทศ
ไต้หวัน ที่สามารถอ่านค่าได้ที่ความละเอียด 0.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 แสดงไม้บรรทัดวัดมุมหรือ ฐเลอร์ โพรแทรกเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงที่ออกจากเครื่องเบนเดอร์ โซเวอร์-ทู ด้วยแอมมิเตอร์ ในทุกระดับกระแสไฟฟ้าที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องดังกล่าว ตั้งแต่หมายเลข 0 ถึง 9 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีตามกฎอนุรักษ์พลังงาน
2. คำนวณค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด เมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสตรงในระดับที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอ้างอิงต่อไป
3. ศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เพื่อสามารถคงรูปร่างใหม่ได้อย่างถาวรภายหลังการตัด เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขอบด้านประชิดของคีมปากนกสองอัน ที่จับเส้นลวดเท่ากับ 19.5 มิลลิเมตร ดังนี้
 - 3.1 กำหนดจุดบนเส้นลวดที่มีความยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 2 จุด เพื่อเป็นตำแหน่งสำหรับคีมจับ โดยใช้เวอร์เนีย คาลิเปอร์ ในการวัดความยาวลวดเพื่อกำหนดจุด ดังรูป



- จุดที่ 1 ห่างจากปลายลวดด้านซ้ายเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร สำหรับขอบด้านประชิดของคีมปากนกด้านซ้าย
- จุดที่ 2 ห่างจากปลายลวดด้านขวาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับขอบด้านประชิดของคีมปากนกด้านขวา

หมายเหตุ : - ความยาวลวด 25 มิลลิเมตรจากส่วนปลายของเส้นลวด เป็นความยาวน้อยที่สุดในส่วนที่เป็นเส้นตรงของลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวดทั้ง 2 ยี่ห้อที่ต้องการศึกษา คือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท

- การกำหนดจุดที่ 1 ให้มีระยะห่างจากปลายลวดด้านซ้ายเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อความสะดวกในการวัดมุม

- 3.2 ยึดเส้นลวดที่เตรียมไว้ในข้อ 3.1 กับคีมปากนก 2 อัน ที่ถูกกำหนดตำแหน่งไว้แล้ว จากเครื่องมือช่วยตัดลวดเป็นมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 22

- 3.3 ต่อเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา เข้ากับเครื่องเบนเดอร์ โซเรอร์-ทู โดยปรับตั้งระยะเวลาเป็น 3 วินาที และระดับกระแสไฟฟ้าเป็นหมายเลข 1
- 3.4 กดปุ่มทำงานจากเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา เพื่อให้เครื่องเบนเดอร์ โซเรอร์-ทู ทำงานตามระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ปรับตั้งไว้
- 3.5 สังเกตและบันทึกลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
- 3.6 นำเส้นลวดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าแล้ว มาวัดมุมตามขอบด้านในแล้วบันทึกผล การวัดมุมจะกระทำโดยผู้วิจัยเพียงคนเดียว ที่ได้ผ่านการฝึกฝนจนมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ โดยประเมินจากความแม่นยำ (precision) ในการวัดค่ามุมซ้ำในลวดเส้นเดิมด้วยสถิติสหสัมพันธ์ของ Pearson (Pearson correlation) ได้ค่า r เท่ากับ 0.0998 และสถิติทีแบบจับคู่ (paired-sample T test) ได้ค่าสถิติ ที เท่ากับ 0.066 ดังแสดงในภาคผนวก ก
- 3.7 ทำซ้ำข้อ 3.2 ถึง 3.6 โดยเปลี่ยนลวดเส้นใหม่ทุกครั้งจนครบ 10 เส้น
- 3.8 จากนั้นเปลี่ยนระดับกระแสไฟฟ้า เป็นหมายเลข 2 ถึง 9 ตามลำดับ ทำเช่นนี้จนครบในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท
- 3.9 ทำซ้ำข้อ 3.2 ถึง 3.8 โดยปรับตั้งระยะเวลาให้เป็น 4 และ 5 วินาทีตามลำดับ

ตัวแปรของการวิจัย

- ตัวแปรอิสระ
1. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี เป็นเวลา 3 วินาที
 2. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี เป็นเวลา 4 วินาที
 3. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี เป็นเวลา 5 วินาที
 4. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อไนไท เป็นเวลา 3 วินาที
 5. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อไนไท เป็นเวลา 4 วินาที
 6. ระดับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับลวดยี่ห้อไนไท เป็นเวลา 5 วินาที
- ตัวแปรตาม
1. ขนาดมุม
 2. ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า

การวิเคราะห์ข้อมูล

การพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ได้จากระดับกระแสไฟน้อยที่สุด ที่ทำให้ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวด ภายหลังการตัดเป็นมุมฉากและให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด โดยไม่เกิดลักษณะร้อนแดงของเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก⁽⁵⁾ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์อลลอย ชนิดเฮวี และยี่ห้อไนไท เป็นระยะเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้ระดับกระแสไฟฟ้าในการวิจัยขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

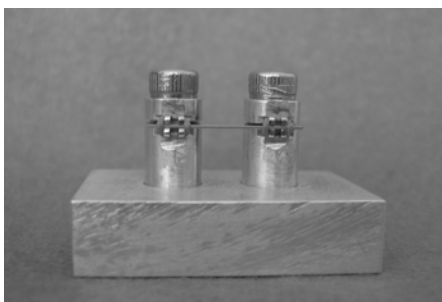


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด

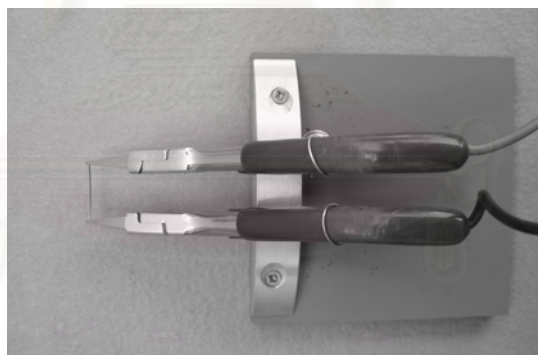
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ส่วนปลายของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ประเภทลวดโค้ง ขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² สำหรับขากรรไกรล่าง ความยาว 21.5 มิลลิเมตร ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท จำนวนยี่ห้อละ 30 เส้น
2. เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ซึ่งอ่านค่าได้ที่ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ โซเธอร์-ทู ของบริษัทโทมี ดังแสดงในรูปที่ 21
4. แบบจำลองโลหะที่ยึดแบรacket 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 25 โดย
 - 4.1 แบรacketที่ใช้เป็นแบรacketโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมแบบทวินส์ (stainless steel twins brackets) สำหรับฟันเขี้ยวและฟันกรามน้อยล่าง ชนิดมาตรฐานเอดจ์ไวส์ (standard edgewise) ของบริษัทอคมโก ซึ่งมีความกว้างระหว่างขอบนอกของแบรacketเท่ากับ 3 มิลลิเมตร
 - 4.2 ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของแบรacketทั้งสองตัว เท่ากับ 14.5 มิลลิเมตร ซึ่งเปรียบเทียบได้กับระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของแบรacketในตำแหน่งฟันเขี้ยวล่างและฟันกรามน้อยล่างซี่ที่สอง ที่ได้จากการคำนวณระยะทางจากจุดกึ่งกลาง ความกว้างของฟันในแนวใกล้กลางและไกลกลางของฟันเขี้ยวล่าง ฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งและซี่ที่สอง จากการศึกษาในเด็กไทยที่มีอายุระหว่าง 13 ถึง 15 ปี โดยความกว้างเฉลี่ยของฟันในแนวใกล้กลาง (mesial) และไกลกลาง (distal) ของฟันเขี้ยวล่าง ฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งและซี่ที่สอง มีค่าเท่ากับ 6.95, 7.34 และ 7.33 มิลลิเมตร ตามลำดับ⁽¹⁰⁾
 - 4.3 แนวกึ่งกลางร่องแบรacket (bracket slot) ทั้ง 2 ตัว ต้องขนานกันทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบ



รูปที่ 25 แสดงแบบจำลองโลหะที่ยึดแบร็กเกตโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมแบบทวินส์ จำนวน 2 ตัว โดยกำหนดให้ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของแบร็กเกตทั้งสองตัว เท่ากับ 14.5 มิลลิเมตร และแนวกึ่งกลางร่องแบร็กเกตทั้งสองตัวมีความขนานกันทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบ

5. ยางวงแหวนสำหรับยึดลวดกับแบร็กเกต (alastic ring) ขนาดความหนา 0.012 นิ้ว ของบริษัทออมโก
6. ฐานโลหะสำหรับยึดคีมปากนก 2 ตัวในแนวระนาบ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขอบด้านประชิดของคีมทั้งสองตัวเท่ากับ 19.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26 แสดงฐานโลหะสำหรับยึดคีมปากนก 2 ตัวในแนวระนาบ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขอบด้านประชิดของคีมทั้งสองตัวเท่ากับ 19.5 มิลลิเมตร

7. เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบจับเวลา ที่สามารถปรับตั้งระยะเวลาทำงานเป็นวินาที ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 23
8. เครื่องลดยด์ยูนิเวอร์แซลทดสอบดึงมาซีน (LLOYD Universal Testing Machine) รุ่น LR 10K ดังแสดงในรูปที่ 27 สำหรับทดสอบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ซึ่งประกอบด้วย
 - 8.1 ฟิกส์เฮด (fixed head)

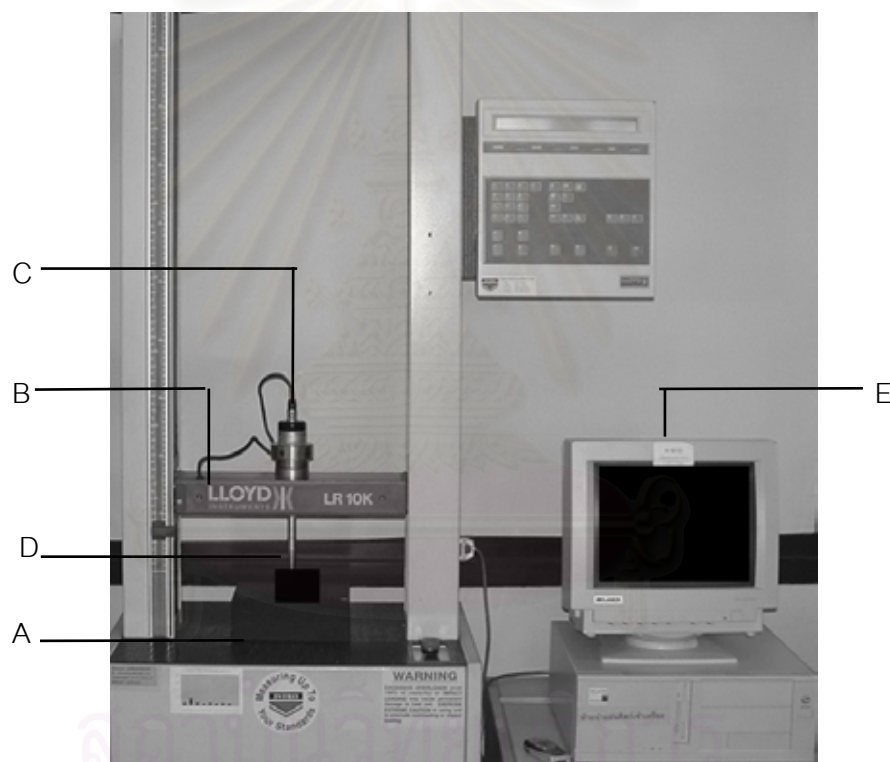
คือ ส่วนที่ยึดแบบจำลองโลหะและลวดที่ต้องการศึกษา โดยจะติดแน่นอยู่กับที่

8.2 ครอบสเอด (cross head)

คือ ส่วนที่ถ่ายทอดแรงกระทำสู่ลวดที่ต้องการศึกษา สามารถเคลื่อนขึ้นลงได้ในทิศทางตั้งฉากกับแนวระนาบ

8.3 ตุ่มน้ำหนัก (load cell) ขนาด 100 นิวตัน

8.4 หัวกดลวดสำหรับต่อเข้ากับครอบสเอด หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 2.5×3 มิลลิเมตร² ซึ่งเทียบได้กับขนาดความกว้างของแบร็กเกตพินกรามน้อยล่าง 1 ซึ่งสำหรับการทดสอบความมอดจูด ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 27 แสดงเครื่องลloydยูนิเวอร์แซลเทสติงมาชีน รุ่น LR 10K ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

A คือ ฟิกส์เฮด

B คือ ครอบสเอด

C คือ ตุ่มน้ำหนัก ขนาด 100 นิวตัน

D คือ หัวกดลวดสำหรับต่อเข้ากับครอบสเอด หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 2.5×3 มิลลิเมตร²

E คือ คอมพิวเตอร์แสดงผลการทดสอบของเครื่องลloydยูนิเวอร์แซลเทสติงมาชีน

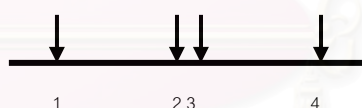


รูปที่ 28 แสดงหัวกัดลวดสำหรับต่อเข้ากับครอสเฮด ของเครื่องลอบด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงมาซีน (A) มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 2.5×3 มิลลิเมตร² ซึ่งเทียบได้กับขนาดความกว้างของแบร็กเกตฟันกรามน้อยล่าง 1 ซี่ (B)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ใช้คีมปากนกที่ผูกยึดกับฐานโลหะ จับเส้นลวดที่บริเวณปลายสุดทั้งสองข้าง โดยให้ส่วนปลายคีมด้านที่มีรูปร่างหน้าตัดเหมือนกันหันไปด้านเดียวกัน
2. ปรับตั้งระดับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ โซเรอร์-ทู ตามผลการศึกษาที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 เมื่อปรับตั้งระยะเวลาเป็น 3 วินาที แล้วกดปุ่มทำงาน เพื่อให้ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าตามต้องการ จากนั้นทำซ้ำโดยเปลี่ยนลวดเส้นใหม่ทุกครั้ง จนครบ 10 เส้น
3. เก็บลวดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าแล้วในที่แห้ง เพื่อเตรียมสำหรับการทดสอบความงอสามจุดต่อไป
4. ทำซ้ำในข้อ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนลวดเส้นใหม่ทุกครั้ง เมื่อปรับตั้งระยะเวลาเป็น 4 และ 5 วินาที จนครบในลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ลอลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท
5. กำหนดจุดบนเส้นลวดที่ต้องการศึกษาขนาดแรงคืนกลับ ได้แก่ ลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ลวดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ของลวดโลหะผสมทั้งสองยี่ห้อ เพื่อทำการทดสอบความงอสามจุด โดยใช้เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ในการวัดความยาวลวดเพื่อกำหนดจุด ดังรูป



จุดที่ 1 และ 4 สำหรับแทนจุดกึ่งกลางของแบร็กเกตด้านซ้ายและขวา ให้ห่างจากปลายลวดด้านซ้ายและขวาเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร

จุดที่ 2 และ 3 สำหรับแทนแนวขอบของหัวกดลวดด้านซ้ายและขวา ให้ห่างจากปลายลวดด้านซ้ายและขวา เท่ากับ 9.25 มิลลิเมตร

6. ศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวด โดย
 - 6.1 นำเส้นลวดที่ถูกกำหนดจุดแล้วจากข้อที่ 5 วางในร่องแบร็กเกตทั้งสองตัว ที่ถูกยึดบนแบบจำลองโลหะ โดยให้จุดที่ 1 และ 4 ตรงกับจุดกึ่งกลางของแบร็กเกตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ

- 6.2 ยึดลวดกับแบร็กเกตด้วยยางวงแหวนรัดฟัน ซึ่งกระทำโดยผู้วิจัยเพียงคนเดียว ที่ได้ฝึกฝนการควบคุมขนาดแรงที่ใช้สำหรับใส่ยางวงแหวนดังกล่าว ให้มีขนาดใกล้เคียงกันทุกครั้ง ภายใต้การดูแลของทันตแพทย์จัดฟันที่มีประสบการณ์กว่า 20 ปี
- 6.3 จัดวางและยึดแบบจำลองโลหะกับฟิกส์เฮด โดยกำหนดให้ระดับของแนวเส้นลวดบริเวณที่ต้องการศึกษาขนานกับแนวระนาบ (horizontal plane)
- 6.4 ยึดตุ่มน้ำหนักขนาด 100 นิวตัน และหัวกดลวด หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 2.5×3 มิลลิเมตร² ติดกับครอสเฮด
- 6.5 ปรับหัวกดลวดให้ด้านที่มีความกว้าง 3 มิลลิเมตร ซึ่งเทียบได้กับขนาดความกว้างของแบร็กเกตฟันกรามน้อยล่าง 1 ซี่ ทำหน้าที่กดลวดให้เปลี่ยนมิติไปจากเดิมในแนวตั้ง
- 6.6 จัดวางให้แนวขอบของหัวกดลวดด้านซ้ายและขวา ตรงกับจุดที่ 2 และ 3 บนเส้นลวด ตามลำดับ
- 6.7 กำหนดให้ครอสเฮดเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที⁽³⁰⁾ ในทิศทางลงและขึ้น เพื่อให้ลวดเปลี่ยนมิติไปจากเดิมและคืนกลับสู่รูปร่างเดิมในแนวตั้ง ที่ระยะไกลสุด 2 มิลลิเมตร⁽³⁰⁾
- 6.8 ผลการทดลองจะปรากฏในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรง มีหน่วยเป็นนิวตัน กับระยะทางที่ลวดถูกทำให้เปลี่ยนมิติในแนวตั้ง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยเลือกบันทึกผลเฉพาะขนาดแรงที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรเท่านั้น
- 6.9 นำลวดที่ผ่านการทดสอบขนาดแรงคืนกลับแล้ว ออกจากร่องแบร็กเกตทั้งสองข้าง จากนั้นใส่ลวดเส้นใหม่ที่ต้องการทดสอบ กระทำเช่นเดียวกับข้อ 6.1 ถึง 6.8 โดยยางวงแหวนสำหรับยึดลวดกับแบร็กเกต จะถูกเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งที่ทำการทดสอบลวดแต่ละเส้นจนครบ

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. หาค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ในแต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร
2. ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และลวดดังกล่าว ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที, 4 วินาที และ 5 วินาที ในแต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (Oneway ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในกรณีที่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ จากสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว จะต้องทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) โดยต้องทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยสถิติ Levene ก่อน เพื่อเลือกวิธีทดสอบทางสถิติในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนี้
 ถ้าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าเท่ากัน จะเลือกใช้สถิติ Bonferroni
 ถ้าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน จะเลือกใช้สถิติ Tamhane
3. หาค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ในแต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร
4. ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและลวดดังกล่าวที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที, 4 วินาที และ 5

วินาที ในแต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในกรณีที่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ จะต้องทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยต้องทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนกลุ่มด้วยสถิติ Levene ก่อน เพื่อเลือกวิธีทดสอบทางสถิติในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนี้

ถ้าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าเท่ากัน จะเลือกใช้สถิติ Bonferroni

ถ้าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน จะเลือกใช้สถิติ Tamhane



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผลการวิจัย

ผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1

ผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เบนเดอร์ ไฮเรอร์-ทู ของบริษัทโทมี ที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงดังกล่าวจะมีค่าคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ เปรียบเทียบกับระดับกระแสไฟฟ้าที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องเบนเดอร์ ไฮเรอร์-ทู

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง ที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ (แอมแปร์)
1	2.59
2	3.89
3	5.25
4	6.57
5	7.90
6	9.36
7	10.65
8	11.90
9	13.15

จากตารางที่ 1 ทำให้ทราบปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณค่าอุณหภูมิตามทฤษฎีตามกฎอนุรักษพลังงาน ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad T = Tr + (1.85 \times 10^{-13}) I^2 t$$

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้อุณหภูมิห้อง หรือ Tr เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

$$\text{โดย} \quad I = \text{กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)}$$

Tr = อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)

t = เวลา (วินาที)

จากสมการข้างต้น เมื่อแทนค่ากระแสไฟฟ้าแท้จริงจากตารางที่ 1 โดยกำหนดให้เวลา (t) เท่ากับ 3, 4 และ 5 วินาที จะได้ค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ปริมาณกระแสไฟฟ้า แท้จริง (แอมแปร์)	ค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี ที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน (องศาเซลเซียส)		
		3 วินาที	4 วินาที	5 วินาที
1	2.59	97.4	121.5	145.6
2	3.89	188.2	242.6	297.0
3	5.25	322.3	421.4	520.5
4	6.57	490.6	645.8	801.0
5	7.90	698.2	922.6	1,147.0
6	9.36	970.0	1,285.0	1,600.0
7	10.65	1,248.5	1,656.3	2,064.1
8	11.90	1,552.5	2,061.7	2,570.8
9	13.15	1,890.3	2,512.0	3,133.8

การศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 ถึง 5 ส่วนยี่ห้อไนไท ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 ถึง 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 3 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	146.00	0.624	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	132.00	0.577	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	126.50	0.471	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	122.15	0.851	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
5	102.30	0.632	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
6 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 3 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 5 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 102.30 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 122.15 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 32.15 องศา (ร้อยละ 35.72) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเท่ากับ 57.85 องศา (ร้อยละ 64.28) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 3 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	145.50	0.624	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	131.90	0.658	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	124.00	0.817	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	102.00	0.624	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
5 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 4 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 102.00 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 124.00 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 34.00 องศา (ร้อยละ 37.78) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเท่ากับ 56.00 องศา (ร้อยละ 62.22) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	145.00	0.882	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	126.85	0.709	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	120.20	0.715	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	94.35	0.747	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
5 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 5 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 94.35 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 120.20 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 30.20 องศา (ร้อยละ 33.56) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเท่ากับ 59.80 องศา (ร้อยละ 66.44) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมจาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบน เส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 3 วินาที ของลวด โลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท

ระดับ กระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวด ขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	145.50	0.577	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	131.50	0.782	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	126.00	0.913	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	121.00	0.577	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
5	103.50	0.850	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
6 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 6 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 5 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมจาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 103.50 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะ ร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานใน ทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 121.00 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 31.00 องศา (ร้อยละ 34.44) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง ถาวรเท่ากับ 59.00 องศา (ร้อยละ 65.56) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 3 วินาที ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	145.00	0.667	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	129.00	0.913	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	123.50	0.624	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	101.35	0.747	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
5 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 7 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 101.35 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 123.50 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 33.50 องศา (ร้อยละ 37.22) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเท่ากับ 56.50 องศา (ร้อยละ 62.78) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 4 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยของมุม ที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า หมายเลข 1 ถึง 9 เป็นเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท

ระดับกระแสไฟฟ้า (หมายเลข)	ค่าเฉลี่ยของมุม (องศา)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ลักษณะที่ปรากฏบนเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า
1	145.05	0.599	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
2	127.35	0.530	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
3	119.50	0.624	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
4	95.10	0.459	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น
5 ถึง 9	-	-	เกิดลักษณะร้อนแดงของลวดตลอดทั้งเส้น และลวดขาดบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 8 พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังการตัดเป็นมุมฉาก ใกล้เคียงกับ 90 องศามากที่สุด คือเท่ากับ 95.10 องศา แต่ไม่จัดว่าเป็นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากลวดมีลักษณะร้อนแดงขณะได้รับกระแสไฟฟ้า อันแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก จึงพิจารณาเลือกระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 ที่ให้ค่าเฉลี่ยของมุมเท่ากับ 119.50 องศา ซึ่งแสดงว่ามีการคืนกลับของลวด 29.50 องศา (ร้อยละ 32.78) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเท่ากับ 60.50 องศา (ร้อยละ 67.22) เป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะเวลา 5 วินาที ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ถึง 8 ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวด และค่ามุมที่ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรภายหลังจากการตัดเป็นมุมฉาก สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดและค่ามุมที่ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรภายหลังจากการตัดเป็นมุมฉาก เมื่อระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3, 4 และ 5 วินาที ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี (S) และยี่ห้อไนไท (N)

ยี่ห้อ	ระยะเวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้าเป็นวินาที	หมายเลขของระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม (กระแสไฟฟ้าแท้จริง)	ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดเป็นองศา	ค่ามุมที่ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเป็นองศา (ร้อยละ)
S	3	4 (6.57 แอมแปร์)	122.15	57.85 (ร้อยละ 64.28)
	4	3 (5.25 แอมแปร์)	124.00	56.00 (ร้อยละ 62.22)
	5	3 (5.25 แอมแปร์)	120.20	59.80 (ร้อยละ 66.44)
N	3	4 (6.57 แอมแปร์)	121.00	59.00 (ร้อยละ 65.56)
	4	3 (5.25 แอมแปร์)	123.50	56.50 (ร้อยละ 62.78)
	5	3 (5.25 แอมแปร์)	119.50	60.50 (ร้อยละ 67.22)

ขั้นตอนที่ 2

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และ ยี่ห้อไนโท ที่นำมาศึกษาค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ แบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 10

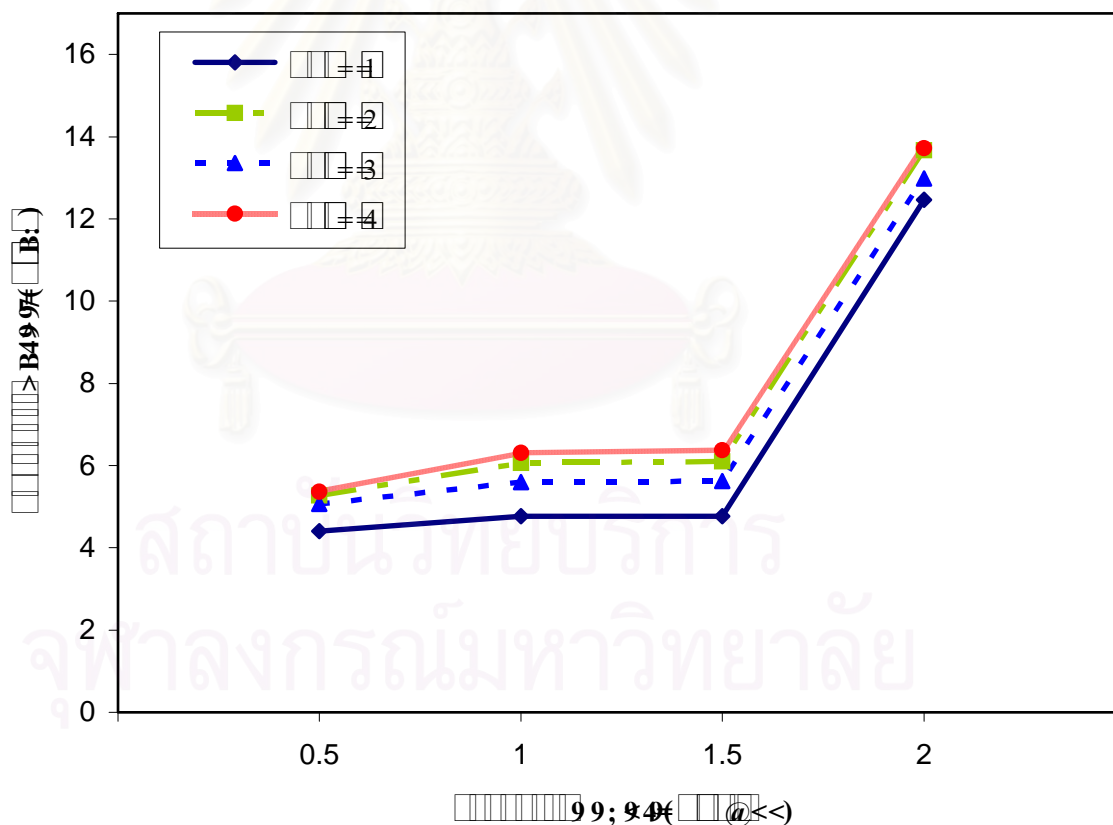
ตารางที่ 10 แสดงการแบ่งกลุ่มตัวอย่างของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ตามระยะเวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้า ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง และค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน

กลุ่มที่	ระยะเวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้า (วินาที)	ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม (หมายเลข)	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง (แอมแปร์)	ค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (องศาเซลเซียส)
1	0	0	-	-
2	3	4	6.57	490.6
3	4	3	5.25	421.4
4	5	3	5.25	520.5

การศึกษาค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และรูปที่

ตารางที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ (M) หน่วยเป็นนิวตัน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อ เซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร

กลุ่มที่	ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ (M) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ							
	2.0 มม.		1.5 มม.		1.0 มม.		0.5 มม.	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
1	12.467	0.344	4.765	0.170	4.764	0.156	4.407	0.204
2	13.666	0.370	6.102	0.426	6.062	0.360	5.278	0.216
3	12.977	0.591	5.628	0.482	5.595	0.447	5.065	0.424
4	13.726	0.475	6.374	0.179	6.312	0.194	5.366	0.376



รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม กับระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ภายใต้ข้อกำหนดที่ว่าค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมทั้ง 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ จากผลการทดสอบด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov ($p > 0.05$) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมทั้ง 4 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ทุกระยะการคืนกลับทั้ง 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ($p = 0.000$) ในทุกระยะการคืนกลับ ดังแสดงในภาคผนวก ข

เมื่อทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Levene พบว่าที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าเท่ากัน ($p > 0.05$) แต่ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน ($p = 0.029$) ดังนั้นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร จะเลือกใช้สถิติ Bonferroni แต่ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร จะเลือกใช้สถิติ Tamhane ดังแสดงผลในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม หรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.5 และ 0.5 มิลลิเมตร และสถิติ Tamhane ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม		ค่าสถิติ พี ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ			
		2.0 มม.	1.5 มม.	1.0 มม.	0.5 มม.
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 3	0.102	0.000*	0.001*	0.000*
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 4	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	0.010*	0.024*	0.112	0.872
กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 4	1.000	0.515	0.369	1.000
กลุ่มที่ 3	กลุ่มที่ 4	0.005*	0.000*	0.003*	0.255

* มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

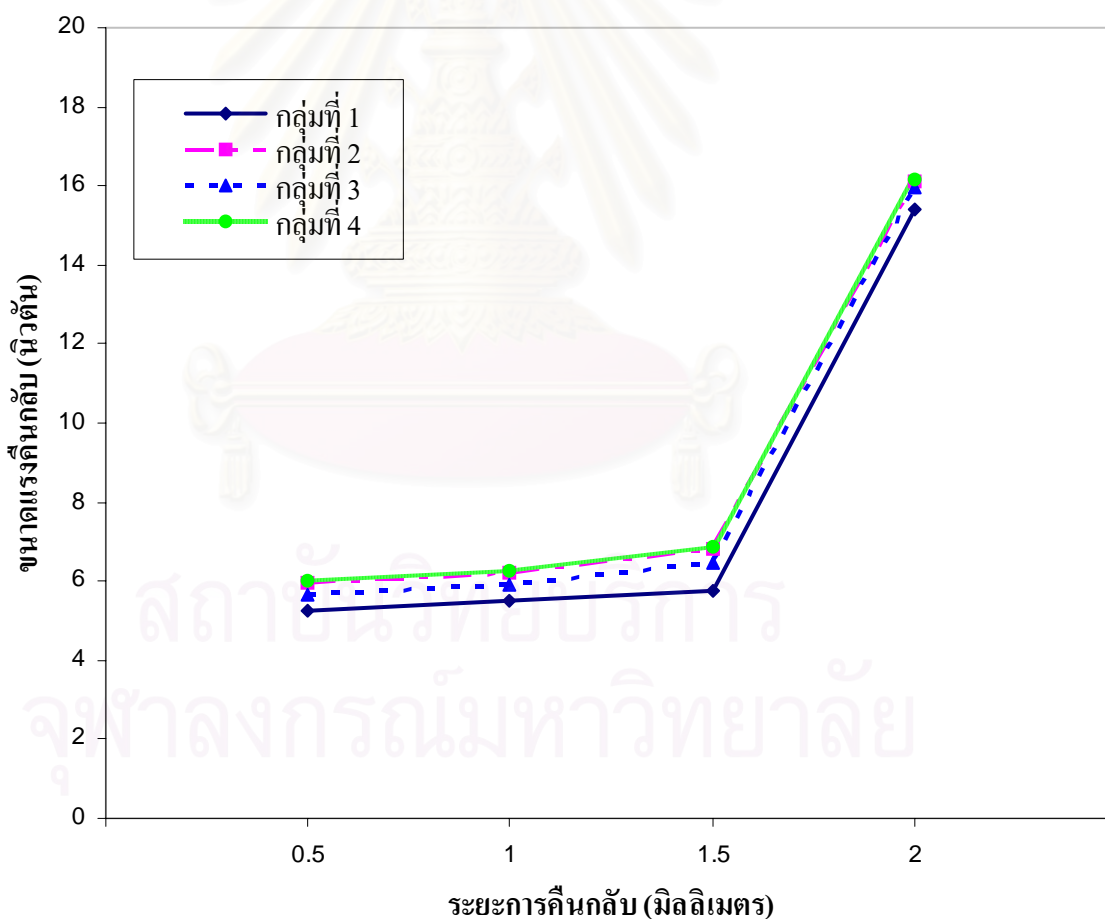
จากตารางที่ 12 สรุปได้ดังนี้

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า กับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด มีค่าแตกต่างกันในทุกระยะการคืนกลับ ยกเว้นกลุ่มที่ 1 ซึ่งไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า กับกลุ่มที่ 3 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 4 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด โลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลาแตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันในทุกระยะการคืนกลับ ยกเว้น
 - กลุ่มที่ 2 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 3 วินาที กับกลุ่มที่ 3 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 4 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร
 - กลุ่มที่ 3 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 4 วินาที กับกลุ่มที่ 4 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 5 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร
 - ส่วนกลุ่มที่ 2 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 3 วินาที กับกลุ่มที่ 4 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 5 วินาที ไม่มีความแตกต่างกันเลยในทุกระยะการคืนกลับ

การศึกษาค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 30

ตารางที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ (M) หน่วยเป็นนิวตัน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อ ไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ

กลุ่มที่	ขนาดแรงคืนกลับเฉลี่ย (M) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ							
	2.0 มม.		1.5 มม.		1.0 มม.		0.5 มม.	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
1	15.400	0.393	5.765	0.088	5.488	0.173	5.275	0.183
2	16.130	0.281	6.802	0.257	6.200	0.464	5.968	0.435
3	15.941	0.350	6.483	0.423	5.898	0.535	5.674	0.748
4	16.137	0.282	6.888	0.162	6.257	0.457	6.000	0.557



รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม กับระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ภายใต้ข้อกำหนดที่ว่าค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมทั้ง 4 กลุ่ม ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ จากผลการทดสอบด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov ($p > 0.05$) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมทั้ง 4 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ทุกระยะการคืนกลับทั้ง 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ($p < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ค

เมื่อทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Levene พบว่าที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าเท่ากัน ($p > 0.05$) แต่ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน ($p = 0.002$) ดังนั้นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร จะเลือกใช้สถิติ Bonferroni แต่ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร จะเลือกใช้สถิติ Tamhane ดังแสดงผลในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม หรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni ที่ระยะการคืนกลับ 2.0, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร และสถิติ Tamhane ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม		ค่าสถิติ พี ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ			
		2.0 มม.	1.5 มม.	1.0 มม.	0.5 มม.
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	0.000*	0.000*	0.004*	0.032*
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 3	0.005*	0.008*	0.240	0.580
กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 4	0.000*	0.000*	0.002*	0.022*
กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	1.000	0.083	0.751	1.000
กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 4	1.000	0.946	1.000	1.000
กลุ่มที่ 3	กลุ่มที่ 4	1.000	0.022*	0.421	1.000

* มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 14 สรุปได้ดังนี้

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้ากับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด มีค่าแตกต่างกันในทุกระยะการคืนกลับ ยกเว้นกลุ่มที่ 1 ซึ่งไม่ได้รับกระแสไฟฟ้ากับกลุ่มที่ 3 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 4 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด โลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลาแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันเลยในทุกระยะการคืนกลับ ยกเว้นกลุ่มที่ 3 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 4 วินาที กับกลุ่มที่ 4 ซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม เป็นเวลา 5 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร

จากผลการศึกษาในตารางที่ 10, 11 และ 13 ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อ เซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) ที่แต่ละระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร โดยเรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานจากน้อยไปมาก ของลวดโลหะผสมทั้งสองยี่ห้อ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 15 และ 16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 15 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อ เซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) ที่แต่ละระยะการคืนกลับ โดยเรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานจากน้อยไปมาก

กลุ่มที่	เวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้า (วินาที)	ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ (หมายเลข)	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง (แอมแปร์)	ค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี (องศาเซลเซียส)	ขนาดแรงคืนกลับ (นิวตัน) ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ (ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับ โดยเปรียบเทียบกับลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า: กลุ่มที่ 1)			
					2.0 มม.	1.5 มม.	1.0 มม.	0.5 มม.
1	0	0	-	-	12.467	4.765	4.764	4.407
3	4	3	5.25	421.4	12.977 (4.09)	5.628 (18.11)	5.595 (17.44)	5.065 (14.93)
2	3	4	6.57	490.6	13.666 (9.62)	6.102 (28.06)	6.062 (27.25)	5.278 (19.76)
4	5	3	5.25	520.5	13.726 (10.09)	6.374 (33.77)	6.312 (32.49)	5.366 (21.76)

ตารางที่ 16 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อ ไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด โดยเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) ที่แต่ละระยะการคืนกลับ โดยเรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานจากน้อยไปมาก

กลุ่มที่	เวลาที่ได้รับกระแสไฟฟ้า (วินาที)	ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ (หมายเลข)	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริง (แอมแปร์)	ค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี (องศาเซลเซียส)	ขนาดแรงคืนกลับ (นิวตัน) ที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ (ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับ โดยเปรียบเทียบกับลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า: กลุ่มที่ 1)			
					2.0 มม.	1.5 มม.	1.0 มม.	0.5 มม.
1	0	0	-	-	15.400	5.765	5.488	5.275
3	4	3	5.25	421.4	15.941 (3.51)	6.483 (12.46)	5.898 (7.47)	5.674 (7.56)
2	3	4	6.57	490.6	16.130 (4.74)	6.802 (17.99)	6.200 (12.97)	5.968 (14.09)
4	5	3	5.25	520.5	16.137 (4.79)	6.888 (19.48)	6.257 (14.01)	6.000 (14.70)

จากตารางที่ 15 พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ทุกระยะการคืนกลับ 4 ระยะคือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน โดยร้อยละของการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับดังกล่าวจะมีค่ามากที่สุด ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 และ 1.0 มิลลิเมตร รองลงมาคือที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ส่วนที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ค่าร้อยละของการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับจะมีค่าน้อยที่สุด

และจากตารางที่ 16 พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ทุกระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน โดยร้อยละของการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับดังกล่าวจะมีค่ามากที่สุด ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร เช่นเดียวกันกับลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี แต่รองลงมา คือที่ระยะการคืนกลับ 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ค่าร้อยละของการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับจะมีค่าน้อยที่สุด

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับระหว่างลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี กับยี่ห้อไนไท พบว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละดังกล่าวในลวดโลหะผสมยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี มีค่ามากกว่าในลวดโลหะผสม ยี่ห้อไนไท ในทุกระยะการคืนกลับ

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที มีค่ามากกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ที่ทุกระยะการคืนกลับ 4 ระยะคือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร
2. การเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด จะแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี ที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองขั้นตอนที่ 1 เพื่อศึกษาระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง จำนวน 2 ยี่ห้อคือ ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเซฟวี ของบริษัทโทมิ และยี่ห้อไนโท ของบริษัทออมโก ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมดังกล่าว หมายถึง ระดับกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด ที่ทำให้ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังจากตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด โดยไม่เกิดลักษณะร้อนแดงของเส้นลวดขณะได้รับกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงการได้รับความร้อนที่มากเกินไปสำหรับการใช้งานในทางคลินิก⁽⁵⁾ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดกับระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับผลการศึกษาของ Miura, Mogi และ Ohura⁽⁶⁾ คือ ถ้าระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดน้อย จะต้องใช้ระดับกระแสไฟฟ้าสูง แต่ถ้าระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดนานขึ้น จะใช้ระดับกระแสไฟฟ้าที่ต่ำลง เช่น เมื่อระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 และ 4 วินาที ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด คือหมายเลข 4 และ 3 ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าถ้าระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 และ 5 วินาที ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดที่ระยะเวลาดังกล่าว คือหมายเลข 3 เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเบนเดอร์ไซเรอร์-ทู ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งกำหนดระดับกระแสไฟฟ้าสำหรับการใช้งานเป็นหมายเลข 1 ถึง 9 เท่านั้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงของแต่ละหมายเลขจึงถูกกำหนดไว้แล้วโดยบริษัทผู้ผลิต ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงตามต้องการได้ เป็นผลให้ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังจากตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเวลา 4 และ 5 วินาที มีความแตกต่างกัน แม้จะใช้ระดับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด หมายเลข 3 เท่ากัน กล่าวคือ ที่ระยะเวลา 5 วินาที ค่ามุมที่วัดได้จากขอบในของเส้นลวดภายหลังจากตัดเป็นมุมฉาก จะใกล้เคียงกับ 90 องศามากกว่าที่ระยะเวลา 4 วินาที หรือร้อยละของค่ามุมที่ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว ภายหลังจากตัดเป็นมุมฉากโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 5 วินาที จะมีค่ามากกว่าค่ามุมหรือร้อยละของค่ามุมดังกล่าวในลวดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 4 วินาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความ

แตกต่างของค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบการเรียงตัวของโมเลกุลภายในของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม

การทดลองขั้นตอนที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 11 และ 13 พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 4 วินาที มีค่าน้อยกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดยี่ห้อเดียวกันที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาทีและ 5 วินาทีตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมดังกล่าว ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมที่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะมีค่ามากกว่าลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ที่ทุกระยะการคืนกลับทั้ง 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ยกเว้นที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตรของลวดโลหะผสมที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดหมายเลข 3 (5.25 แอมแปร์) เป็นระยะเวลา 4 วินาที ซึ่งมีค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานเท่ากับ 421.4 องศาเซลเซียส

สำหรับผลการศึกษาในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสม ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 4 วินาที มีค่าน้อยกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดยี่ห้อเดียวกันที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาทีและ 5 วินาทีตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมดังกล่าว ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมที่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะมีค่ามากกว่าลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ทุกระยะการคืนกลับทั้ง 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ยกเว้นที่ระยะการคืนกลับ 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ของลวดโลหะผสมที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดหมายเลข 3 (5.25 แอมแปร์) เป็นระยะเวลา 4 วินาที ซึ่งมีค่าคุณสมบัติทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานเท่ากับ 421.4 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อไนโท จะมีค่ามากกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมยี่ห้อยี่ห้อเซนต์ลอสแอนเจลิสไนโท ทั้งในลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและที่ได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด ซึ่งอาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของชนิดและปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของโลหะผสม⁽³⁷⁾ รวมถึงขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิต

ผลการวิจัยครั้งนี้ มีความแตกต่างจากผลการศึกษาของ Miura, Mogi และ Ohura⁽⁸⁾ ที่ศึกษาขนาดแรงคืนกลับจากการทดสอบความงอสามจุดที่อุณหภูมิห้อง ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เจแปนไนโท ชนิดลวดโค้งขึ้นรูปสำเร็จ หน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว ซึ่งได้รับความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ในปริมาณ 3.5 แอมแปร์ ของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นหน้าและลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นกรามน้อย เป็นเวลา 60 นาทีและ 15 นาทีตามลำดับ พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมดังกล่าว จะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้านานขึ้น กล่าวคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นหน้า จะมีค่าน้อยกว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นกรามน้อย และขนาดแรงคืนกลับของลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งพื้นกรามซึ่งไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าเลยจะมีค่ามากที่สุด ความแตกต่างของผลการศึกษาระหว่างการศึกษานี้ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของปริมาณกระแสไฟฟ้าแท้จริงที่ลวดได้รับ ระยะเวลาที่ลวดได้รับกระแสไฟฟ้าและความยาวลวดส่วนที่ได้รับกระแสไฟฟ้า รวมถึงชนิดและปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของโลหะผสม ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิต โดยการทดลองของ Miura, Mogi และ Ohura⁽⁸⁾ จะให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่เส้นลวดในปริมาณที่น้อยกว่า ด้วยระยะเวลาที่นานกว่า และความยาวลวดส่วนที่ได้รับกระแสไฟฟ้ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการวิจัยครั้งนี้ จึงอาจเป็นผลให้พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นกับเส้นลวดส่วนที่ได้รับกระแสไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน และมีผลต่อความแตกต่างของขนาดแรงคืนกลับ

การอ้างอิงถึงค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อยี่ห้อเซนต์ลอสแอนเจลิสไนโท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ในผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมทั้งสองยี่ห้อยี่ห้อดังกล่าว มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียส ที่ทุกระยะการคืนกลับทั้ง 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 15 และ 16 อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ของลวดโลหะผสมทั้งสองยี่ห้อยี่ห้อในผลการวิจัยครั้งนี้ อาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าอุณหภูมิแท้จริงที่เกิดขึ้นบ้าง

เนื่องจากค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงานดังกล่าว ได้มาจากการแทนค่าคงที่ด้วยค่าเฉลี่ยอันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด⁽³⁶⁾ โดยมีได้จำแนกความแตกต่างระหว่างยี่ห้อ เนื่องจากเป็นความลับของบริษัทผู้ผลิตที่มีอาจเปิดเผยได้

ค่าร้อยละของการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเปรียบเทียบกับลวดยี่ห้อเดียวกันที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะมีค่ามากกว่าค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมยี่ห้อไนไท หรือกล่าวได้ว่าการกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี มากกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมยี่ห้อไนไท ดังนั้นในการกระตุ้นลวดโลหะผสมด้วยวิธีการดังกล่าวสำหรับการนำมาใช้ในทางคลินิก จึงควรคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับโดยเฉพาะในลวดโลหะผสมยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี เป็นสำคัญ

การเพิ่มขึ้นของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียมชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยครั้งนี้ มีความแตกต่างจากผลการวิจัยของ Miura และคณะ⁽²⁾ ที่ศึกษาขนาดแรงคืนกลับ จากการทดสอบความมอดสามจุด ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เจแปนีสไนไท ที่ได้รับความร้อนจากการแช่ในอ่างบรรจุเกลือไนเตรท ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10, 60 และ 120 นาทีตามลำดับ ซึ่งพบว่าขนาดแรงคืนกลับ ขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม จะมีค่าลดลงเมื่อลวดโลหะผสมดังกล่าว ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นและ/หรือระยะเวลาที่ได้รับความร้อนนานขึ้น ความแตกต่างกันของผลการศึกษานี้ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของชนิดและปริมาณของโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของเส้นลวดที่นำมาศึกษา รวมถึงกรรมวิธีในการผลิต เนื่องจากมีความแตกต่างกันในโลหะผสมแต่ละยี่ห้อ ของแต่ละบริษัท อีกทั้งความแตกต่างกันของรูปแบบและระยะเวลาการให้ความร้อนแก่เส้นลวด โดยการทดลองของ Miura และคณะ⁽²⁾ จะให้ความร้อนโดยการแช่ในอ่างบรรจุเกลือไนเตรท และใช้ระยะเวลาที่นานกว่าการวิจัยครั้งนี้

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยครั้งนี้กับการวิจัยของ Yoneyama และคณะ⁽³⁴⁾ ที่ศึกษาขนาดแรงคืนกลับขณะเปลี่ยนกลับสู่สภาพคออสเทนไนต์ หรือทรานซิชั่นนอล โหลด ดังแสดงในรูปที่ 15 ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ได้รับความร้อนจากการแช่ในอ่างบรรจุเกลือไนเตรท ในช่วงอุณหภูมิ 733 ถึง 813 เคลวิน (460 ถึง 540 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30

นาที่ ผลการศึกษาพบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดขณะเปลี่ยนกลับสู่ภูมิภาคออกสเทไนต์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการวิจัยครั้งนี้ ที่พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียสเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การศึกษาขนาดแรงคืนกลับของ Yoneyama และคณะ⁽³⁴⁾ จะพิจารณาเฉพาะขนาดแรงคืนกลับขณะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด แต่ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาขนาดแรงที่ระยะการคืนกลับ 4 ระยะ คือ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเปรียบเทียบกับแรงที่ลวดกระทำกับฟันเพื่อให้เกิดการเคลื่อนของฟัน ซึ่งทันตแพทย์จัดฟันควรให้ความสนใจทั้งสิ้น

จากผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี และยี่ห้อไนไท ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ในช่วง 421.4 ถึง 520.5 องศาเซลเซียส สามารถนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานในทางคลินิกได้ ดังตัวอย่างกรณีที่ต้องการดัดลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ร่วมกับต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับ สามารถกระทำได้โดยกระตุ้นลวดส่วนที่ต้องการโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่าง เช่น การดัดลวดเป็นขั้น (step bend) ที่ตำแหน่งไกลกลางต่อฟันตัดซี่ข้าง (lateral incisors) เพื่อเปลี่ยนระดับในแนวตั้งของฟันหน้าและฟันหลัง ซึ่งการดัดลวดเป็นขั้นจะได้รับการดัดลวดเป็นมุมจำนวน 2 ครั้ง ในระนาบเดียวกันแต่ทิศทางตรงข้าม กระทำได้จากการดัดลวดเป็นมุมโดยจับคีมให้มีระยะห่างเท่ากับลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันเขี้ยวและฟันกรามน้อย ซึ่งต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับแล้วให้กระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เพื่อให้ลวดส่วนดังกล่าว มีขนาดแรงคืนกลับมากกว่าลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันหน้าที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าจากการดัดลวดเป็นมุมในระนาบเดียวกันแต่ทิศทางตรงข้าม ซึ่งกระทำได้โดยจับคีมให้มีระยะห่างน้อยที่สุด ที่ไม่ทำให้คีมทั้งสองอันสัมผัสกันขณะให้กระแสไฟฟ้าแก่ลวด เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจร วิธีการนี้จะทำให้ได้ลวดที่ถูกดัดเป็นขั้นที่ตำแหน่งไกลกลางต่อฟันตัดซี่ข้าง โดยลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันเขี้ยวและฟันกรามน้อย จะมีขนาดแรงคืนกลับมากกว่าลวดส่วนที่เป็นตำแหน่งฟันหน้า และเนื่องจากขนาดแรงที่เหมาะสม (optimum force)⁽³⁸⁾ สำหรับการเคลื่อนฟันหน้าและฟันหลังมีความแตกต่างกัน ตามขนาดพื้นที่ผิวรากฟันส่วนที่ฝังอยู่ในกระดูก (root surface area) อย่างเป็นทางการเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังนั้นวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า

กระแสตรงในการตัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับ จึงมีประโยชน์อย่างมากสำหรับสภาวะการณืข้างต้น

นอกจากนี้อาจนำผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงคืนกลับของลวดเพียงอย่างเดียว เช่น กรณีที่ต้องการใช้ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด เป็นลวดสำหรับการจัดฟันในระยะสุดท้ายซึ่งเป็นระยะการปรับแต่ง (finishing phase) จะสามารถใช้วิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง กระตุ้นเส้นลวดส่วนที่ต้องการ โดยกระทำที่ระยะเวลา 4 วินาที ที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 (5.25 แอมแปร์, อุณหภูมิ 421.4 องศาเซลเซียส) หรือระยะเวลา 3 วินาที ที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 4 (6.57 แอมแปร์, อุณหภูมิ 490.6 องศาเซลเซียส) หรือระยะเวลา 5 วินาที ที่ระดับกระแสไฟฟ้าหมายเลข 3 (5.25 แอมแปร์, อุณหภูมิ 520.5 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีค่าร้อยละของขนาดแรงคืนกลับเรียงตามลำดับจากน้อยไปมาก ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติในด้านอื่นของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม เช่น ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาค ความทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาผลการกระตุ้นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดและ/หรือยี่ห้ออื่น โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง
3. ควรมีการศึกษาผลการกระตุ้นลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถปรับเลือกได้ตามต้องการ
4. ควรมีการศึกษาผลการกระตุ้นซ้ำตำแหน่งเดิม ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขนาดแรงคืนกลับและการแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นยิ่งยวด
5. ควรวิจัยและพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถปรับเลือกระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาได้ตามต้องการ และสามารถบอกค่าอุณหภูมิแท้จริงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Andreasen, G., Wass, K., and Chan, K. C. 1985. A review of superelastic and thermodynamic nitinol wire. Quintessence Int 16: 623-626.
2. Miura, F., Mogi, M., Ohura, Y., and Hamanaka, H. 1986. The superelastic properties of the Japanese Ni-Ti alloy wire for use in orthodontics. Am J Orthod 90: 1-10.
3. Funakubo, H., ed. 1987. Shape memory alloys. New York Gordon and Breach Science.
4. Lee, J. H., Park, J. B., Andreasen, G. F., and Lakes, R. S. 1988. Thermomechanical study of Ni-Ti alloys. J Biomed Mater Res 22: 573-588.
5. Andreasen, G. F., and Morrow, R. E. 1978. Laboratory and clinical analysis of nitinol wire. Am J Orthod 73: 142-151.
6. Proffit, W. R. ed. 2000. Contemporary orthodontics. 3rd ed. St.Louis: Mosby Year Book.
7. Phillips, R. W. ed. 1991. Science of Dental Materials. 9th ed. WB Saunders.
8. Miura, F., Mogi, M., and Ohura, Y. 1988. Japanese Ni-Ti alloy wire : use of the direct electric resistance heat treatment method. Eur J Orthod 10: 187-191.
9. Thayer, T. A., Bagby, M. D., Moore, R. N., and DeAngelis, R. J. 1995. X-ray diffraction of nitinol orthodontic archwires. Am J Orthod Dentofacial Orthop 107: 604-612.
10. วัชร เพชรคุปต์, และ ปิยรัตน์ อภิวัฒนกุล. 2542. การทำนายผลรวมความกว้างของฟันเขี้ยว ฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่งและฟันกรามน้อยซี่ที่สองจากเด็กไทยอายุ 13-15 ปี. วารสารทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 22: 167-175.
11. Burstone, C. J., and Goldberg, A. J. 1980. Beta-titanium : A new orthodontic alloy. Am J Orthod Dentofacial Orthop 77: 121-132.
12. Andreasen, G. F., and Hilleman, T. B. 1971. An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics. J Am Dent Assoc 82: 1373-1375.
13. Hurst, C. L., Duncanson, M. G., Nanda, R. S., and Angolkar, P. V. 1990. An evaluation of the shape-memory phenomenon of nickel-titanium orthodontic wire. Am J Orthod Dentofacial Orthop 98: 72-76.

14. Hamanaka, H. 1995. Clinical applications of titanium and its alloys : Super-Elastic wire. Proceeding the third international symposium on titanium in dentistry, August 29-31 : 77-82.
15. บัญชา รัตนบุญสมบัติ. 2539. โลหะจำรูป. MTEC มกราคม-มีนาคม : 70-76.
16. Tonner, R. I. M., and Waters, N. E. 1994. The characteristics of superelastic Ni-Ti wires in three point bending. Part I : the effect of temperature. Eur J Orthod 16: 409-419.
17. Segner, D., and Ibe, D. 1995. Properties of superelastic wires and their relevance to orthodontic treatment. Eur J Orthod 17: 395-402.
18. Khier, S. E., Bantley, W. A., and Fournelle, R. A. 1991. Bending properties of superelastic and nonsuperelastic nickel-titanium orthodontic wires. Am J Orthod Dentofacial Orthop 99: 310-318.
19. Burstone, C. J., Qin, B., and Morton, J. Y. 1985. Chinese Ni-Ti wire : a new orthodontic alloy. Am J Orthod 87: 445-452.
20. Chen, R., Zhi, Y. F., and Arvystas, M. G. 1992. Advanced Chinese Ni-Ti alloy wire and clinical observation. Angle Orthod 62: 59-66.
21. Burstone, C. J., Baldwin, J. J., and Lawless, D. T. 1961. The application of continuous forces to orthodontics. Angle Orthod 31 : 1-14.
22. Andreasen, G. F., and Brady, P. R. 1972. A use hypothesis for 55 Nitinol wire for orthodontics. Angle Orthod 42: 172-177.
23. Andreasen, G. F., and Barrett, R. D. 1973. An evaluation of cobalt substituted nitinol wire in orthodontics. Am J Orthod 63: 462-470.
24. Kusy, R. P. 1997. A review of contemporary archwires : their properties and characteristics. Angle Orthod 67: 197-208.
25. Santoro, M., and Beshers, D. B. 2000. Nickel-titanium alloys : stress-related temperature range. Am J Orthod Dentofacial Orthop 118: 685-692.
26. Santoro, M., Nicolay, O. F., and Cangialosi, T. J. 2001. Pseudoelasticity and thermoelasticity of nickel-titanium alloys : A clinically oriented review. Part I : Temperature transitional ranges. Am J Orthod Dentofacial Orthop 119: 587-593.

27. Santoro, M., Nicolay, O. F., and Cangialosi, T. J. 2001. Pseudoelasticity and thermoelasticity of nickel–titanium alloys : A clinically oriented review. Part II : Deactivation forces. Am J Orthod Dentofacial Orthop 119: 594–603.
28. Council on Dental Materials and Devices : American Dental Association specification No. 32 for orthodontic wires not containing precious metals. 1977. J Am Dent Assoc 95: 1169-1171.
29. Drake, S. R., Wayne, D. M., Powers, J. M., and Asgar, K. 1982. Mechanical properties of orthodontic wires in tension, bending and torsion. Am J Orthod 82: 206–210.
30. Nakano, H., Kazuro, S., Norris, R., Jin, T., Kamegai, T., and Ishikawa, F. 1999. Mechanical properties of several nickel–titanium alloy wires in three–point bending tests. Am J Orthod Dentofacial Orthop 115: 390–395.
31. Wilkinson, P. D., Dysart, P. S., Hood, J. A., and Herbison, G. P. 2002. Load–deflection characteristics of superelastic nickel–titanium orthodontic wires. Am J Orthod Dentofacial Orthop 121: 483–495.
32. Waters, N. E. 1992. Orthodontic products update. Superelastic nickel–titanium wires. Br J Orthod 19: 319–322.
33. Oltjen, J. M., Duncanson, M. G., Ghosh, J., Nanda, R. S., and Currier, G. F. 1997. Stiffness–deflection behavior of selected orthodontic wires. Angle Orthod 67: 209–218.
34. Yoneyama, T., Doi, H., Hamanaka, H., Yamamoto, M., and Kuroda, T. 1993. Bending properties and transformation temperatures of heat treated Ni–Ti alloy wire for orthodontic appliances. J Biomed Mater Res 27: 399–402.
35. Elert, G. 1998. The Physics Hypertextbook. 2nd ed. Boston: PWS.
36. Boyer, R., Welsch, G., and Collings, E. W. 1994. Materials Properties Handbook : Titanium Alloys. ASM International. 3rd ed. Easton: MD.

37. Iijima, M., Ohno, H., Kawashima, I., Endo, K., and Mizoguchi, I. 2002. Mechanical behavior at different temperatures and stresses for superelastic nickel-titanium orthodontic wires having different transformation temperatures. Dent Mater 18: 88-93.
38. Renfroe, E. W. 1956. The factor of stabilization in anchorage. Am J Orthod 42: 883-896.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก การทดสอบความน่าเชื่อถือของผู้วิจัยในการวัดค่ามุม บริเวณขอบในของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของผู้วิจัยในการวัดค่ามุม บริเวณขอบในของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

สมมติฐาน

มีความแตกต่างกันของค่ามุมบริเวณขอบในของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง จากการวัดของผู้วิจัยจำนวน 2 ครั้งในลวดเส้นเดิม

กลุ่มตัวอย่าง

ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และ ยี่ห้อไนไท ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

วิธีการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้

1. ลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี และ ยี่ห้อไนไท ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาแตกต่างกัน จำนวนยี่ห้อละ 5 เส้น รวมเป็นจำนวน 10 เส้น
2. ไม้มบรรทัดวัดมุม หรือ รูลอร์ โพรแทรกเตอร์ ยี่ห้อ HOL ประเทศไต้หวัน ที่สามารถอ่านค่าได้ที่มีความละเอียด 0.5 องศา อันเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1 ของงานวิจัยนี้

การทดสอบ

การทดสอบ ประกอบด้วยผู้วิจัย จำนวน 1 คน และผู้ช่วยวิจัย จำนวน 1 คน เพื่อลดโอกาสเกิดอคติ (bias) ของผลการทดสอบ โดยมีวิธีการดังนี้

1. ผู้ช่วยวิจัยทำการสุ่มเลือกตัวอย่างหลอดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉากโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีการเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 1 ของงานวิจัยนี้ เมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน จำนวน 10 เส้น
2. ผู้ช่วยวิจัยนำหลอดที่เตรียมไว้ในข้อที่ 1 ส่งให้แก่ผู้วิจัยด้วยวิธีการเลือกแบบสุ่ม เพื่อให้ผู้วิจัยทำการวัดค่ามุมบริเวณขอบในของเส้นหลอดโลหะผสม จำนวนเส้นละ 2 ครั้ง โดยเส้นหลอดที่ถูกวัดค่ามุมในครั้งที่ 1 แล้ว จะถูกนำกลับมารวมในกลุ่มตัวอย่างสำหรับการสุ่มเลือกในครั้งต่อไป จนหลอดเส้นเดิมถูกเลือกเพื่อวัดค่ามุมครบ 2 ครั้ง จึงจะนำออกจากกลุ่มตัวอย่าง
3. ผู้วิจัยจะไม่ทราบระดับกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการตัดหลอด รวมถึงไม่ทราบว่าหลอดเส้นที่ได้รับมาจากผู้ช่วยวิจัยเพื่อทำการวัดค่ามุม เป็นการวัดค่ามุมในครั้งที่ 1 หรือ 2 ของหลอดเส้นดังกล่าว
4. ผู้วิจัยทำการอ่านค่ามุมที่วัดได้จากบริเวณขอบในของเส้นหลอดโลหะผสม ซึ่งทำการวัดด้วยไม้บรรทัดวัดมุมที่สามารถอ่านค่าได้ที่ความละเอียด 0.5 องศา อันเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1 ของงานวิจัยนี้ และผู้ช่วยวิจัยจะเป็นผู้บันทึกค่ามุมที่อ่านได้

การวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล

ความน่าเชื่อถือของผู้วิจัย ในการวัดค่ามุมบริเวณขอบในของหลอดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ถูกวิเคราะห์จากสถิติสหสัมพันธ์ของ Pearson ในการประเมินความสัมพันธ์ของค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 และค่าสถิติที่แบบจับคู่ ในการประเมินความแตกต่างของค่ามุมเฉลี่ยที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ซึ่งการแปลผลว่าผู้วิจัยมีความน่าเชื่อถือในการวัดค่ามุมดังกล่าว สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson จะต้องมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียง 1 และผลการทดสอบค่าสถิติที่แบบจับคู่ ค่ามุมเฉลี่ยที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 จะต้องไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการทดสอบ

ค่ามุมที่วัดได้จากการอ่านค่าโดยผู้วิจัยและบันทึกโดยผู้ช่วยวิจัย ในหลอดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง ได้ผลดังแสดงในตาราง ก1

ตาราง ก1 แสดงค่ามุมที่วัดได้จากการอ่านค่าโดยผู้วิจัยและบันทึกโดยผู้ช่วยวิจัย จำนวน 2 ครั้ง ในหลอดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยึดหยุ่นยิ่งยวด ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

หมายเลขหลอด	ค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 (องศา)	ค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 2 (องศา)
1	130.0	132.0
2	102.0	102.5
3	95.0	96.0
4	125.0	125.0
5	125.5	127.0
6	130.0	130.0
7	104.0	103.0
8	132.0	132.5
9	120.0	120.0
10	101.0	102.5

จากตาราง ก1 เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ของค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ด้วยสถิติสหสัมพันธ์ของ Pearson (Pearson correlation) ได้ผลดังแสดงในตาราง ก2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก2 แสดงการทดสอบความสัมพันธ์ของค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ด้วยสถิติสหสัมพันธ์ของ Pearson ในลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่น ยิงยาว ที่ถูกตัดเป็นมุมฉากโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

Correlations

		ค่ามุม1	ค่ามุม2
ค่ามุม1	Pearson Correlation	1	.998
	Sig. (2-tailed)	.	.000
	N	10	10
ค่ามุม2	Pearson Correlation	.998	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.
	N	10	10

จากตาราง ก2 พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.998 จึงสรุปได้ว่าค่ามุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 โดยผู้วิจัยมีความสัมพันธ์กันทางสถิติ

จากนั้นทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้ง ด้วยค่าสถิติทีแบบจับคู่ (paired-sample T test) ได้ผลดังแสดงในตาราง ก3

ตาราง ก3 แสดงการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ด้วยสถิติทีแบบจับคู่

Paired Samples Test

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1 ค่ามุม1 - ค่ามุม2	-.6000	.90676	.28674	-1.2487	.0487	-2.092	9	.066

จากตาราง ก3 พบว่าค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ในครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่าสถิติ ที เท่ากับ 0.066

สรุปได้ว่า ผู้วิจัยมีความน่าเชื่อถือทางสถิติในการวัดค่ามุมบริเวณขอบในของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ที่ถูกตัดเป็นมุมฉาก โดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

ภาคผนวก ข การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี

ระยะเวลาคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ข1 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.168	10	.200*	.900	10	.217
2	.129	10	.200*	.980	10	.964
3	.262	10	.051	.871	10	.103
4	.158	10	.200*	.952	10	.687

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ข2 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.771	3	36	.518

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$$

H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่าง

$$\text{น้อย 1 คู่ หรือ } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ Sig. = .518

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ข3 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	10.805	3	3.602	17.358	.000
Within Groups	7.470	36	.207		
Total	18.275	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 17.358$ และได้ค่า Sig. = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ข4 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง
Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.1990*	.20371	.000	-1.7678	-.6302
	3	-.5100	.20371	.102	-1.0788	.0588
	4	-1.2590*	.20371	.000	-1.8278	-.6902
2	1	1.1990*	.20371	.000	.6302	1.7678
	3	.6890*	.20371	.010	.1202	1.2578
	4	-.0600	.20371	1.000	-.6288	.5088
3	1	.5100	.20371	.102	-.0588	1.0788
	2	-.6890*	.20371	.010	-1.2578	-.1202
	4	-.7490*	.20371	.005	-1.3178	-.1802
4	1	1.2590*	.20371	.000	.6902	1.8278
	2	.0600	.20371	1.000	-.5088	.6288
	3	.7490*	.20371	.005	.1802	1.3178

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) กับลวดยืดหยุ่นยิ่งยวดที่ถูกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ข5 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.135	10	.200*	.968	10	.868
2	.163	10	.200*	.894	10	.189
3	.211	10	.200*	.940	10	.558
4	.164	10	.200*	.937	10	.518

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ข6 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.534	3	36	.072

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$$

H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย

$$\text{น้อย 1 คู่ หรือ } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ Sig. = .072

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ข7 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.941	3	4.980	41.989	.000
Within Groups	4.270	36	.119		
Total	19.211	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 41.989$ และได้ค่า $\text{Sig.} = .000$

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ข8 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง
Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.3370*	.15402	.000	-1.7670	-.9070
	3	-.8630*	.15402	.000	-1.2930	-.4330
	4	-1.6090*	.15402	.000	-2.0390	-1.1790
2	1	1.3370*	.15402	.000	.9070	1.7670
	3	.4740*	.15402	.024	.0440	.9040
	4	-.2720	.15402	.515	-.7020	.1580
3	1	.8630*	.15402	.000	.4330	1.2930
	2	-.4740*	.15402	.024	-.9040	-.0440
	4	-.7460*	.15402	.000	-1.1760	-.3160
4	1	1.6090*	.15402	.000	1.1790	2.0390
	2	.2720	.15402	.515	-.1580	.7020
	3	.7460*	.15402	.000	.3160	1.1760

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ข9 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

ขนาดแรง	กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง	1	.114	10	.200*	.977	10	.948
	2	.209	10	.200*	.891	10	.176
	3	.113	10	.200*	.980	10	.968
	4	.146	10	.200*	.919	10	.346

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ข10 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
3.380	3	36	.029

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$

H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .029

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ข11 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13.916	3	4.639	47.416	.000
Within Groups	3.522	36	.098		
Total	17.438	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 47.416$ และได้ค่า $\text{Sig.} = .000$

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Tamhane

ตาราง ข12 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Tamhane

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง
Tamhane

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.2980*	.12407	.000	-1.6861	-.9099
	3	-.8310*	.14968	.001	-1.3079	-.3541
	4	-1.5480*	.07885	.000	-1.7821	-1.3139
2	1	1.2980*	.12407	.000	.9099	1.6861
	3	.4670	.18142	.112	-.0717	1.0057
	4	-.2500	.12933	.369	-.6462	.1462
3	1	.8310*	.14968	.001	.3541	1.3079
	2	-.4670	.18142	.112	-1.0057	.0717
	4	-.7170*	.15407	.003	-1.1988	-.2352
4	1	1.5480*	.07885	.000	1.3139	1.7821
	2	.2500	.12933	.369	-.1462	.6462
	3	.7170*	.15407	.003	.2352	1.1988

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ข13 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม สำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

ขนาดแรง	กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง	1	.255	10	.064	.868	10	.094
	2	.159	10	.200*	.973	10	.920
	3	.193	10	.200*	.937	10	.521
	4	.151	10	.200*	.977	10	.947

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ข14 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.023	3	36	.128

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$

H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .128

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ข15 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.638	3	1.879	18.359	.000
Within Groups	3.685	36	.102		
Total	9.322	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 18.359$ และได้ค่า $\text{Sig.} = .000$

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ข16 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อเซนต์ทอลลอย ชนิดเฮฟวี จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง
Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.8710*	.14308	.000	-1.2705	-.4715
	3	-.6580*	.14308	.000	-1.0575	-.2585
	4	-.9590*	.14308	.000	-1.3585	-.5595
2	1	.8710*	.14308	.000	.4715	1.2705
	3	.2130	.14308	.872	-.1865	.6125
	4	-.0880	.14308	1.000	-.4875	.3115
3	1	.6580*	.14308	.000	.2585	1.0575
	2	-.2130	.14308	.872	-.6125	.1865
	4	-.3010	.14308	.255	-.7005	.0985
4	1	.9590*	.14308	.000	.5595	1.3585
	2	.0880	.14308	1.000	-.3115	.4875
	3	.3010	.14308	.255	-.0985	.7005

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท

ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ค1 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.170	10	.200*	.951	10	.680
2	.272	10	.052	.915	10	.318
3	.200	10	.200*	.930	10	.450
4	.187	10	.200*	.903	10	.236

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ค2 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.491	3	36	.691

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$

H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .691

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ค3 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.607	3	1.202	11.054	.000
Within Groups	3.916	36	.109		
Total	7.523	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 11.054$ และได้ค่า Sig. = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ค4 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 2.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง

Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.7300*	.14750	.000	-1.1418	-.3182
	3	-.5410*	.14750	.005	-.9528	-.1292
	4	-.7370*	.14750	.000	-1.1488	-.3252
2	1	.7300*	.14750	.000	.3182	1.1418
	3	.1890	.14750	1.000	-.2228	.6008
	4	-.0070	.14750	1.000	-.4188	.4048
3	1	.5410*	.14750	.005	.1292	.9528
	2	-.1890	.14750	1.000	-.6008	.2228
	4	-.1960	.14750	1.000	-.6078	.2158
4	1	.7370*	.14750	.000	.3252	1.1488
	2	.0070	.14750	1.000	-.4048	.4188
	3	.1960	.14750	1.000	-.2158	.6078

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ค5 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.196	10	.200*	.943	10	.586
2	.160	10	.200*	.964	10	.828
3	.152	10	.200*	.939	10	.545
4	.195	10	.200*	.901	10	.223

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ค6 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
7.288	3	36	.001

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$
 H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .001

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ค7 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.813	3	2.604	36.935	.000
Within Groups	2.538	36	.071		
Total	10.351	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 36.935$ และได้ค่า Sig. = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Tamhane

ตาราง ค8 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Tamhane

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง

Tamhane

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.0370*	.08600	.000	-1.3115	-.7625
	3	-.7180*	.13763	.003	-1.1699	-.2661
	4	-1.1230*	.05835	.000	-1.3018	-.9442
2	1	1.0370*	.08600	.000	.7625	1.3115
	3	.3190	.15748	.316	-.1585	.7965
	4	-.0860	.09624	.946	-.3767	.2047
3	1	.7180*	.13763	.003	.2661	1.1699
	2	-.3190	.15748	.316	-.7965	.1585
	4	-.4050	.14425	.094	-.8614	.0514
4	1	1.1230*	.05835	.000	.9442	1.3018
	2	.0860	.09624	.946	-.2047	.3767
	3	.4050	.14425	.094	-.0514	.8614

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ค9 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.264	10	.063	.850	10	.059
2	.143	10	.200*	.952	10	.697
3	.174	10	.200*	.938	10	.527
4	.210	10	.200*	.842	10	.047

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ค10 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.073	3	36	.121

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$
 H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .121

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ค11 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.724	3	1.241	6.708	.001
Within Groups	6.663	36	.185		
Total	10.387	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 6.708$ และได้ค่า Sig. = .001

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ค12 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง

Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.7120*	.19240	.004	-1.2492	-.1748
	3	-.4100	.19240	.240	-.9472	.1272
	4	-.7690*	.19240	.002	-1.3062	-.2318
2	1	.7120*	.19240	.004	.1748	1.2492
	3	.3020	.19240	.751	-.2352	.8392
	4	-.0570	.19240	1.000	-.5942	.4802
3	1	.4100	.19240	.240	-.1272	.9472
	2	-.3020	.19240	.751	-.8392	.2352
	4	-.3590	.19240	.421	-.8962	.1782
4	1	.7690*	.19240	.002	.2318	1.3062
	2	.0570	.19240	1.000	-.4802	.5942
	3	.3590	.19240	.421	-.1782	.8962

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) กับลวดยืดหยุ่นยิ่งยวดที่ถูกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร

1. การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ค13 การทดสอบการแจกแจงของประชากร ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) และลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวดเป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2), 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) และ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ที่ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov

Tests of Normality

กลุ่มที่	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ขนาดแรง 1	.198	10	.200*	.927	10	.417
2	.207	10	.200*	.908	10	.268
3	.204	10	.200*	.916	10	.328
4	.350	10	.064	.677	10	.463

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

สมมติฐาน H_0 : ขนาดแรงคืนกลับมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ขนาดแรงคืนกลับไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้าค่า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าและลวดยี่ห้อเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3, 4 และ 5 วินาที ที่ระยะเวลาคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวน

ตาราง ค14 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Levene

Test of Homogeneity of Variances

ขนาดแรง			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.578	3	36	.212

สมมติฐาน H_0 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน
หรือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$
 H_1 : ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ หรือ $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ Sig. = .212

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

3. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตาราง ค15 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับ ของลวดโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนไท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

ANOVA

ขนาดแรง					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.397	3	1.132	4.141	.013
Within Groups	9.844	36	.273		
Total	13.241	39			

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

$$\text{หรือ } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

สถิติทดสอบ $F = 4.141$ และได้ค่า Sig. = .013

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig. < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทดสอบต่อไปว่าลวดกลุ่มใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน

4. การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติ Bonferroni

ตาราง ค16 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวดโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ชนิดยืดหยุ่นยิ่งยวด ยี่ห้อไนโท จำนวน 4 กลุ่ม ที่ระยะการคืนกลับ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสถิติ Bonferroni

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ขนาดแรง

Bonferroni

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.6930*	.23386	.032	-1.3459	-.0401
	3	-.3990	.23386	.580	-1.0519	.2539
	4	-.7250*	.23386	.022	-1.3779	-.0721
2	1	.6930*	.23386	.032	.0401	1.3459
	3	.2940	.23386	1.000	-.3589	.9469
	4	-.0320	.23386	1.000	-.6849	.6209
3	1	.3990	.23386	.580	-.2539	1.0519
	2	-.2940	.23386	1.000	-.9469	.3589
	4	-.3260	.23386	1.000	-.9789	.3269
4	1	.7250*	.23386	.022	.0721	1.3779
	2	.0320	.23386	1.000	-.6209	.6849
	3	.3260	.23386	1.000	-.3269	.9789

*. The mean difference is significant at the .05 level.

สมมติฐาน $H_0: \mu_i = \mu_j$; $i, j = 1, 2, 3, 4$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; $i \neq j$

โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 คู่

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$

สรุปผลการทดสอบ

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า (กลุ่มที่ 1) กับลวดยืดหยุ่นเดียวกันที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) ไม่แตกต่างกัน

- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 3 วินาที (กลุ่มที่ 2) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับของลวด ที่ถูกกระตุ้นโดยวิธีให้ความร้อนจากแรงต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตัดลวด เป็นเวลา 4 วินาที (กลุ่มที่ 3) กับ 5 วินาที (กลุ่มที่ 4) ไม่แตกต่างกัน
- ส่วนกลุ่มอื่น มีค่าเฉลี่ยของขนาดแรงคืนกลับแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศราวดี กัลยาณภาคย์ เกิดเมื่อวันอังคารที่ 26 ตุลาคม พุทธศักราช 2519 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาขั้นต้นแพทยศาสตรบัณฑิต จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2542 จากนั้นรับราชการในสังกัดทบวงมหาวิทยาลัย เป็นเวลา 2 ปี โดยเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาทันตกรรมทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ต่อมาเข้าศึกษาต่อในสาขาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย