

การวิเคราะห์และออกแบบโคลสซิงคูปสำหรับการดึงฟันซี่ขาว



เรือ โทหญิง วรินทร์า อังภากรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3514-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS AND DESIGN OF CLOSING LOOPS FOR CANINE RETRACTION



Lt.J.G. VARINTRA UNGBHAKORN

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 974-17-3514-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และออกแบบโคลสซิงคูลูปสำหรับการดึงฟันเขี้ยว
โดย	เรือโทหญิง วรินทรา อึ้งภากรณ์
สาขาวิชา	ทันตกรรมจัดฟัน
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพบุลย์ เตชะเลิศไพศาล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง กรพินท์ มหาทุมะรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพบุลย์ เตชะเลิศไพศาล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง กรพินท์ มหาทุมะรัตน์)

..... กรรมการ
(นาวาโท ทันตแพทย์หญิง นพวรรณ วิริยะศิริ)

วรินทร์ อึ้งภากรณ์ : การวิเคราะห์และออกแบบโคลสซิงลูปสำหรับการดึงฟันเขี้ยว.
(ANALYSIS AND DESIGN OF CLOSING LOOPS FOR CANINE RETRACTION)
อ. ที่ปรึกษา : อ.ทพ.ดร. ไพบุลย์ เตชะเลิศไพศาล, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร. วรินทร์ อึ้งภากรณ์,
108 หน้า. ISBN 974-17-3514-6.

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูป ซึ่งหาได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนและจากการทดลอง กลุ่มตัวอย่างเป็นโคลสซิงลูปที่ตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว จำนวน 4 รูปแบบ รูปแบบละ 5 ลูป ได้แก่ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ซึ่งมีสัดส่วนตามสัดส่วนที่ให้ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมากที่สุด นำมาวัดขนาดแรงในแนวนานกับขาของลูปในแนวระดับที่ได้จากการแอกทิเวทที่ระยะแอกทิเวท 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 และ 3.00 มม. โดยใช้ล้อยคูนีเวอร์แซลทดสอบดึงแมชชีนรุ่น LF plus เปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลอง โดยใช้สถิติทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียวที่ระดับนัยสำคัญ .05

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนเท่ากับ 33.80, 23.80, 19.60 และ 23.50 กรัม/มม. ตามลำดับ ส่วนค่าความแข็งดึงที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 81.90, 59.63, 55.94 และ 47.66 กรัม/มม. ตามลำดับ การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียวพบว่า ค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปทั้ง 4 รูปแบบที่ได้จากการทดลองไม่เท่ากับค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ระดับนัยสำคัญ .05 ($p = .000$) ดังนั้นทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูป อย่างไรก็ตามผลทางทฤษฎียังมีประโยชน์ในการทำใหทราบอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนต่างๆ ของลูปต่อค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึง เพราะฉะนั้นทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนก็เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่อาจมีส่วนช่วยในการออกแบบ และเข้าใจคุณลักษณะของโคลสซิงลูปอันเกิดจากสัดส่วนต่างๆ ของลูปได้

ภาควิชา	ทันตกรรมจัดฟัน.....	ลายมือชื่อนิติ
สาขาวิชา	ทันตกรรมจัดฟัน.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2546.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

447 61220 32.: MAJOR ORTHODONTICS

KEY WORD: STIFFNESS / CLOSING LOOP / CASTIGLIANO / CONFIGURATION / M/F

VARINTRA UNGBHAKORN : ANALYSIS AND DESIGN OF CLOSING LOOPS FOR CANINE RETRACTION. THESIS ADVISOR : PAIBOON TECHALERTPAISARN, Ph.D., THESIS COADVISOR : PROF. VARIDDHI UNGBHAKORN, Ph.D., 108 pp. ISBN 974-17-3514-6.

The objectives of this research is to compare values of the stiffnesses of the closing loops calculated by Castigliano's theorem to those by experimental results. Selected samples are the closing loops constructed from 0.016x0.022 inch stainless steel wire. They are four types of closing loops, namely, vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop and helical T-loop, each with five samples. The configuration of each type of loops corresponds to the configuration which gives maximum M/F ratio theoretically. The activated forces are measured by applying the force parallel to the horizontal legs of each loop using Lloyd universal testing machine LF plus. The activated displacements are 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 and 3.00 mm. The resulting values of loop stiffnesses obtained from experiment are then compared to the theoretical stiffnesses by using the test statistic one-sample t-test at .05 significant level.

The Castigliano's theorem predicts the values of loop stiffnesses of the vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop and helical T-loop to be 33.80, 23.80, 19.60 and 23.50 gm/mm respectively. The experimental values of the corresponding closing loops are 81.90, 59.63, 55.94 and 47.66 gm/mm respectively. From the t-test, it is found out that the stiffness values of the four closing loops obtained from experiment are not equal to those from theory at .05 significant level ($p = .000$). Hence, the Castigliano's theorem is not suitable for calculating the loop stiffness. However, the theoretical results still show the influence of variable dimensions of the closing loop on the M/F ratios and stiffnesses. Therefore, the Castigliano's theorem is still the mathematical method which may facilitate the design and understand the characteristics of the closing loop formed from various dimensions.

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ทนตแพทย์ ดร. ไพบุลย์ เศษะเลิศไพศาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ในภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณา สละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ทางสถิติ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ไพโรจน์ สิงห์ถนัดกิจ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาตรวจสอบการคำนวณโดยทฤษฎีบทของ คาสติกลีอาโน

ขอขอบคุณสถาบันราชภัฏธนบุรีที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการใช้ ลอยด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีน และนางสาวจันทร์เพ็ญ ตันติเจริญวิโรจน์ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร โปรแกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร สถาบันราชภัฏธนบุรี ที่ให้คำแนะนำในการใช้ลอยด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีน และช่วยในการรวบรวมข้อมูล

ขอขอบคุณนายสมยศ ชื่นชาติ บริษัท อินโทร เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่ให้คำแนะนำในการใช้ลอยด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีน และเขียนโปรแกรมสำหรับการรวบรวมข้อมูล ขอขอบคุณ Mr. Collins Matheson บริษัท ออร์มโค คอร์ปอเรชั่น จำกัด สหรัฐอเมริกา และบริษัท แอคคอร์ด คอร์ปอเรชั่น จำกัด สำหรับลวดที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ รวมทั้งกำลังใจที่มีให้กันเสมอมา

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ ซึ่งเป็นทั้ง บิดาและอาจารย์ที่ปรึกษาพร้อมที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในทุกๆ ด้าน นางรัชฎา อึ้งภากรณ์ มารดา ผู้เป็นกำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

เรือโทหญิง วรินทรา อึ้งภากรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	4
สมมติฐานการวิจัย.....	4
ขอบเขตและแนวทางการวิจัย.....	5
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
ความไม่สมบูรณ์ของการวิจัย.....	6
คำจำกัดความ.....	7
2 วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทนำ.....	8
ระบบแรงในการเคลื่อนฟัน.....	8
จุดศูนย์กลางความต้านทาน.....	9
แรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยว.....	12
ข้อดีของการใช้รูปในการดึงฟันเขี้ยว.....	13
ข้อเสียของการใช้รูปในการดึงฟันเขี้ยว.....	13
หลักการออกแบบสปริงที่ใช้ในการดึงฟันเขี้ยว.....	13
ขั้นตอนในการออกแบบรูปที่เหมาะสม.....	19
ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงของรูป.....	19
3 ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
พลังงานความเครียด.....	25
4 การหาสูตร M/F และความแข็งดึงของ โคลสซิงคูป.....	27
Vertical helical loop.....	28
T-loop.....	31
Opus90 loop.....	33
Helical T-loop.....	35
5 การวิเคราะห์และเลือกสัดส่วนของ โคลสซิงคูป.....	39
บทนำ.....	39
Vertical helical loop.....	39
T-loop.....	48
Opus90 loop.....	58
Helical T-loop.....	68
6 ระเบียบวิธีวิจัย.....	78
ประชากร.....	78
กลุ่มตัวอย่าง.....	78
ตัวแปรของการวิจัย.....	78
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	79
การรวบรวมข้อมูล.....	82
7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	85
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	85
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	86
8 สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	90
สรุปผลการวิจัย.....	90
อภิปรายผลการวิจัย.....	90
ข้อเสนอแนะ.....	91
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค.....	101
ภาคผนวก ง.....	104
ภาคผนวก จ.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 1: ความยาวของตัวฟันและรากฟันเขี้ยวที่สั้น (s), ขวาปานกลาง (a), ขวา (l).....	10
ตาราง 2: อัตราส่วน M/F ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชัน สำหรับฟันแต่ละซี่ เมื่อไม่มีการละลายของสันกระดูกเบ้าฟัน.....	11
ตาราง 3: อัตราส่วน M/F ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชัน สำหรับฟันแต่ละกลุ่ม เมื่อไม่มีการละลายของสันกระดูกเบ้าฟัน.....	11
ตาราง 4: อัตราส่วน M/F และอัตราโหด-ดิเฟลคชันที่เปลี่ยนแปลง จากการเพิ่มจำนวนรอบของเฮลิคซ์ใน vertical loop ขนาด 0.010x0.020 นิ้ว.....	16
ตาราง 5: โคลสซิงรูปที่ใช้ดึงฟันเขี้ยวแบบต่างๆ.....	17
ตาราง 6: ค่า M/F ของ vertical helical loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	40
ตาราง 7: ค่า M/F ของ vertical helical loop R=1.5 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	41
ตาราง 8: ค่า K (กรัม/มม.) ของ vertical helical loop R=1.5 มม. E=172,000 Mpa.....	44
ตาราง 9: ผลของค่า d ที่มีต่อค่า M/F ของ T-loop เมื่อ $H_T=W=10$ มม., R=1 มม., H=8 มม.....	49
ตาราง 10: ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ R=0.5 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	50
ตาราง 11: ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ R=1 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	50
ตาราง 12: ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ R=1.5 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	50
ตาราง 13: ความแข็งดิ่ง K (กรัม/มม.) ของ T-loop d=0 มม., R=1 มม. E=172,000 Mpa.....	54
ตาราง 14: ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ R=0.5 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	59
ตาราง 15: ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ R=1 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	59
ตาราง 16: ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ R=1.5 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	60
ตาราง 17: ความแข็งดิ่ง K (กรัม/มม.) ของ Opus90 loop R=1 มม. E=172,000 Mpa.....	63
ตาราง 18: ผลของค่า d ที่มีต่อค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ $H_T=W=10$ มม., R=1 มม., H=8 มม.....	68
ตาราง 19: ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ R=0.5 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	69
ตาราง 20: ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ R=1 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	69
ตาราง 21: ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ R=1.5 มม., d=0 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นดัด.....	69
ตาราง 22: ค่าความแข็งดิ่ง K (กรัม/มม.) ของ helical T-loop d= มม., R=1 มม. E=172,000 Mpa.....	73

สารบัญ (ต่อ)

ตาราง 23: ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน
ของค่าความแข็งแรงดึงจากการทดลองของ vertical helical loop,
T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว (ss).....86

ตาราง 24: ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการคำนวณ K และจากการทดลอง K_E คิดเป็นร้อยละ.....87

ตาราง 25: สัดส่วนของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop.....88

ตาราง ก1: ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน
ของค่าความแข็งแรงดึงจากการทดลองของ vertical helical loop,
T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....98

ตาราง ข1: การทดสอบการแจกแจงของประชากรของ
vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop
สำหรับการดึงครั้งที่ 1 สถิติทดสอบ คือ Kolmogorov-Smirnov..... 99

ตาราง ข2: การทดสอบการแจกแจงของประชากรของ
vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop
สำหรับการดึงครั้งที่ 2 สถิติทดสอบ คือ Kolmogorov-Smirnov..... 100

ตาราง ค1: การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญ .05
ของ vertical helical loop..... 101

ตาราง ค2: การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ T-loop..... 102

ตาราง ค3: การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ Opus90 loop.....102

ตาราง ค4: การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ helical-T loop.....103

ตาราง ง1: ค่าความความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ vertical helical loop..... 104

ตาราง ง2: ค่าความความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ T-loop..... 105

ตาราง ง3: ค่าความความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ Opus90 loop.....105

ตาราง ง4: ค่าความความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ และ helical T-loop.....106

ตาราง จ1: การทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่
ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop
และ helical-T loop ในการดึงครั้งที่ 1 และ 2.....107

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปภาพ 1: ผลของการให้แรงในแนวราบเพียงอย่างเดียวที่แบรคเกตของฟันเขี้ยว.....	10
รูปภาพ 2: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน M/F และความยาวลวด ในแนวราบของลูปส่วนในใกล้เหงือก การเพิ่มความยาวลวดดังกล่าวทำให้ อัตราส่วน M/F เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ทำให้อัตราโพลค-ดีเฟลคชันลดลงมาก.....	16
รูปภาพ 3: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะแอกทิเวทของ closed vertical loop เมื่อขนาดลวดและมุมเกเบิลต่างกัน.....	17
รูปภาพ 4: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะแอกทิเวท เมื่อรูปแบบ ของลูปและมุมเกเบิลต่างกัน (0.016x0.016 นิ้ว blue Elgiloy).....	18
รูปภาพ 5: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงและเวลา เมื่อแอกทิเวท สปริงที่มีอัตราโพลค-ดีเฟลคชันสูง (A) และ ต่ำ (B) ทุกๆ 4 สัปดาห์.....	19
รูปภาพ 6: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ vertical loop และ k (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่าต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.).....	20
รูปภาพ 7: สัญลักษณ์แทนส่วนต่างๆ ของ T-loop.....	21
รูปภาพ 8: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ vertical loop ในแนวหน้า-หลัง และ k (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่า ต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.).....	21
รูปภาพ 9: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ vertical loop ในแนวหน้า-หลังและแรงในแนวตั้ง เมื่อลูปมีตำแหน่งใกล้ฟัน เขี้ยวมากขึ้น แรงในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น.....	22
รูปภาพ 10: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างแบรคเกตและ k ของ vertical loop (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่าต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.).....	23
รูปภาพ 11: โคลสซิงลูปปรับแรง F และ โมเมนต์ตัด M พร้อมมุมเกเบิล.....	26
รูปภาพ 12: Vertical helical loop.....	28
รูปภาพ 13: T-loop.....	31
รูปภาพ 14: Opus90 loop.....	33
รูปภาพ 15: Helical T-loop.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพ 16: ค่า M/F ของ vertical helical loop วงเดียว ไม่มีเกเบิลเป็นค้.....	40
รูปภาพ 17: ค่า M/F ของ vertical helical loop สองวง ไม่มีเกเบิลเป็นค้.....	41
รูปภาพ 18: ค่าความแข็งต้งของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	42
รูปภาพ 19: ค่าความแข็งต้งของ vertical helical loop สองวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	42
รูปภาพ 20: ค่าความแข็งต้งของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	43
รูปภาพ 21: ค่าความแข็งต้งของ vertical helical loop สองวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	43
รูปภาพ 22: ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	44
รูปภาพ 23: โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	45
รูปภาพ 24: ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	45
รูปภาพ 25: โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	46
รูปภาพ 26: ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	46
รูปภาพ 27: โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss.....	47
รูปภาพ 28: ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	47
รูปภาพ 29: โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss.....	48
รูปภาพ 30: ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นค้ d=0 มม., R=0.5 มม.....	51
รูปภาพ 31: ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นค้ d=0 มม., R=1 มม.....	51
รูปภาพ 32: ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นค้ d=0 มม., R=1.5 มม.....	52
รูปภาพ 33: ค่าความแข็งต้ง K ของ T-loop W=8 มม.....	53
รูปภาพ 34: ค่าความแข็งต้ง K ของ T-loop W=10 มม.....	53
รูปภาพ 35: ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.).....	54
รูปภาพ 36: ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.).....	55
รูปภาพ 37: ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.).....	55
รูปภาพ 38: ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.).....	56
รูปภาพ 39: โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.).....	56
รูปภาพ 40: โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.).....	57
รูปภาพ 41: โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.).....	57
รูปภาพ 42: โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.).....	58
รูปภาพ 43: ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเป็นค้ R=0.5 มม.....	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปภาพ 44: ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเป็นน้ด R=1 มม.....	61
รูปภาพ 45: ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเป็นน้ด R=1.5 มม.....	61
รูปภาพ 46: ค่าความแข็งต้ง K ของ Opus90 loop W=8 มม.....	62
รูปภาพ 47: ค่าความแข็งต้ง K ของ Opus90 loop W=10 มม.....	63
รูปภาพ 48: ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (10x10 มม.).....	64
รูปภาพ 49: ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (10x10 มม.).....	64
รูปภาพ 50: ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (8x8 มม.).....	65
รูปภาพ 51: ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (8x8 มม.).....	65
รูปภาพ 52: โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (10x10 มม.).....	66
รูปภาพ 53: โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (10x10 มม.).....	66
รูปภาพ 54: โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (8x8 มม.).....	67
รูปภาพ 55: โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (8x8 มม.).....	67
รูปภาพ 56: ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นน้ด d=0 มม., R=0.5 มม.....	70
รูปภาพ 57: ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นน้ด d=0 มม., R=1 มม.....	70
รูปภาพ 58: ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นน้ด d=0 มม., R=1.5 มม.....	71
รูปภาพ 59: ค่าความแข็งต้ง K ของ helical T- loop W=8 มม.....	72
รูปภาพ 60: ค่าความแข็งต้ง K ของ helical T- loop W=10 มม.....	72
รูปภาพ 61: ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (10x10 มม.).....	74
รูปภาพ 62: ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (10x10 มม.).....	74
รูปภาพ 63: ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (8x8 มม.).....	75
รูปภาพ 64: ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (8x8 มม.).....	75
รูปภาพ 65: โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (10x10 มม.).....	76
รูปภาพ 66: โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (10x10 มม.).....	76
รูปภาพ 67: โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 น้ว ss (8x8 มม.).....	77
รูปภาพ 68: โโมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 น้ว ss (8x8 มม.).....	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปภาพ 69: โคลตซึ่งรูปที่ตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว
แบบ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop
ซึ่งมีส่วนตามสัดส่วนที่ดีที่สุดจากการคำนวณโดยทฤษฎีบทของ
คาสติกลีอาโน..... 79

รูปภาพ 70: คีมตัดลวด คีมตัดลวด และคีมตัดลวดคาลิเปอร์..... 80

รูปภาพ 71: แบบกระดาษอ้างอิงในการตัดลวด..... 80

รูปภาพ 72: ลอยด์ยูนิเวอร์แซลทดสอบดึงแมชชีนรุ่น LF plus..... 81

รูปภาพ 73: Vertical helical loop ก่อนแอกทิเวท และที่ระยะแอกทิเวท 3 มม..... 83

รูปภาพ 74: T- loop ก่อนแอกทิเวท และที่ระยะแอกทิเวท 3 มม..... 83

รูปภาพ 75: Opus90 loop ก่อนแอกทิเวท และที่ระยะแอกทิเวท 3 มม..... 84

รูปภาพ 76: Helical T-loop ก่อนแอกทิเวท และที่ระยะแอกทิเวท 3 มม..... 84

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเคลื่อนที่แบบทรานสเลชัน (translation) หรือบอดิลี (bodily) ของวัตถุอิสระ (free body) ที่ไม่ถูกยึดติดกับสิ่งใดๆ จะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่มากกว่ากระทำต่อวัตถุนั้นมีแนวแรงผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ (center of mass) แต่สำหรับวัตถุที่ถูกขังอยู่บางส่วน (constrained body) เช่น ฟัน การเคลื่อนที่แบบบอดิลีจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ แนวแรงที่มากกว่าผ่านจุดศูนย์กลางความต้านทาน (center of resistance, CRE) ของฟันเท่านั้น¹ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันแต่ละซี่จะขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปร่างฟัน จำนวนรากฟัน การกระจายของน้ำหนัก และเนื้อเยื่อที่รองรับ เช่น กระดูกเบ้าฟัน (alveolar bone) และเอ็นยึดปริทันต์ (periodontal ligament)^{2,3,4} การเคลื่อนฟันมักต้องการให้ฟันเคลื่อนแบบบอดิลี เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) สูงเฉพาะแห่งบนผิวรากฟันและภายในกระดูกเบ้าฟัน ซึ่งอาจจะทำให้บาดเจ็บและเกิดการละลายของรากฟัน และโครงสร้างที่เกี่ยวข้องได้

ในสภาพความเป็นจริง การให้แรงกระทำโดยมีแนวแรงผ่านจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันนั้นเป็นไปได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ระบบแรงซึ่งประกอบด้วยแรงและโมเมนต์ (moment) กระทำที่แบรคเกต (bracket) ที่ติดอยู่บนตัวฟันแทน โดยพยายามจัดระบบแรงเพื่อให้ได้ลักษณะการเคลื่อนฟันสุดท้ายตามที่ต้องการ

วิธีการที่ทำให้เกิดระบบแรงเพื่อเคลื่อนฟันหนึ่งซี่หรือกลุ่มของฟัน ไปปิดช่องว่างมีสองวิธี^{1, 5} วิธีแรกเรียกว่า วิธีการเคลื่อนฟันไปตามเส้นลวดโค้ง (sliding mechanics) เป็นการให้แรงและโมเมนต์ขนาดที่เหมาะสม กระทำต่อฟันผ่านเส้นลวดโค้งต่อเนื่อง (continuous arch wire) โดยอาศัยแรงจากอีลาสโตเมอร์ โมดูล (elastomeric module) หรือขดลวดสปริง (coil spring) ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้ง่าย โดยไม่ต้องถอดเส้นลวดโค้งออกมา ดังนั้น วิธีนี้จึงทำได้เร็วและใช้เวลาในคลินิกน้อย แม้ว่าจะสามารถทำได้ง่าย แต่เนื่องจากวิธีการนี้มีความเสียดทานระหว่างเส้นลวดและแบรคเกต ซึ่งเป็นปัจจัยแปรเปลี่ยนที่สำคัญขณะที่ฟันเคลื่อนไปตามเส้นลวดโค้ง จึงทำให้การกำหนดหรือทำนายค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง (M/F) ทำได้ยาก

วิธีการที่สอง เป็นวิธีการเคลื่อนฟันด้วยเส้นลวดโค้ง (loop mechanics) สามารถทำได้โดยการดัดเส้นลวดโค้งให้เป็นลูปรูปแบบต่างๆ กัน เพื่อถ่ายทอดแรงที่ทำให้ได้ขนาดอัตราส่วน M/F ซึ่งทำให้ฟันหนึ่งซี่หรือหลายซี่เคลื่อนไปในทิศทางที่ต้องการ เมื่อแอคทิเวท (activate) ลูปดังกล่าวนี้ด้วยแรงจำนวนหนึ่ง ลูปจะบิดเบี้ยวไปจากรูปร่างเดิม พลังงานที่เก็บอยู่ในลูปขณะแอคทิเวท ก็จะเปลี่ยนไปเป็นแรงและโมเมนต์กระทำต่อฟันหรือกลุ่มของฟันนั้น และจะค่อยๆ กลับคืนสู่รูปร่าง

เดิมในขณะที่ฟันถูกดึงให้เคลื่อนที่ไป ในระหว่างกระบวนการดังกล่าวนี้ แบริกเกตจะไม่เลื่อน (slide) ไปตามเส้นลวดโค้ง ดังนั้นจึงเป็นวิธีการดึงฟันที่ไม่มีเสียดทานระหว่างเส้นลวดโค้งและแบริกเกต รูปเหล่านี้เรียกว่า “โคลสซิงลูป” (closing loop) ซึ่งมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ ไร้ความเสียดทานในขณะที่ปิดช่องว่างระหว่างฟัน ฉะนั้นจึงทำให้สามารถสร้างระบบแรงสำหรับการควบคุมหลักยึด (anchorage control) และการเคลื่อนที่ของฟันได้แม่นยำกว่าวิธีการที่มีความเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้องดังเช่นในวิธีแรก

นอกจากการออกแบบโคลสซิงลูปรูปแบบต่างๆ กัน เพื่อให้ได้ขนาดอัตราส่วน M/F ที่เหมาะสมกับการเคลื่อนฟันแล้ว ค่าความแข็งตึง (stiffness, K) ของโคลสซิงลูป ก็มีความสำคัญมากเช่นกัน ค่าความแข็งตึงหรืออัตราโหลด-ดีฟเลกชัน (load-deflection rate, F/D) คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือแอคทิเวทให้ปลายขาของลูปแยกออกหนึ่งหน่วยความยาว ซึ่งในทางพันธุกรรมจัดฟันนิยมใช้หน่วยเป็นกรัม/มม. โดยมีสัญลักษณ์แทนความแข็งตึง คือ K หรือ F/D ถ้า K มีค่าสูง แรงที่ใช้ในการแอคทิเวทจะสูงตามไปด้วย เช่น $K = 120$ กรัม/มม. หมายความว่าต้องใช้แรงถึง 120 กรัม เพื่อแอคทิเวทขาของลูปให้แยกออกหนึ่งมิลลิเมตร และอัตราการลดลงของแรงในลูปจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อฟันเคลื่อนที่เข้ามาเพียงเล็กน้อย ทำให้ต้องแอคทิเวทบ่อยขึ้น ในทางกลับกัน ถ้า K มีค่าพอเหมาะและไม่สูงนัก เช่น $K = 50$ กรัม/มม. แสดงว่าสามารถใช้แรงเพียง 100 กรัมเพื่อแอคทิเวทลูปได้ถึง 2 มิลลิเมตร และอัตราการลดลงของแรงก็จะช้ากว่าลูปที่มีค่า K สูง ดังนั้นช่วงระยะเวลาระหว่างการแอคทิเวทแต่ละครั้งยาวนานขึ้น และลูปจะให้แรงและโมเมนต์ที่มีขนาดลดลงด้วย นอกจากนี้ค่า K ที่สูงจะทำให้ระดับความเค้นที่เกิดขึ้นในเอ็นยึดปริทันต์ กระดูกเขี้ยวฟัน และรากฟันสูงตามไปด้วย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการบาดเจ็บได้ รวมทั้งค่า M/F ก็จะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วในขณะที่ฟันเคลื่อนที่ไป ถ้าค่า M/F ไม่คงที่ การกระจายความเค้นบนเอ็นยึดปริทันต์จะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว เมื่อฟันเคลื่อนที่เป็นวงจรรจากการเคลื่อนที่ของตัวฟัน (controlled tipping) ไปสู่ทรานสเลชัน และไปสู่การเคลื่อนที่ของรากฟัน (root movement) รูปแบบของโคลสซิงลูปส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ จะพยายามออกแบบให้มีความแข็งตึง K ต่ำ ซึ่งทำให้จำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่มีราคาสูงในลูปบางรูปแบบ เพื่อให้ค่าโมดูลัสของ Young (Young's modulus) หรือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของเส้นลวดลดลง^{6,7} เช่น การใช้ลวด TMA^{1,8} เป็นต้น ในกรณีที่ทำการเบิ้ลเบนด์ (gable bend) การลดค่าโมดูลัสของ Young จะมีผลทำให้ค่า M/F ลดลง จนไม่เพียงพอที่จะเกิดการเคลื่อนฟันแบบที่ต้องการ และอาจต้องเลือกใช้เส้นลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ แรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางความต้านทาน แต่เนื่องจากการให้แรงสามารถกระทำได้เฉพาะที่แบริกเกตซึ่งติดอยู่บนตัวฟัน ดังนั้นแนวแรงจึงอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางความต้านทาน โดยวัดตามแนวแกนที่ตั้งฉากกับระนาบคดเคี้ยว (occlusal plane) เป็นระยะ d เพราะฉะนั้นจึงเกิดโมเมนต์ที่ไม่ต้องการขึ้นเท่ากับ $M = Fxd$ โมเมนต์นี้พยายามที่จะหมุนฟันรอบจุดศูนย์กลางความต้านทาน หลักการของการใช้

โคลสซิงลูป คือ การออกแบบและติดตั้งลูปบนตัวฟัน เพื่อให้เกิดโมเมนต์ในทิศทางตรงกันข้าม และมีขนาดเท่ากับโมเมนต์ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลีนั่นเอง จะเห็นได้ว่า $M/F=d$ ฉะนั้นลูปที่ต้องการทางอุดมคติ จะต้องม้อัตราส่วน M/F ที่แปรกเกิดเท่ากับระยะ d มม. อย่างไรก็ตาม การได้อัตราส่วน M/F ที่พอเหมาะเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ แต่ขนาดของแรง F จะต้องเหมาะกับการดึงฟันให้เคลื่อนที่ไปในอัตราที่ไม่ช้าเกินไป และต้องไม่ทำให้เกิดความเค้นสูงบนเอ็นยึดปริทันต์ด้วย ในอดีตได้มีความพยายามศึกษาถึงตำแหน่งจุดศูนย์กลางความต้านทานจากผู้วิจัยจำนวนมาก^{2, 9-13} จนกระทั่งมีการสรุปผลได้ว่า ระยะเฉลี่ยระหว่างตำแหน่งของแบรคเกตถึงจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันบนอยู่ระหว่าง 7.6-9.6 มม. ส่วนของฟันล่างอยู่ระหว่าง 7.6-10.3 มม¹

ลูปที่ใช้กันมากและเชื่อว่ามีค่า M/F สูง คือ vertical helical loop, T-loop และ L-loop แต่ยังไม่มียโคลสซิงลูปที่มีขาในแนวตั้งตั้งฉากกับขาในแนวราบแบบใด ที่สามารถสร้างค่า M/F ขึ้นในตัวเอง (inherent moment-to-force ratio) ได้จนถึงระดับที่ต้องการ ส่วนใหญ่แล้วจะให้ค่า M/F น้อยกว่า 6 มม. ดังนั้น ทันตแพทย์จัดฟันส่วนมากจึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วน M/F ด้วยการใส่เกเบิลเบนด์ที่ขาลวดที่อยู่หน้าและหลังลูปเสมอ เพื่อให้ได้ค่า M/F อยู่ประมาณ 8-10 มม. จึงจะเกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลี Siatkowski^{1, 8} ออกแบบและศึกษาลูปชนิดใหม่เรียกว่า Opus90 loop ซึ่งมีขาตั้งตรงเป็นมุมฉาก แต่ก็ไม่สามารถให้ค่า M/F สูงพอ (8-10 มม.) จึงได้ดัดขาแนวตั้งเอียงเป็นมุมต่างๆ และพบว่าถ้าให้ขาข้างหนึ่งทำมุม 70° และอีกด้านหนึ่ง 110° ขาทั้งสองข้างของลูปจะมีค่า M/F เท่ากัน จึงเรียกชื่อว่า Opus70 loop แต่ลูปนี้ให้ค่า M/F ในตัวเองเพียง 5.5 มม. เมื่อวางลูปให้ขาด้านใกล้กลางของลูปห่างจากแบรคเกตที่อยู่ใกล้กลาง 1.5 มม. จะทำให้ค่า M/F ที่ขาด้านใกล้กลางเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วงที่ต้องการได้ แต่นั่นเป็นผลจากการวางตำแหน่งของลูปในแนวหน้า-หลัง ไม่ใช่ผลจากสัดส่วนของลูปเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ในทางปฏิบัติ การดัดขาในแนวตั้งให้เอียงเป็นมุม 70° ทำได้ยาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษา Opus90 loop เนื่องจากสามารถดัดได้แม่นยำกว่า

แม้ว่าการหาค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึงสามารถทำได้โดยการทดลอง แต่จะสิ้นเปลืองงบประมาณและใช้เวลามาก ดังนั้นงานวิจัยจึงใช้การคำนวณทางทฤษฎีโดยอาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็งที่เกี่ยวข้อง ในการคำนวณหาค่า M/F และความแข็งดึงของโคลสซิงลูปรูปแบบและสัดส่วนต่างๆ^{1, 8, 14} ซึ่งจะเป็ประโยชน์แก่ทันตแพทย์จัดฟันในการกำหนดสัดส่วนของลูปที่ต้องการใช้ ให้ได้ค่า M/F และความแข็งดึงตามต้องการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเปรียบเทียบค่าความแข็งดึงที่หาได้จากการคำนวณทฤษฎี (K) และจากการทดลอง (K_E) เพื่อยืนยันความถูกต้องของสูตรที่ใช้คำนวณ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสัดส่วนของ vertical helical loop, T-loop และ Opus90 loop ในทางทฤษฎีซึ่งจะให้ค่า M/F สูงสุดขณะที่ยังไม่มีการเปิดเบนด์
2. เพื่อคำนวณหาและจัดทำกราฟค่า M/F ของโคลสซิงรูปในทางทฤษฎี เมื่อมีมุมเปิดต่างๆ กันในขณะที่แรงดึงในเส้นลวดเปลี่ยนไป (ใช้ค่าแรง F ขนาด 50, 100 และ 150 กรัมเป็นหลักในการวิจัย)
3. เพื่อคำนวณหาค่าความแข็งแรงดึงในทางทฤษฎีของโคลสซิงรูป ตามสัดส่วนที่ได้เลือกมาในข้อ 1
4. เพื่อวิเคราะห์และออกแบบโคลสซิงรูปใหม่ที่มีค่า M/F สูงขึ้น และค่าความแข็งแรงดึงเหมาะสม
5. เพื่อให้ได้โคลสซิงรูปพร้อมมุมเปิดเบนด์ที่มีค่า M/F และความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมกับงาน โดยที่ใช้ลวดสี่เหลี่ยมทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (ss) ซึ่งมีราคาถูกและนิยมใช้กันทั่วไปโดยที่ไม่ต้องหันไปใช้วัสดุที่มีราคาแพง เช่นลวด TMA เป็นต้น
6. เปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของโคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว โดยเปรียบเทียบเฉพาะสัดส่วนที่ให้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุด ซึ่งหาได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการทดลอง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ทราบอิทธิพลของตัวแปรสัดส่วนต่างๆ ของโคลสซิงรูป ตลอดจนมุมเปิดต่ออัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งแรงดึง
2. มีแนวทางในการเลือกรูปแบบและสัดส่วนของโคลสซิงรูปเพื่อให้ได้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งแรงดึงที่พอเหมาะ
3. มีแนวทางในการประเมินค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งแรงดึงของโคลสซิงรูป
4. ทำให้ทราบแรงที่ควรใช้ในการแอคทีเวทโคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบที่มีสัดส่วนเช่นเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัย โดยอาศัยผลจากการทดลอง ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงมิให้เกิดการบาดเจ็บต่ออวัยวะปริทันต์ เนื่องจากการใช้แรงสูงเกินไปได้

สมมติฐานของการวิจัย

ค่าความแข็งแรงดึงของโคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ซึ่งหาได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการทดลองไม่แตกต่างกัน

ขอบเขตและแนวทางการวิจัย

1. ใช้ทฤษฎีของคาสติกลิอาโนในการหาสมการ M/F และความแข็งดิ่ง K สำหรับ vertical helical loop, T-loop และ Opus90 loop ให้อยู่ในรูปของตัวแปรของสัดส่วนต่างๆ ของลูป
2. วิเคราะห์และออกแบบสัดส่วนของ vertical helical loop, T-loop และ Opus90 loop โดย
 - 2.1 สมมติให้ยังไม่มีเกเบิลเบนด์ แล้วคำนวณและเขียนกราฟของ M/F และความแข็งดิ่งจากสมการที่ได้ในข้อ 1 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่า M/F และความแข็งดิ่งเมื่อตัวแปรสัดส่วนของโคลสซิงลูป เช่น ความยาว ความสูง และรัศมีของเฮลิกซ์ (helix) เปลี่ยนไป
 - 2.2 กำหนดสัดส่วนกว้างxยาวสูงสุดของทุกโคลสซิงลูปไว้ที่ 10x10 มม. และ 8x8 มม. สำหรับพื้นเจ็บบน และพื้นเจ็บล่างตามลำดับ แล้วจึงเลือกสัดส่วนของโคลสซิงลูปที่มีค่า M/F สูงสุด โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 2.1 (คาดว่าค่าที่ได้จะยังคงต่ำกว่าที่ต้องการใช้ในการเคลื่อนที่พื้นแบบบอดีลี)
3. จากสัดส่วนที่ให้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุดของ โคลสซิงลูปแต่ละรูปแบบที่ได้ในข้อ 2 นำสมการที่ได้ในข้อ 1 มาคำนวณและจัดทำกราฟ ค่า M/F ของโคลสซิงลูปซึ่งทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.016 นิ้ว และ 0.016x0.022 นิ้ว ขนาดแรง 75, 100 และ 150 กรัม ที่มุมเกเบิลเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20 องศา เพื่อให้เป็นข้อมูลแก่ทันตแพทย์จัดฟันในการเลือกใช้งาน
4. ประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณมาทั้งหมดนี้ จะนำไปออกแบบและวิเคราะห์ โคลสซิงลูปรูปแบบใหม่อีกหนึ่งรูปแบบ โดยดำเนินการวิเคราะห์ซ้ำจากข้อ 2-3
5. ในการวิเคราะห์และออกแบบขั้นสุดท้ายในข้อ 2.2 ซึ่งรวมทั้งโคลสซิงลูปชนิดใหม่ในข้อ 4 ผู้วิจัยจะใช้วัสดุของลวดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.016 นิ้ว และ 0.016x0.022 นิ้ว เพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้วัสดุราคาถูกที่มีอยู่ทั่วไป แทนการใช้วัสดุพิเศษซึ่งมีราคาสูง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะคำนวณค่าความแข็งดิ่งของโคลสซิงลูปแต่ละรูปแบบ โดยใช้สัดส่วนที่ให้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุด และจัดทำกราฟค่าความแข็งดิ่งที่ความสูงต่างๆ ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองขนาด
6. วัดค่าความแข็งดิ่งแนวระดับ หรือวัดค่าแรงต่อระยะที่แอกทิเวทของโคลสซิงลูปทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว โดยทำเฉพาะสัดส่วนที่ให้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุด ด้วยล้อยัดยูนิเวอร์แซลเทสติดิงแมชชีน (Lloyd universal testing machine) และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ในสถานการณ์ซึ่งไม่มีเครื่องวัดโมเมนต์ จึงใช้การคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนในการหาค่า M/F และตรวจสอบค่าที่ได้โดยผู้เชี่ยวชาญทางกลศาสตร์วัสดุ 2 ท่าน
2. ในการนำทฤษฎีของคาสติกลีอาโนมาประยุกต์ใช้กับโคลสซิงรูป มีข้อสมมติฐานเพิ่มเติมดังต่อไปนี้:-
 - 2.1 ให้ลวดเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic material)
 - 2.2 เมื่อแอคทีเวทลูปแล้ว วัสดุยังคงอยู่ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้น
 - 2.3 ให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลูปจากการแอคทีเวทมีเพียงเล็กน้อย
 - 2.4 ให้ลวดทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน
 - 2.5 ให้ความยาวของปลายขาแนวระดับของลูปทั้งสองด้านเท่ากัน
 - 2.6 ให้ปลายขาของลูปทั้งสองด้านมีมุมเกเบิลเท่ากัน
3. สัดส่วน กว้างxยาว สูงสุดของ โคลสซิงรูปทุกรูปแบบ กำหนดไว้ที่ 10x10 มม.
4. การตัดลวดทำโดยผู้วิจัยเพียงผู้เดียว และใช้เครื่องมือชุดเดียวกัน
5. ส่วนปลายของครอสเฮด (cross head) ซึ่งทำหน้าที่จับยึดลูป จะหนีบขาในแนวราบของลูปที่ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางของลูป 7 มม.
6. ระยะทางที่แอคทีเวทลูป อ่านได้ละเอียดถึง 0.01 มม.
7. แรงที่เกิดขึ้นจากการแอคทีเวทลูป สัมพันธ์กับระยะทางที่แอคทีเวท

ความไม่สมบูรณ์ของการวิจัย

1. ผลการวิจัยนี้ไม่สามารถนำไปอ้างอิงในโคลสซิงรูปรูปแบบอื่นๆ หรือลวดชนิด หรือขนาดอื่นได้
2. ชนิด ขนาด และยี่ห้อลวดเดียวกัน อาจมีส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวิจัยได้
3. เนื่องจากลูปได้รับการตัดด้วยมือ จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากตัวผู้วิจัยซึ่งเป็นผู้ตัด ในแง่ของความแตกต่างของขนาดลูป
4. ผลการวิจัยนี้เป็นเพียงความรู้พื้นฐาน ไม่สามารถนำไปอ้างอิงโดยตรงในผู้ป่วย เนื่องจากมีปัจจัยที่แตกต่างกัน เช่น ลักษณะทางกายวิภาคของฟัน ระดับสันกระดูกเบ้าฟัน คุณสมบัติของอวัยวะปริทันต์ที่รองรับ (periodontal support) และตำแหน่งของแบรคเกต เป็นต้น

คำจำกัดความ

1. ความเค้น (stress) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงและพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับแนวแรงที่มากระทำ
2. ความเครียด (strain) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระยะที่ยืดต่อความยาวเดิมในทิศทางที่แนวแรงกระทำ
3. โมดูลัสของ Young หรือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus or modulus of elasticity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียด เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่หาได้จากการทดลองดึงแท่งวัสดุนั้น แล้วเขียนกราฟระหว่างความเค้นเทียบกับความเครียด
4. ความแข็งดึง หรืออัตราโหลด-ดีฟเลกชัน (stiffness, load-deflection rate, K) ของลูป หมายถึง แรงที่ใช้ในการดึงหรือแอคทีเวทให้ปลายขาของลูปแยกออกหนึ่งหน่วยความยาว ในทางทันตกรรมจัดฟันนิยมใช้หน่วยเป็นกรัม/มม.
5. วัสดุที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic material) หมายถึง วัสดุที่มีคุณลักษณะของกราฟระหว่างความเค้นเทียบกับความเครียดเป็นเส้นตรง ซึ่งทดสอบได้โดยการดึงแท่งวัสดุ
6. การขจัดเชิงเส้น (linear displacement) หมายถึง การเคลื่อนที่เป็นเส้นของจุดใดจุดหนึ่ง เมื่อมีแรงมากระทำ
7. การขจัดเชิงมุม (angular displacement) หมายถึง การเคลื่อนที่ของวัตถุโดยหมุนไปเป็นมุม เมื่อมีแรงหรือโมเมนต์มากระทำ
8. ขีดจำกัดยืดหยุ่น (elastic limit) หมายถึง ความเค้นสูงสุดวัสดุสามารถรับได้ โดยไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (permanent deformation)
9. โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (moment of inertia of area) หมายถึง คุณสมบัติของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลในการต้านต่อการกระทำของโมเมนต์ (แรงดัด)

บทที่ 2

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

บทนำ

การแก้ไขการสบฟันผิดปกติด้วยการถอนฟัน โดยเฉพาะฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่งร่วมด้วย จำเป็นต้องมีการเคลื่อนฟันเพื่อปิดช่องว่าง และการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปสู่ช่องว่างนับเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากตำแหน่งฟันเขี้ยวที่ถูกต้องภายหลังการเคลื่อนไปทางด้าน ไกลกลาง มีอิทธิพลต่อการจัดฟัน ให้มีการบดเคี้ยวที่ดี (function) ความมีเสถียรภาพของฟันภายหลังการจัด (stability) และความสวยงาม (esthetics) ไม่ว่าตำแหน่งฟันเขี้ยวที่ถูกต้องนี้จะได้จากการตั้งฟัน (upright) การพลิกฟัน (crown tipping) หรือการเคลื่อนที่แบบบอดีลีก็ตาม ดังนั้นระบบแรงที่เหมาะสม (optimal force system) จึงมีความสำคัญในการดึงฟันเขี้ยว

ระบบแรงในการเคลื่อนฟัน

ระบบแรงสำหรับการเคลื่อนฟันหนึ่งซี่หรือกลุ่มฟันเพื่อปิดช่องว่างมีอยู่ 2 ระบบ ได้แก่

1. ระบบที่มีความเสียดทาน

เป็นการใช้แรงและโมเมนต์ขนาดที่เหมาะสม เพื่อเคลื่อนฟันไปตามเส้นลวดโค้ง ต่อเนื่องซึ่งร้อยผ่านแบรคเกต อุปกรณ์ให้แรงอาจเป็นอีลาสโตเมริก โมดูลหรือขดลวดสปริง^{1, 15} อัตราส่วน M/F จะเป็นตัวกำหนดการเริ่มเคลื่อนที่ของฟันหรือกลุ่มฟันที่ถูกยึดขึ้นอยู่ในเอ็นยึดปริทันต์ ในระยะแรกของการเคลื่อนของฟันจะเกิดการกระจายความเค้นและความเครียดขึ้นภายในเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งจะไปกระตุ้นให้เกิดการปรับเปลี่ยนรูปร่างของกระดูก (bone remodeling) และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟันในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่ฟันเคลื่อนที่ แรงที่กระทำจะลดลง ทำให้อัตราส่วน M/F เปลี่ยนไป โดยทั่วไปแล้วการตอบสนองของฟันจะเริ่มจากการเคลื่อนที่ของตัวฟัน ซึ่งมีจุดหมุนอยู่ที่ปลายรากฟัน ไปสู่ทรานสเลชัน และไปสู่การเคลื่อนที่ของรากฟัน การเคลื่อนที่ของฟันลักษณะนี้อาจจะไม่ใช่วิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุด หรือทำให้เกิดการบาดเจ็บน้อยที่สุด เนื่องจากวิธีนี้มีความเสียดทานระหว่างเส้นลวดและแบรคเกต ซึ่งเป็นปัจจัยแปรเปลี่ยนที่สำคัญ ในขณะที่ฟันเคลื่อนที่ไปตามเส้นลวดโค้ง ทำให้การกำหนดหรือทำนายค่าอัตราส่วน M/F กระทำได้ยาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังสามารถนำมาใช้ในคลินิกได้^{1, 16}

2. ระบบที่ไร้ความเสียดทาน

เป็นการเคลื่อนฟันโดยลวดซึ่งตัดเป็นลูปรูปแบบต่างๆ เช่น สปริงของ Burstone^{16, 17} พีจีสปริง (PG spring) ของ Gjessing^{5, 18, 19} และ Opus70 loop⁸ ลวดที่ใช้ควรเป็นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยม เพื่อป้องกันการหมุนของลวดในร่องของแบรคเกต (bracket slot) ลูปควรมีรูปร่างที่คดง่าย เนื่องจาก

ลูปที่ซับซ้อนจะเสียเวลาในการตัดมาก และมีแนวโน้มที่จะแตกหักหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อของผู้ป่วยอีกด้วย²⁰ การปรับลวดเพื่อให้เกิดแรงทำได้โดยการดึงปลายลวดด้านหลังหรือการผูกลวด²¹ วิธีนี้ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างเส้นลวดและแบรคเกต ดังนั้นจึงสามารถทำนายแรงได้แม่นยำกว่าวิธีแรก

จุดศูนย์กลางความต้านทาน

จุดศูนย์กลางความต้านทานของฟัน คือ จุดในตัวฟันซึ่งเมื่อมีการให้แรงกระทำผ่านแล้ว จะเกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลี กล่าวคือ ทุกจุดบนฟันจะเคลื่อนที่ขนานกับแกนยาวของฟัน^{3, 5, 22}

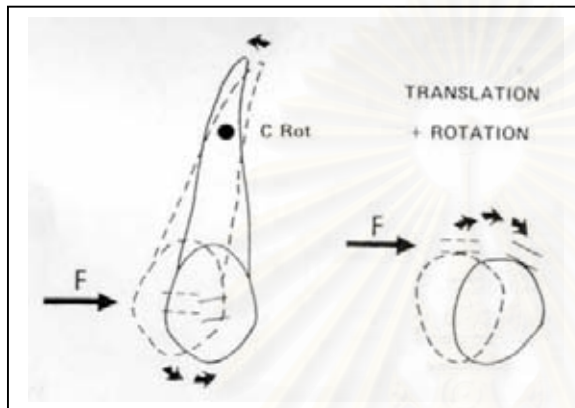
การกำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางความต้านทานจะพิจารณาจาก^{3, 4, 22}

1. รากฟัน ได้แก่ รูปร่าง ขนาด และจำนวน
2. การกระจายของน้ำหนัก
3. เนื้อเยื่อที่รองรับ ได้แก่ กระดูกเบ้าฟัน เอ็นยึดปริทันต์และเนื้อเยื่อเหงือก

การศึกษาตำแหน่งจุดศูนย์กลางความต้านทาน Burstone และ Pryputniewicz²² ศึกษาโดยใช้เลเซอร์โฮโลกราฟี (laser holography) พบว่า จุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันตัดซี่กลางบนจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางรากฟัน หรือ 1 ใน 3 ของระยะจากสันกระดูกเบ้าฟันไปยังปลายราก ส่วนฟันกรามซึ่งมีหลายรากจะมีจุดศูนย์กลางความต้านทานอยู่ใกล้จุดแยกราก¹⁶ Davidian²³ ศึกษาแบบจำลองเบ้าฟันโดยคอมพิวเตอร์ (computer model) พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันตัดซี่กลางบนอยู่ประมาณ 6 ใน 10 ของระยะทางจากปลายรากฟันถึงสันกระดูกเบ้าฟัน Pedersen, Anderson และ Gjessing²⁴ ศึกษาโดยใช้แบบจำลองทดลอง (experimental model) ของฟันกรามซี่ที่หนึ่งล่างและฟันกรามน้อยล่างพบว่า จุดดังกล่าวอยู่ที่ระยะ 6.4 มม. (38.6%) และ 3.6 มม. (28.6%) จากรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟันไปทางปลายรากตามลำดับ Tanne, Koenig และ Burstone¹¹ พบว่า จุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันตัดซี่กลางบนอยู่ที่ระยะ 0.24 เท่าของความยาวรากซึ่งวัดจากสันกระดูกเบ้าฟันไปยังปลายรากฟัน Yamaguchi และ Nanda²⁵ พบว่า จุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันเขี้ยวบนและฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่งอยู่ประมาณ 35% และ 32% ของความยาวรากซึ่งวัดจากขอบของคอฟัน (cervical margin) ไปยังปลายรากฟันตามลำดับ

เมื่อให้แรงในแนวราบกระทำที่แบรคเกตจะทำให้เกิดการล้มเอียงของฟัน (การเคลื่อนที่แบบบอดิลีและการหมุน) (รูปที่ 1) เมื่อเพิ่มแรงคู่ควบที่แบรคเกตจะทำให้อัตราส่วน โมเมนต์ต่อแรงในแนวราบมีค่าเท่ากับระยะทางจากแบรคเกตไปยังจุดศูนย์กลางความต้านทาน เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลี⁵ มีผู้เสนอการคำนวณระยะทางดังกล่าวในฟันเขี้ยวโดยให้แบรคเกตอยู่ที่ตำแหน่ง 4 มม. จากคัพ และจุดศูนย์กลางความต้านทานอยู่ที่ 1 ใน 3 จากปลายรากฟันไปยังสันริมฟัน (marginal ridge)²⁶ ดังตารางที่ 1 ส่วนเมื่อใช้ขนาดและรูปร่างฟันโดยเฉลี่ยของ Wheeler²⁷ เป็นพื้นฐาน จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วน M/F ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนที่แบบบอดิลีสำหรับ

ฟันแต่ละซี่หรือฟันแต่ละกลุ่มได้ดังตารางที่ 2 และ 3 สมมติว่าไม่มีการละลายของสันกระดูกเบ้าฟัน อัตราส่วน M/F ที่คำนวณได้สำหรับฟันแต่ละซี่มีค่าตั้งแต่ 7.1-10.2 มม. สำหรับฟันแต่ละกลุ่มมีค่าตั้งแต่ 8.1-9.1 มม.¹ Gjessing⁵ เสนอว่า อัตราส่วน M/F ของฟันเขี้ยวซึ่งมีความยาวราก 16.5 มม. ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบอดีลีเท่ากับ 11 มม. Burstone และ Koenig²⁸ กล่าวว่า อัตราส่วน M/F สำหรับการเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชันแปรเปลี่ยนได้ ขึ้นกับความยาวรากและตำแหน่งที่ติดแบรคเกต สำหรับฟันหน้าและฟันเขี้ยวมักจะมีอัตราส่วน M/F มากกว่า 8 เสมอ



รูปที่ 1 ผลของการให้แรงในแนวราบเพียงอย่างเดียวที่แบรคเกตของฟันเขี้ยว⁵

ตารางที่ 1 ความยาวของตัวฟันและรากฟันเขี้ยวที่สั้น (s), ยาวปานกลาง (a), ยาว (l)²⁶

	Crown length (mm)	Root length (mm)	Bracket-CR distance (mm)
<i>Tooth lengths for maxillary canines</i>			
s	8	11	8
a	9.5	16.5	11
l	12	20.5	14.5
<i>Tooth lengths for mandibular canines</i>			
s	8	11.5	8
a	10	15	11
l	12	20.5	14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 อัตราส่วน M/F ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนฟันแบบ
ทรานสเลชันสำหรับฟันแต่ละซี่ เมื่อไม่มีการละลายของสันกระดูก
เบ้าฟัน¹

TOOTH	Bracket-Center of Resistance Distance (mm)	Inclination to Ocular Plane (°)	M/F for Translation (mm)
Maxillary			
1	9.6	59.0	8.2
2	8.6	63.0	7.7
3	9.7	78.6	9.4
4	8.6	86.1	8.6
5	8.6	88.8	8.6
6	8.5	83.5	8.4
7	7.6	92.2	7.6
Mandibular			
1	8.0	71.0	7.6
2	8.9	71.0	8.4
3	10.3	84.0	10.2
4	8.6	87.8	8.6
5	8.6	84.2	8.6
6	8.5	80.5	8.4
7	7.6	68.6	7.1

ตารางที่ 3 อัตราส่วน M/F ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนฟัน
แบบทรานสเลชัน สำหรับฟันแต่ละกลุ่ม เมื่อไม่มีการละลาย
ของสันกระดูกเบ้าฟัน¹

M/F FOR TRANSLATION			
<u>21 12</u>	8.0	8.8	<u>653 356</u>
		8.8	<u>6543 3456</u>
		8.6	<u>76543 34567</u>
<u>321 123</u>	8.4	8.5	<u>65 56</u>
		8.2	<u>765 567</u>
<u>21 12</u>	8.0	9.1	<u>653 356</u>
		9.0	<u>6543 3456</u>
		8.6	<u>76543 34567</u>
<u>321 123</u>	8.8	8.5	<u>65 56</u>
		8.2	<u>765 567</u>

แรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

ในการจำแนกประเภทของแรงทางทันตกรรมจัดฟัน ทันตแพทย์จัดฟันมักจะคุ้นเคยกับคำว่าแรงน้อย แรงที่เหมาะสมและแรงมาก แต่ความหมายของมันยังไม่กระจ่างชัด จากเหตุผลต่างๆ มากมายรวมทั้งความแตกต่างกันของขนาดและจำนวนฟัน ทำให้ไม่สามารถระบุช่วงของขนาดแรงแต่ละชนิดได้ ดังนั้นขนาดของแรงที่เหมาะสมจึงยังคงเป็นคำถามในใจทันตแพทย์หลายๆ ท่าน²⁹

มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางทันตกรรมจัดฟันและการเคลื่อนฟันมากมาย Schwartz³⁰ กล่าวว่า แรงทางทันตกรรมจัดฟัน (orthodontic force) ไม่ควรมากกว่าความดันของหลอดเลือดฝอยของเอ็นยึดปริทันต์ Storey และ Smith³¹ เสนอแนวคิดว่า แรงที่เหมาะสม คือ แรงที่น้อยที่สุดที่ทำให้ฟันมีอัตราการเคลื่อนที่มากที่สุด ภายในข้อจำกัดของการตอบสนองทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามขนาดแรงที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนฟันแต่ละซี่เป็นเรื่องที่เข้าใจได้ยาก Quinn และ Yoshikawa³² ทบทวนและวิเคราะห์ทฤษฎีเกี่ยวกับแรงทางทันตกรรมจัดฟันและการเคลื่อนฟันจากแบบจำลองสมมติ (hypothetical model) สองแบบ แบบจำลองแรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนฟันและขนาดแรงว่าเป็นแบบเส้นตรง กล่าวคือ ยิ่งขนาดแรงมากขึ้นเท่าใด การเคลื่อนฟันก็จะมากขึ้นเท่านั้น ส่วนอีกแบบจำลองหนึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ในลักษณะจุดกระตุ้น (threshold) กล่าวคือ อัตราการเคลื่อนของฟันจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดแรงสูงขึ้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง การเพิ่มแรงให้มากขึ้นจะไม่ทำให้มีการเคลื่อนฟันมากขึ้น แต่ฟันจะเคลื่อนในอัตราคงที่ Nikolai²⁹ รวบรวมการศึกษาในอดีตและอธิบายถึงแรงที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันว่า เป็นแรงที่ทำให้เกิดการตอบสนองทางชีวภาพที่พึงประสงค์มากที่สุด โดยมีการทำลายเนื้อเยื่อน้อยที่สุด อันจะส่งผลให้มีการเคลื่อนฟันที่เร็วและผู้ป่วยรู้สึกไม่สบายเพียงเล็กน้อยหรือไม่รู้สึกเลย แรงในระดับที่มากกว่าแรงที่เหมาะสมสามารถนำไปสู่การละลายของรากฟัน การสูญเสียหลักยึด (loss of anchorage) และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน M/F ดังนั้นการกำหนดแรงที่สัมพันธ์กับการแอคทิเวตสปริงจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด

มีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงที่เหมาะสม Nikolai²⁹ กล่าวว่า ถ้าทฤษฎีแรงที่เหมาะสม (optimum force theory) เป็นจริง ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการหาขนาดแรงที่เหมาะสม คือ

1. พื้นผิวและรูปร่างของรากฟัน
2. ชนิดการเคลื่อนฟันที่ต้องการ เช่น การเคลื่อนฟันแบบบอดิลี
3. ระบบแรงทั้งขนาดและระยะเวลาที่ให้กับตัวฟัน (magnitude-time pattern of the crown force system) เช่น แรงแบบต่อเนื่อง และแรงแบบอินเทอร์มิทเทนท์ (intermittent)
4. การตอบสนองของเนื้อเยื่อในแต่ละบุคคล

สำหรับขนาดแรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยวนี้ มีผู้เสนอไว้หลายท่าน Smith และ Storey³³ แนะนำว่า แรงขนาด 150–200 กรัม เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนฟันเขี้ยวล่างแบบ

บอดิลีนมนุษย์ Reitan³⁴ สนับสนุนให้ใช้แรง 150 กรัม ส่วน Lee³⁵ แนะนำให้ใช้แรง 150-260 กรัม ในขณะที่ Ricketts³⁶ และคณะ แนะนำให้ใช้แรง 75 กรัม Boester และ Johnston³⁷ พบว่า แรงขนาด 5.8 และ 11 ออนซ์ ทำให้เกิดการเคลื่อนของฟันเขี้ยวบนและล่างในอัตราที่ไม่แตกต่างกัน

ข้อดีของการใช้ลวดในการดึงฟันเขี้ยว²¹

1. ไม่ต้องการติดแบรคเกตที่บริเวณฟันหน้าในช่วงแรกของการรักษา ทำให้ผู้ป่วยพึงพอใจในแง่ความสวยงาม
2. การดึงฟันเขี้ยวสามารถทำได้รวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันฟันหน้าที่ซ้อนจะมีการเรียงตัวโดยธรรมชาติ
3. ถ้ามีการใช้ด้านริมฝีปากของฟันหน้าล่างเป็นจุดอ้างอิง การดึงฟันเขี้ยวโดยวิธีนี้ จะทำให้ฟันหน้าล่างมีการเรียงตัวในตำแหน่งที่มีเสถียรภาพโดยไม่มีการยื่น (proclination)
4. เมื่อพิจารณาในแง่กลศาสตร์ แบรคเกตจะเคลื่อนไปพร้อมๆ กับลวด ทำให้ไม่มีความเสียดทานเกิดขึ้น

ข้อเสียของการใช้ลวดในการดึงฟันเขี้ยว²¹

1. มีการใช้ลวดเหล็กเพื่อควบคุมการเคลื่อนของฟัน แต่เมื่อมีการสร้างลวดเข้าไปเพื่อลดความแข็งแรงของลวด จะทำให้ความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนของรากฟันลดลง
2. มักจะต้องมีการปรับระดับด้วยลวดหลายเส้น ก่อนที่จะใส่ลวดเหล็ก
3. หลังจากดึงฟันเขี้ยวแล้วจะมีช่องว่างสำหรับการเรียงตัวของฟันหน้า จากนั้นจึงจะติดแบรคเกตและปรับระดับฟันหน้า
4. การติดเครื่องมือที่ฟันหน้าในภายหลัง ทำให้มีภาวะสบเปิดซ้ำ และมีเวลาสำหรับการคงสภาพฟันหน้าที่ได้รับการแก้ไขฟันหมุนสั้นลง
5. หลักยึดจะได้จากฟันกรามเป็นส่วนใหญ่ แต่บางครั้งจะต้องเสริมแรงด้วยเฮดเกียร์ (headgear) และทรานส์พาลาโทลอาร์ช (transpalatal arch)

หลักการออกแบบสปริงที่ใช้ในการดึงฟันเขี้ยว

1. มีความแข็งแรงและความเป็นสปริง (springiness) เพียงพอ

ขนาดลวดที่เลือกมาต้องใหญ่พอที่จะไม่เสียรูปอย่างถาวรขณะใช้งาน ความเป็นสปริงจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันกำลังสามของการเพิ่มความยาวของเส้นลวด ในขณะที่ความแข็งแรงจะลดลงเป็นอัตราส่วน โดยตรงกับความยาวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรเพิ่มความแข็งแรงของลวดโดยการเลือกขนาดลวดก่อนข้างใหญ่ และเพิ่มความแข็งแรงของลวด โดยการเพิ่มความยาวลวด ในทางปฏิบัติ

เพิ่มความยาวมักจะหมายถึงการทำเฮลิคซ์ ซึ่งในขณะที่เดียวกันต้องสามารถอยู่ในพื้นที่ภายในช่องปากที่จำกัดได้ด้วย²⁰

2. ควรออกแบบให้ง่ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

รูปแบบของลูปที่ซับซ้อนทำให้เสียเวลาในการตัดมาก และมีแนวโน้มที่จะแตกหักหรือบิดเบี้ยวได้ง่ายขึ้นเมื่อนำไปใช้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อของผู้ป่วยอีกด้วย²⁰

3. ลูปควรมีลักษณะเฟลเซฟ (fail safe)

หมายถึง ลูปที่เมื่อแอกทิเวทแล้วฟันจะหยุดเคลื่อนหลังจากได้ระยะทางตามที่ทันตแพทย์กำหนดไว้ ดังนั้นถ้าผู้ป่วยไม่กลับมาพบทันตแพทย์ตามนัดก็ไม่เกิดความเสียหายขึ้น การแอกทิเวทลูปที่มีความหยุ่นตัว (flexibility) สูงเกินไปเป็นระยะทางมากอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ ในกรณีที่สปริงบิดเบี้ยวพร้อมๆ กับผู้ป่วยไม่มาตามนัดติดต่อกันหลายครั้ง ดังนั้นการออกแบบลูปในอุดมคติจึงควรออกแบบให้ลูปสามารถให้แรงต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนฟันในอัตราประมาณ 1 มม. ต่อเดือน แต่รวมกันแล้วไม่เกิน 2 มม. ถ้าผู้ป่วยผิคนัดติดต่อกัน 2 เดือน ฟันจะไม่เคลื่อน²⁰

4. มีอัตราไหลด-ดีเฟลคชันที่เหมาะสม

การตอบสนองทางชีวภาพที่เหมาะสม (optimizing biologic response) ไม่เพียงแต่จะขึ้นกับขนาดของแรงเริ่มแรก (initial force magnitude) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กัอัตราการลดลงของแรง (rate of decay of force) ในระหว่างการแอกทิเวทแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงควรออกแบบสปริงให้สามารถส่งแรงได้ภายในขอบเขตเชิงสรีระ (physiologic range)⁵

ลูปที่มีค่า K พอเหมาะจะมีอัตราการลดลงของแรงก็จะช้ากว่าลูปที่มีค่า K สูง ดังนั้นช่วงระยะเวลาระหว่างการแอกทิเวทแต่ละครั้งยาวนานขึ้น และลูปจะให้แรงและโมเมนต์ที่มีขนาดลดลงด้วย การใช้ลูปที่มีค่า K สูงจะไม่สามารถควบคุมระยะเวลาการแอกทิเวทได้ เช่น ลูปมีค่า K = 500 กรัม/มม. ต้องแอกทิเวทเพียง 0.2-0.4 มม. เพื่อที่จะได้แรงที่เหมาะสมในการดึงฟันเขี้ยวประมาณ 100-200 กรัม ระยะเวลาแอกทิเวทเพียงเล็กน้อยนี้ ไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ลูปที่ให้ค่า K ต่ำกว่านี้

ปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราไหลด-ดีเฟลคชัน คือ

1. ชนิดของลวด

ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ออกมามากทำให้การออกแบบเครื่องมือดีขึ้น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นลวดที่ใช้กันมานานแล้ว และมีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการพันลวดเป็นเกลียว (multi-stranded wire) ซึ่งทำให้มีความหยุ่นตัวสูงกว่าและอัตราไหลด-ดีเฟลคชันต่ำกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีลวดชนิดอื่นที่พัฒนาขึ้นในภายหลัง เช่น นิกเกิลไทเทเนียม (Niti), เบตาไทเทเนียม (beta titanium) และโครเมียมโคบอลต์ (Cr-Co) ชนิดลวดเหล่านี้มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ และมีค่าสปริงแบค (springback) สูง¹⁶

2. ขนาดลวด

อัตราไหลค-ดีเฟลคชันของลวดกลมจะแปรผันตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางลวดยกกำลังสี่ ($K \propto d^4$) ส่วนลวดเหลี่ยมจะแปรผันตรงกับความสูงของลวดในทิศการดัดยกกำลังสาม ($K \propto h^3$) ดังนั้นการลดหน้าตัดขวาง (cross-section) ของลวดสามารถลดอัตราไหลค-ดีเฟลคชันได้มาก ข้อจำกัดในการลดหน้าตัดขวางของลวด คือ ความแข็งแรงยืดหยุ่นสูงสุด (maximal elastic strength) กล่าวคือ ลวดควรมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถป้องกันการเสียรูปอย่างถาวรจากการบิดเบี้ยว ดังนั้นการออกแบบสปริงจึงควรเลือกลวดซึ่งมีหน้าตัดขวางเล็กที่สุดที่สามารถป้องกันการเสียรูปอย่างถาวรได้¹⁶

3. ความยาวลวด

สำหรับซิมเปิลแคนทีลิวอร์ (simple cantilever) อัตราไหลค-ดีเฟลคชันจะแปรผกผันกับความยาวลวดยกกำลังสาม ($K \propto 1/L^3$) ดังนั้นการเพิ่มความยาวลวดเพียงเล็กน้อยจะมีผลในการลดอัตราไหลค-ดีเฟลคชันอย่างมาก เป็นผลให้เกิดแรงในขนาดและทิศทางซึ่งคงที่กว่าทิศทางแรงซึ่งคงที่นี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมของทิศทางแรงน้อยนั่นเอง¹⁶

Burstone และ Koenig²⁸ ศึกษาอิทธิพลของการออกแบบสปริงต่ออัตราส่วน M/F รวมทั้งอัตราไหลค-ดีเฟลคชันพบว่า การเพิ่มความยาวลวดในแนวราบของลูปส่วนใกล้เชิง็อก (รูปที่ 2) และการเพิ่มจำนวนรอบของเฮลิกซ์ทำให้อัตราไหลค-ดีเฟลคชันลดลงอย่างมาก แต่อัตราส่วน M/F เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 4) นอกจากนี้การเพิ่มความสูงของลูปยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราไหลค-ดีเฟลคชันลดลงอีกด้วย อัตราไหลค-ดีเฟลคชันต่ำทำให้มั่นใจว่าเอ็นยึดปริทันต์มีความตึงคงที่ (constant tension) ตลอดระยะเวลาการแอกทีเวทสปริง⁷

4. การตัดลูปรูปแบบต่างๆ

การตัดลูปสามารถลดอัตราไหลค-ดีเฟลคชันเนื่องจากลวดมีความยาวเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถแอกทีเวทได้ระยะทางมากขึ้นเมื่อใช้แรงขนาดเท่าเดิม ผู้วิจัยหลายท่านศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราไหลค-ดีเฟลคชัน Chaconas, Caputo และ Hayashi³⁸ ศึกษาผลของขนาดลวด รูปแบบของลูป และมุมเกเบิลต่อแรงที่ใช้ในการแอกทีเวทสปริงซึ่งมีลูป 4 แบบ คือ squashed loop, closed vertical loop, closed vertical loop with helix และ closed vertical loop with double helix ซึ่งทำจากลวด unheat-treated blue Elgiloy ขนาด 0.016x0.016 นิ้ว, 0.016x0.022 นิ้ว, 0.017x0.022 นิ้ว และ 0.017x0.025 นิ้ว (ตารางที่ 5) ผลการทดลองพบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อแรงที่ใช้ในการแอกทีเวทสปริง กล่าวคือ

1 ขนาดของลวด

ลวดขนาดใหญ่ใช้แรงในการแอกทีเวทมากกว่า (รูปที่ 3)

2 รูปร่างของลูป

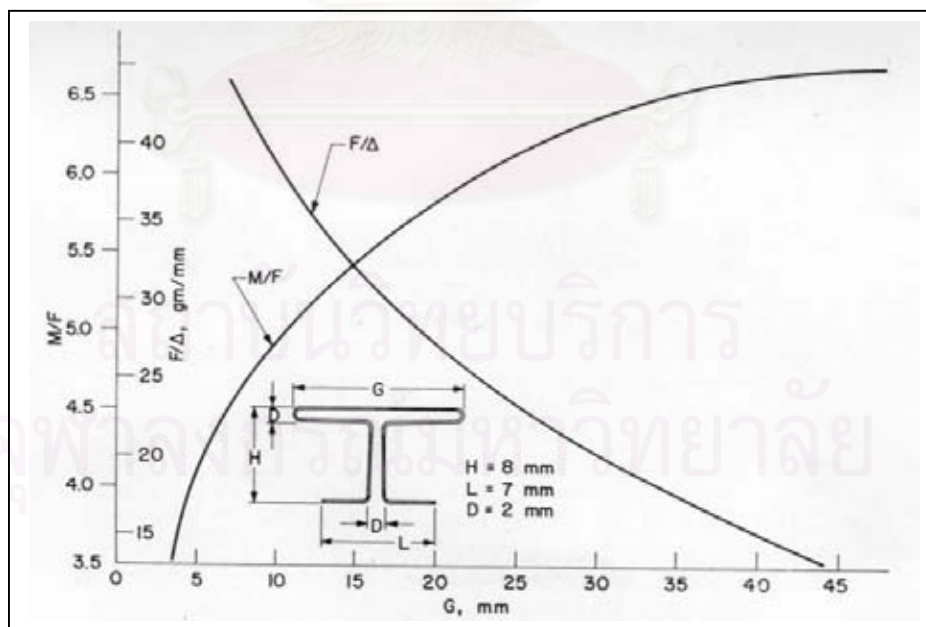
รูปร่างลูปที่ต้องใช้แรงในการแอกทีเวทจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด
คือ squashed loop > closed vertical loop > closed vertical loop with helix > closed
vertical loop with double helix (รูปที่ 4)

3. มุมเกเบิล

- เมื่อมุมเกเบิลของ squashed loop และ closed vertical loop with double helix เพิ่มขึ้น จะใช้แรงในการแอกทีเวทเพิ่มขึ้น
- เมื่อมุมเกเบิลของ closed vertical loop เพิ่มขึ้น จะใช้แรงในการแอกทีเวทลดลง
- เมื่อมุมเกเบิลของ closed vertical loop with helix เปลี่ยนแปลงแรงในการแอกทีเวทจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

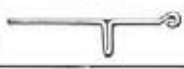
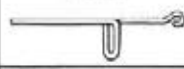
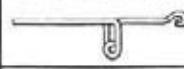

ตารางที่ 4 อัตราส่วน M/F และอัตราโหลด-ดีเฟลชันที่เปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มจำนวนรอบของเฮลิคซ์ใน vertical loop ขนาด 0.010x0.020 นิ้ว²⁸

No. of turns in the helix of 8 mm. vertical loop	M/F	F/Δ (Gm./mm.)
0	3.3	75.0
1	3.9	61.5
5	4.2	46.0
10	3.9	35.5

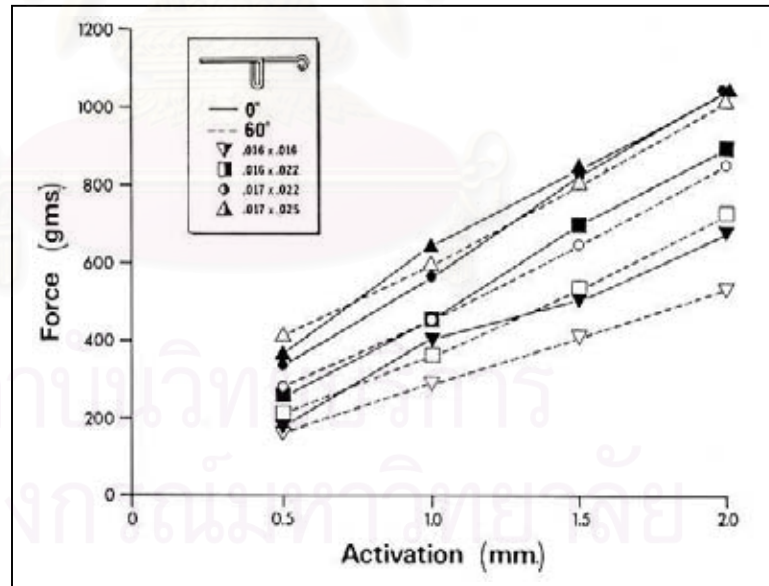


รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน M/F และความยาวลวดในแนวราบของลูปส่วนใกล้หนึ่งข้อ การเพิ่มความยาวลวดดังกล่าว ทำให้อัตราส่วน M/F เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ทำให้อัตราโหลด-ดีเฟลชันลดลงมาก²⁸

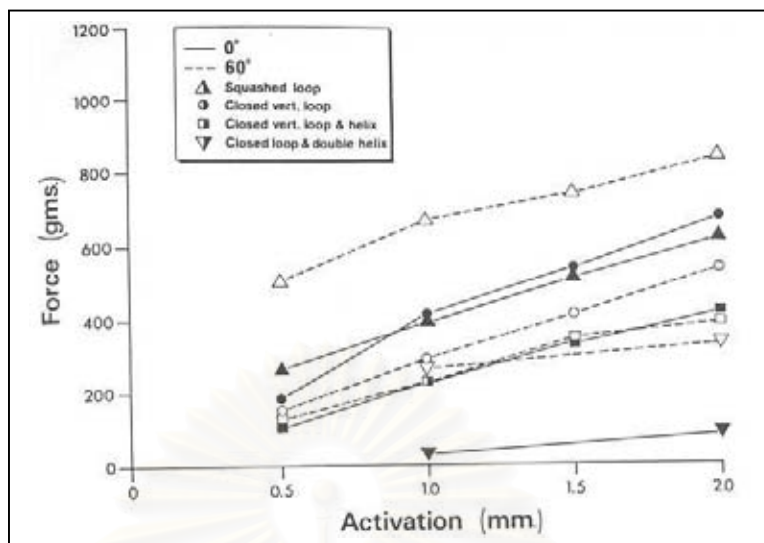
ตารางที่ 5 โคลงเชิงรูปที่ใช้ดึงฟันเขี้ยวแบบต่างๆ³⁸

	SQUASHED LOOP	CLOSED VERT LOOP	CLOSED VERT LOOP with HELIX	CLOSED LOOP DOUBLE HELIX
WIRE SIZE				
.016 x .016	*	*	*	*
.016 x .022	*	*	*	▲
.017 x .022	*	*	*	▲
.017 x .025	*	*	*	▲
GABLE ANGLE				
0°	*	*	*	*
30°	*	*	*	*
45°	▲	▲	*	*
60°	*	*	*	*

* ทดลอง
▲ ไม่ได้ทดลอง



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะแอกทีวาทของ closed vertical loop เมื่อขนาดลวดและมุมเกเบิลต่างกัน³⁸



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะแอกทิเวท เมื่อรูปแบบของลูปและมุมเกบิลต่างกัน (0.016x0.016 นิ้ว blue Elgiloy)³⁸

5. มีอัตราส่วน M/F ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการเคลื่อนฟันในลักษณะที่ต้องการ

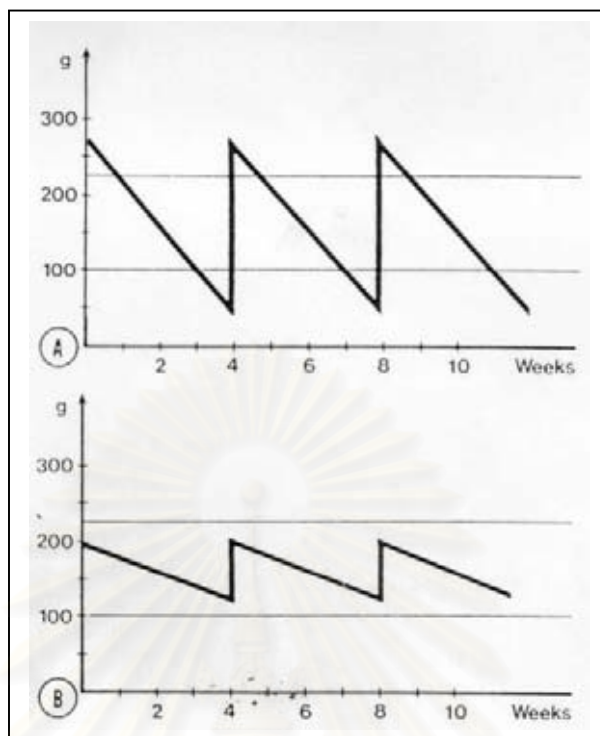
ในทางทฤษฎีสามารถปรับขนาดของโมเมนต์จนทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลีทั้งในแนวหน้า-หลังและแนวราบได้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการสั่นเอียงและการหมุนของฟันนั้นมีความซับซ้อนและมีปัจจัยอื่นๆ มาเกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความต้านทานที่แน่นอน ตำแหน่งของจุดนี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของฟัน ระดับสันกระดูกเบ้าฟัน (marginal bone) คุณสมบัตินของอวัยวะปริทันต์ที่รองรับ และการวางตำแหน่งแบรคเกต¹⁸

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราส่วน M/F จะได้กล่าวถึงต่อไป

6. ให้แรงคงที่และอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ถ้าทันตแพทย์จัดฟันยอมรับว่า การเคลื่อนฟันจะดีที่สุดเมื่อเคลื่อนฟันด้วยแรงซึ่งคงที่และอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ก็ควรออกแบบอุปกรณ์ให้แรงที่มีอัตราโพลด-ดีเฟลคชันต่ำเพื่อทำให้แรงนั้นคงที่ รวมทั้งมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง (high elastic maximal strength) เพื่อที่เมื่อสปริงให้แรงจนได้ขนาดที่ต้องการแล้ว จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร¹⁶

รูปที่ 5 แสดงขนาดแรงในระหว่างการรักษา เมื่อแอกทิเวทสปริงสำหรับดึงฟัน 2 ชนิด ทุกๆ 4 สัปดาห์ ความชันของกราฟแสดงอัตราโพลด-ดีเฟลคชันขึ้นอยู่กับชนิดของอัลลอย ขนาดเส้นลวด ความยาวของเส้นลวดและการออกแบบลูป⁵



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงและเวลา เมื่อแอคทีเวทสปริงที่มีอัตราโหลด-ดีเฟลคชันสูง (A) และ ต่ำ (B) ทุกๆ 4 สัปดาห์⁵

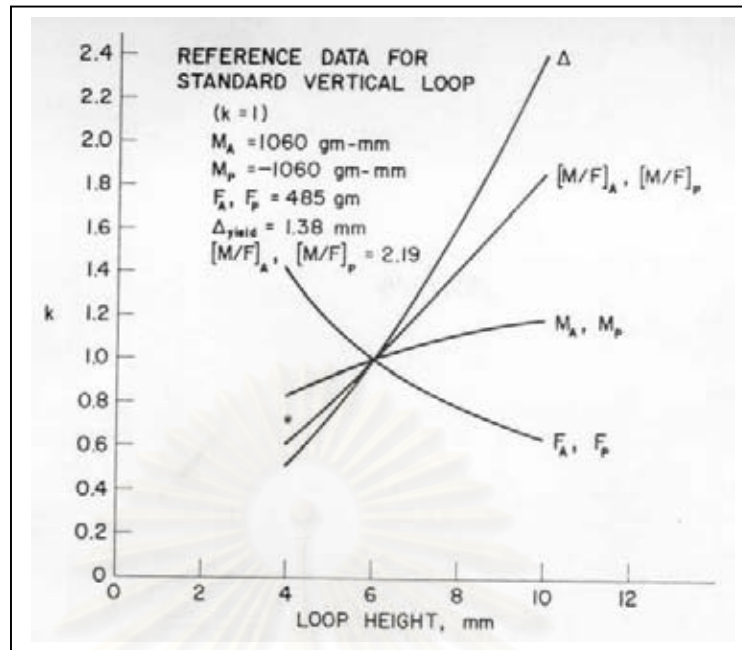
ขั้นตอนในการออกแบบลูปที่เหมาะสม¹⁶

1. กำหนดจุดศูนย์กลางการหมุนและชนิดของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ
2. กำหนดอัตราส่วน M/F เพื่อให้ได้ชนิดของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ
3. พิจารณาว่าลูปรูปร่างใดที่สามารถให้ระบบแรงที่เหมาะสม
4. กำหนดรูปร่างสุดท้ายของลูป
5. ตัดลูปและใส่พรีแอคทีเวชันเบนด์ (preactivation bend)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงของลูป

1. การเพิ่มความสูงของลูปในแนวบดเคี้ยว-เหวี่ยง

ลูปที่สูง ยังมีอัตราส่วน M/F มาก (รูปที่ 6) และทำให้สามารถควบคุมปลายรอกฟันไม่ให้เคลื่อนไปข้างหน้าในระหว่างการดึงฟัน^{5,28}



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ vertical loop และ k (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่าต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.)²⁸

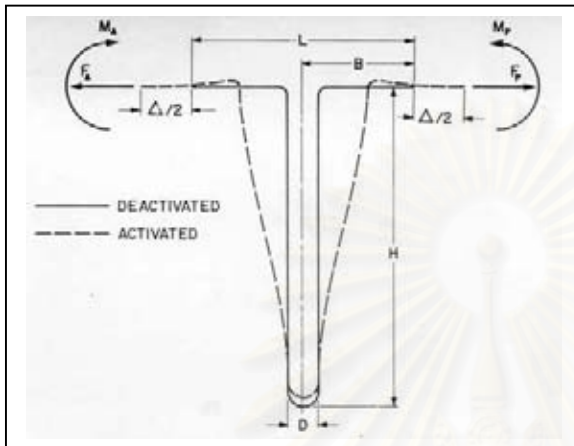
2. การลดความยาวในแนวราบของลูปในส่วนใกล้ด้านบดเคี้ยว^{5, 28}
3. การเพิ่มความยาวในแนวราบของลูปในส่วนใกล้เหวี่ยง

รูปที่ 2 เป็นกราฟอัตราส่วน M/F และอัตราไหลด-ดีเฟลคชันของ T-loop สูง 8 มม. การเพิ่มความยาวในแนวราบของลูปในส่วนใกล้เหวี่ยงมีอิทธิพลต่ออัตราไหลด-ดีเฟลคชันมากกว่าอัตราส่วน M/F ^{5, 28}

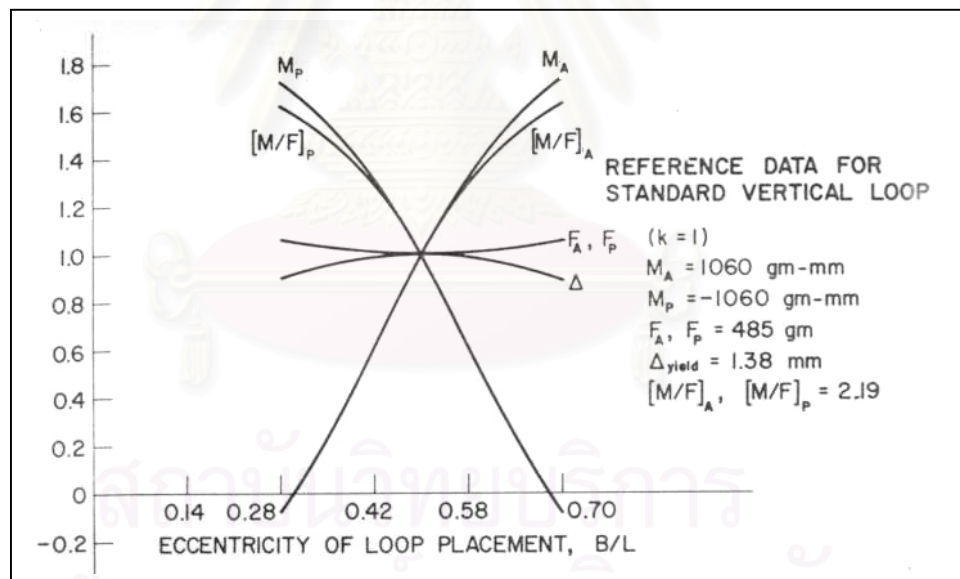
4. การวางตำแหน่งของลูปในแนวหน้า-หลังใกล้ฟันซี่ที่ต้องการให้มีอัตราส่วน M/F สูง^{16, 28}

การวางลูปในตำแหน่งดังกล่าวแม้จะทำให้ฟันที่อยู่ใกล้ลูปมีอัตราส่วน M/F สูง แต่จะมีผลข้างเคียง คือ มีการยื่นยาวของฟันเนื่องจากแรงในแนวตั้ง (vertical force) จากรูปที่ 7 ระยะเวลา B คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของลูปและปลายด้านไกลกลางของลวด ส่วนระยะ L คือ ความยาวในแนวราบทั้งหมดของลูปซึ่งวัดจากปลายด้านใกล้กลางและไกลกลาง ดังนั้นอัตราส่วน B/L จะแสดงการวางตำแหน่งลูปว่าอยู่ใกล้ฟันทางด้านใด เช่น ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก แสดงว่าลูปวางไว้ใกล้แบรคเกตของฟันเขี้ยว รูปที่ 8 เป็นกราฟระหว่างอัตราส่วน B/L และค่าคงที่ K ของ vertical loop ซึ่งตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.16 นิ้ว และมีความแข็งแรงยืด (yield strength) 400,000 psi M_A และ M_P คือ โมเมนต์ที่ส่วนหน้าและส่วนหลังของสปริงตามลำดับ F_A และ F_P คือ แรงในแนวราบที่ส่วนหน้าและส่วนหลังของสปริง ถ้าค่าอัตราส่วน B/L เท่ากับ 0.5 หมายถึง ลูปวางอยู่กึ่งกลาง

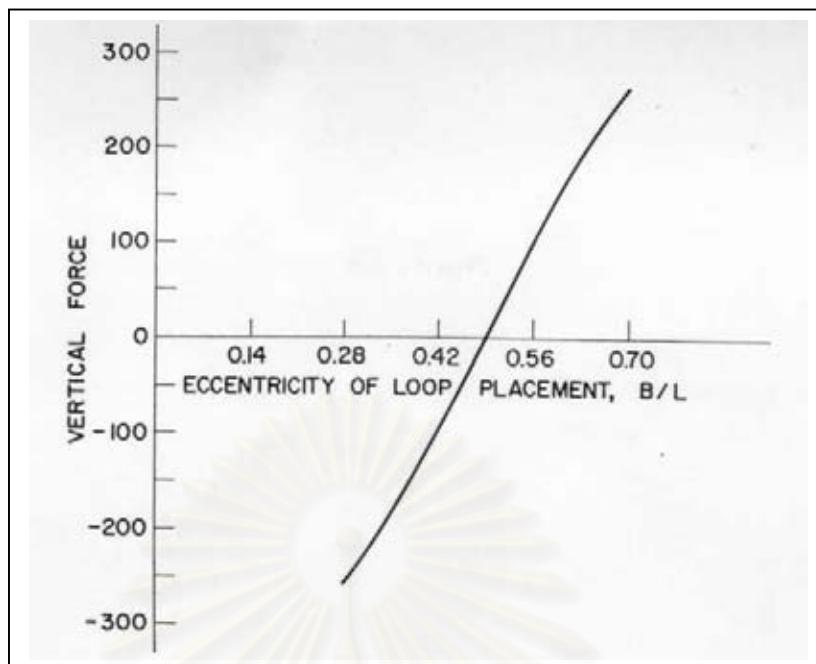
ระหว่างพินเขี้ยวและพินกรามน้อยซึ่งที่สอง อัตราส่วน M/F ที่ส่วนหน้าและส่วนหลังจะมีค่าเท่ากัน ถ้าวางรูปโดยไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง อัตราส่วน M/F จะเปลี่ยนไป²⁸ ดังนั้นในการดัดพินเขี้ยว จะวางรูปไว้ใกล้พินเขี้ยว เพื่อให้มีอัตราส่วน M/F สูงและสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายรากฟันได้ดี แต่จะมีแรงในแนวตั้งซึ่งทำให้พินเขี้ยวยื่นยาว²¹ (รูปที่ 9)



รูปที่ 7 สัญลักษณ์แทนส่วนต่างๆ ของ T-loop²⁸



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ vertical loop ในแนวหน้า-หลัง และ k (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่าต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.)²⁸



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ vertical loop ในแนวหน้า-หลังและแรงในแนวตั้ง เมื่อลูปมีตำแหน่งใกล้พื้นเขี้ยวมากขึ้น แรงในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น²⁸

5. การทำเกเบิลเป็นดัดที่ขาด้านใกล้กลางและไกลกลางของสปริง^{28,39}

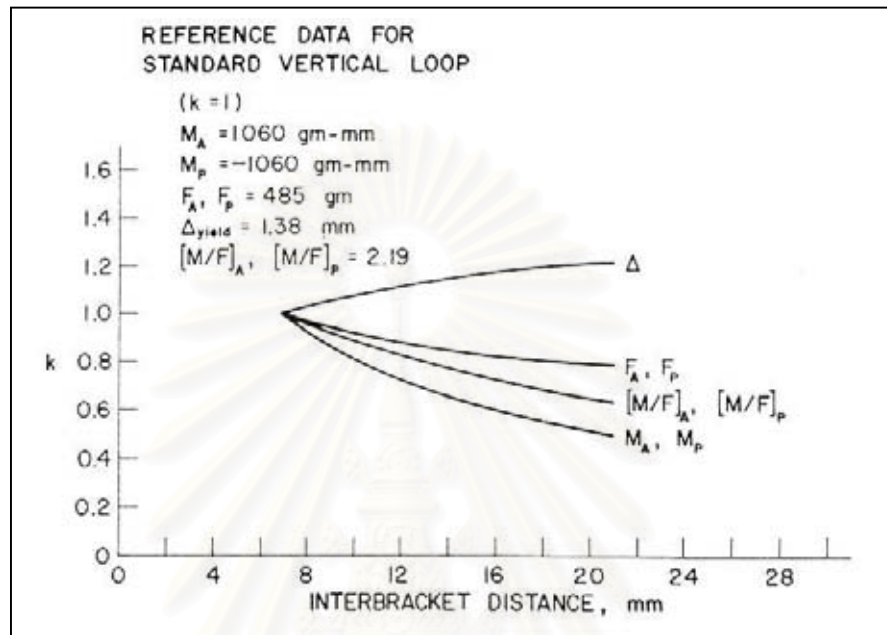
เมื่อแอกทิเวตสปริงดึงพื้นเขี้ยวที่ไม่ได้ทำเกเบิลเป็นดัดจะมีแรงและโมเมนต์เกิดขึ้นโดยอัตราส่วน M/F นี้จะคงที่ตลอดระยะยืดหยุ่นของการแอกทิเวตสปริง (elastic range of activation of the spring)²⁸ ถ้าอัตราส่วน M/F ไม่คงที่ การกระจายความเค้นบนเอ็นยึดปริทันต์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วเมื่อฟันเคลื่อนเป็นวงจรถ้าจากการเคลื่อนที่ของตัวฟัน ไปสู่ทรานสเลชันและการเคลื่อนที่ของรากฟัน การเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชันนั้น ฟันจะสามารถรับแรงได้ดีที่สุดเนื่องจากการกระจายแรงไปยังเอ็นยึดปริทันต์ทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอ²⁰ ดังนั้นควรออกแบบสปริงที่ให้อัตราส่วน M/F สูงโดยไม่มีการทำเกเบิลเป็นดัดที่ขาด้านใกล้กลางและไกลกลางของสปริง

เนื่องจากขีดจำกัดในช่องปากจึงทำให้ไม่สามารถดัดสปริงให้มีความสูงมากพอที่จะทำให้อัตราส่วน M/F เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนฟันแบบทรานสเลชัน อีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นไปได้คือการทำเกเบิลเป็นดัด กรณีที่สปริงนั้นมีอัตราโหลด-ดีเฟลคชันสูง อัตราส่วน M/F จะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วแม้จะมีการแอกทิเวตเป็นระยะทางเพียงเล็กน้อย ดังนั้นถ้าต้องทำเกเบิลเป็นดัด ควรจะออกแบบสปริงให้มีความโหลด-ดีเฟลคชันต่ำ เพื่อให้ได้อัตราส่วน M/F ซึ่งคงที่²⁸

6. การลดระยะระหว่างแบรคเกต (interbracket distance)^{5, 28}

โดยปกติแล้วความยาวในแนวราบของลูปจะถูกกำหนดด้วยระยะระหว่างแบรคเกต รูปที่ 10 เป็นตัวอย่างเดียวกับรูปที่ 8 เมื่อให้ตัวแปรต่างๆ ของลูปคงที่ และแปรเปลี่ยนเฉพาะ

ความยาวของลูปในแนวราบจะพบว่า เมื่อความยาวลดลง อัตราส่วน M/F จะเพิ่มขึ้น ความยาวของลูปในแนวราบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของลูป แต่การเปลี่ยนแปลงความสูงของลูปจะมีอิทธิพลต่ออัตราส่วน M/F มากกว่า²⁰



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างแบรเกตและ k ของ vertical loop (k คือ ค่าคงที่ซึ่งต้องนำไปคูณกับค่าต่างๆ ของ standard vertical loop สูง 6 มม.)²⁸

7. การทำเฮลิคซ์^{5,28}

การเพิ่มความสูงของสปริงในแนวตั้งถูกจำกัดด้วยลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ ดังนั้นจึงอาจเพิ่มความยาวลวดโดยการตัดเฮลิคซ์เป็นจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราส่วน M/F ได้เช่นกัน⁵ แต่อย่างไรก็ตาม การทำเฮลิคซ์จะมีผลต่อการลดอัตราโพลด-ดีเฟลคชันเป็นส่วนใหญ่ ตารางที่ 4 แสดงค่าอัตราส่วน M/F และอัตราโพลด-ดีเฟลคชันของ vertical loop สูง 8 มม. ที่มีจำนวนรอบของเฮลิคซ์แตกต่างกันพบว่า เมื่อจำนวนรอบของเฮลิคซ์เพิ่มขึ้น อัตราส่วน M/F ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะทำให้อัตราโพลด-ดีเฟลคชันลดลงอย่างมาก²⁸

บทที่ 3

ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน

ในปี ค.ศ. 1879 Alberto Castigliano ซึ่งเป็นวิศวกรงานรางรถไฟ ได้ตีพิมพ์หนังสือเกี่ยวกับวิธีการหาการขจัด ชิงเส้น (linear displacement) และเชิงมุม (angular displacement) ณ จุดใดๆ ในวัตถุ วิธีดังกล่าวนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อว่า ทฤษฎีบทที่ 2 ของคาสติกลีอาโน (Castigliano's second theorem) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัตถุที่มีอุณหภูมิคงที่ และเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น ทฤษฎีบทที่ 2 นี้กล่าวไว้ว่า^{40, 41}

“อนุพันธ์บางส่วน (partial derivative) ของพลังงานความเครียดทั้งหมด (total strain energy) ที่ถูกเก็บอยู่ในตัววัตถุยืดหยุ่นเชิงเส้น เทียบกับแรง (โมเมนต์) ภายนอกที่มากระทำใดๆ จะมีค่าเท่ากับ การขจัดเชิงเส้น (เชิงมุม) ณ จุดที่แรง (โมเมนต์) นั้นมากระทำ และมีทิศทางตามทิศทางของแรง (โมเมนต์)”

ในทางคณิตศาสตร์จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\delta_n = \frac{\partial U}{\partial P_n} \quad (1)$$

โดยที่

U คือ พลังงานความเครียดทั้งหมดที่เก็บอยู่ในตัววัตถุยืดหยุ่นและ

ถ้า P_n แทนแรง δ_n จะเป็นการขจัดเชิงเส้น

ถ้า P_n แทน โมเมนต์หรือแรงคู่ควบ (couple) δ_n จะเป็นการขจัดเชิงมุม

ในการนำทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับ โคลสซิงรูปเพื่อเคลื่อนพื้น มีข้อสมมติฐานเพิ่มเติมดังต่อไปนี้:-

1. ให้ลวดเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้น
2. เมื่อแอกทิเวทรูปแล้ว วัสดุยังคงอยู่ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้น
3. ให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวดจากการแอกทิเวทมีไม่มาก
4. ให้ลวดทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน
5. ให้ความยาวของปลายขานแนวระดับของลวดทั้งสองด้านเท่ากัน
6. ให้ปลายขานของลวดทั้งสองด้านมีมุมเกเบิลเท่ากัน

พลังงานความเครียด

โดยปกติเมื่อวัตถุยืดหยุ่นได้รับแรงใดๆ มากระทำ จะเกิดการยุบตัวและบิดตัวขึ้น งานทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุดังกล่าวจะถูกเก็บเอาไว้ในตัววัตถุในรูปแบบของพลังงานความเครียด ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่น (elastic limit) ของวัตถุ และถ้าค่อยๆ เอาแรงที่กระทำอยู่ออก วัตถุยืดหยุ่นนั้นก็กลับมามีขนาดเท่าเดิมได้อีก โดยทั่วไปพลังงานความเครียดประกอบด้วยพลังงานสามส่วน คือ

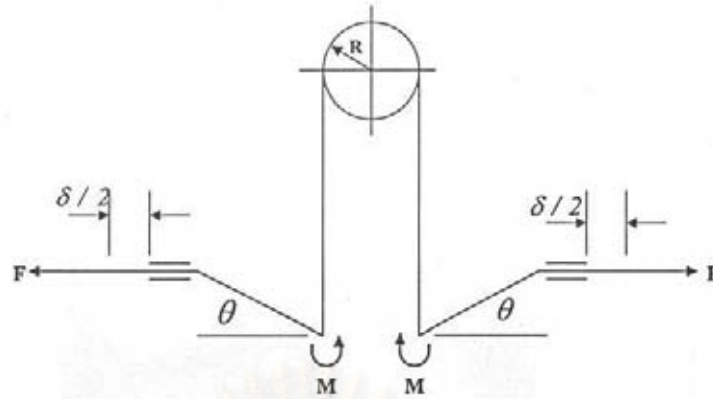
- พลังงานความเครียดเนื่องจากแรงดึงหรือแรงกด
- พลังงานความเครียดเนื่องจากแรงบิด (torque)
- พลังงานความเครียดเนื่องจากการดัด (bending)

สำหรับโคลสซิงกูล์ที่ใช้ในการดิ่งพื้น ส่วนใหญ่แรงที่กระทำจะอยู่ในระนาบเดียว และมีการดัดเป็นตัวหลักของการทำให้โคลสซิงกูล์เปลี่ยนรูปร่างเพื่อใช้ในการดิ่งพื้น ฉะนั้นจึงไม่มีพลังงานความเครียดเนื่องมาจากแรงบิด และสมมติให้พลังงานความเครียดอันเนื่องมาจากแรงดึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจากการดัด ซึ่งไม่ทำให้ค่าของ M/F เปลี่ยนไป ดังนั้นพลังงานความเครียดทั้งหมดของโคลสซิงกูล์ จึงสามารถประมาณได้ด้วยสมการดังนี้

$$U = \frac{1}{2} \sum_i \int \frac{M_i^2 ds}{EI} \quad (2)$$

โดยที่

Σ	แทนผลรวมของแต่ละส่วนพื้นฐานของโคลสซิงกูล์
M_i	แทนโมเมนต์ดัดในแต่ละส่วนพื้นฐานของโคลสซิงกูล์
E	แทนโมดูลัสของ Young ของลวดที่ใช้ดัดโคลสซิงกูล์
I	แทนโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (moment of inertia of area) ของเส้นลวด
ds	แทนชิ้นเล็กๆ (element) ของความยาวของเส้นลวดของโคลสซิงกูล์



รูปที่ 11 โคลสซิงรูปรับแรง F และโมเมนต์คัต M พร้อมมุมเกเบิล

จากทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน ตามสมการที่ (1) และพิจารณา vertical helical loop ตามรูปที่ 11 ประกอบ จะได้ว่า

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial F} \left[\sum_i \int \frac{M_i^2 ds}{EI} \right] \quad (3)$$

และ

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial M} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial M} \left[\sum_i \int \frac{M_i^2 ds}{EI} \right] \quad (4)$$

เนื่องจากปัญหาที่พิจารณาเป็นปัญหาเชิงเส้น (linear problem) และ โคลสซิงรูปแต่ละส่วนเป็นเส้นลวดที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงสามารถที่จะสลับการกระทำระหว่างการอินทิเกรต (integrate) และ partial derivative ในสมการที่ (3) และ (4) ได้ ซึ่งการทำ partial derivative ก่อนจะช่วยลดความซับซ้อนในการอินทิเกรตค่า M^2 ไปตามความยาวของเส้นลวดลงได้

สมการที่ (3) จะให้ค่า F/δ หรือทางวิศวกรรมศาสตร์จะเรียกว่า ค่าความแข็งตึง K ของลูป ซึ่งทำหน้าที่เช่นเดียวกับความแข็งตึงของสปริง ค่าความแข็งตึง K นี้มีความสำคัญมากในการออกแบบรูปร่างของโคลสซิงรูป ถ้าค่า K สูงเกินไป แรงที่ใช้ในการแอคทิเวตเส้นลวดแต่ละครั้งจะสูงมาก ซึ่งอาจจะทำให้อวัยวะปริทันต์ของผู้ป่วยบาดเจ็บหรือผู้ป่วยมีความไม่สบายมาก นอกจากนี้ฟันเคลื่อนที่เข้ามาเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้แรงที่แอคทิเวตลดลงอย่างรวดเร็ว จนต้องทำการแอคทิเวตบ่อยๆ สำหรับมุม θ นี้ คือ มุมเกเบิลที่ต้องการคัตขาของลูปเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วน M/F ตามที่ต้องการนั่นเอง อัตราส่วน M/F หาได้โดยการใช้สมการที่ (4)

บทที่ 4

การหาสูตร M/F และความแข็งตึงของโคลสซิงดูป

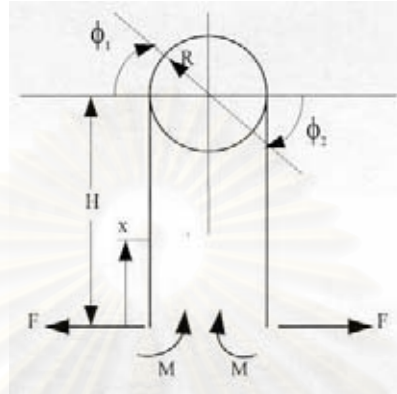
ก่อนอื่นจะต้องเข้าใจถึงความสำคัญที่ว่า จุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันจะแปรตามรูปร่าง ขนาด และจำนวนรากฟัน การกระจายน้ำหนัก และเนื้อเยื่อที่รองรับ เช่น ความสูงของกระดูกเข้าฟัน ปริมาณทิปปิง (tipping) ที่เกิดขึ้น ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับแรงที่ใช้ในการดึงดูปเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ ลักษณะกายวิภาคของฟันและส่วนที่อยู่ล้อมรอบฟันด้วย ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าทำไมการทรานสเลท ฟันเพื่อปิดช่องว่างในคนไข้ผู้ใหญ่ที่มีประวัติการละลายของกระดูกโดยทั่วไป (generalized bone loss) จึงทำได้ยาก เมื่อระยะทางจากแบรคเกตไปยังจุดศูนย์กลางความต้านทานเพิ่มขึ้น ปริมาณของ โมเมนต์ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ($M = F \times d$) และจะเกิดการเคลื่อนที่แบบทิปปิงมากขึ้น ในสถานการณ์เช่น นี้ ทันตแพทย์จัดฟันอาจจะเข้าใจว่าแรงที่แบรคเกตไม่เพียงพอต่อการทรานสเลทฟัน การเพิ่มแรง ดึงในเส้นลวดจะยิ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบทิปปิงเพิ่มขึ้นอีก จนกระทั่งฟันหยุดเคลื่อนที่ได้ ฉะนั้นในการทรานสเลทฟัน จึงต้องพยายามออกแบบโคลสซิงดูปให้สร้างโมเมนต์เพื่อต้านโมเมนต์ ที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบทิปปิง เพื่อให้แน่ใจว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลีที่ฟันหรือกลุ่ม ฟันนั้น Haskell, Spencer และ Day⁴² แนะนำว่า อัตราส่วน M/F ที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ฟันที่มี สุขภาพดีควรจะเท่ากับ 10 มม. ซึ่งโคลสซิงดูปที่มีการใช้อุปกรณ์ไม่สามารถที่จะให้ค่านี้ได้โดยไม่ อาศัยการทำให้เกิดโมเมนต์ตกค้าง (residual moment) ภายในดูป เช่น การทำเกเบิลเบนด์ เป็นต้น อัตราส่วน M/F ของโคลสซิงดูปสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยการ:-

- 1) เพิ่มความสูงของดูปจากแบรคเกตไปทางด้านใกล้เหงือก^{5, 28}
- 2) เพิ่มความยาวในแนวระดับของดูปในส่วนใกล้เหงือก^{5, 28}
- 3) ลดความยาวในแนวระดับของดูปในส่วนใกล้ด้านบดเคี้ยว^{5, 28}
- 4) ลดระยะระหว่างแบรคเกต
- 5) จัดวางตำแหน่งของดูปในแนวหน้า-หลังใกล้กับฟันที่ต้องการให้มีค่า M/F สูง^{16, 28}
- 6) คัดมุมของขาลูปทางด้านใกล้กลางและไกลกลาง^{28, 39}
- 7) เพิ่มปริมาณเส้นลวดทางด้านเหงือก เมื่อเทียบกับตำแหน่งของแบรคเกต เช่น การทำ เฮลิคซ์^{5, 28}

ใน 7 วิธีการข้างบนนี้ ส่วนใหญ่จะต้องใช้การประมาณและทดลองประกอบเป็นกรณีๆ ไป สำหรับวิธีที่สามารถแสดงผลทางการคำนวณได้ดีคือวิธีที่ 1, 2, 3, 6 และ 7 ซึ่งผลของการคำนวณจะเป็นแนวทางในการเลือกตัดส่วนและรูปร่างของดูปได้ ดังนั้นในตอนต่อไปนี้จะเป็นการประยุกต์

ใช้ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนในการคำนวณหาสมการของ M/F และ K ของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมในบทต่อไป

Vertical helical loop



รูปที่ 12 Vertical helical loop

โมเมนต์ที่กระทำต่อส่วนพื้นฐานของลูปแต่ละส่วน คือ :-

$$M_1 = Fx - M, \quad 0 < x < H \quad (5a)$$

$$M_2 = F(H + R \sin \phi_1) - M, \quad 0 < \phi_1 < \pi \quad (5b)$$

$$M_3 = F(H - R \sin \phi_2) - M, \quad 0 < \phi_2 < \pi \quad (5c)$$

พลังงานความเครียดในส่วนพื้นฐานของลูปแต่ละส่วนเหล่านี้คือ :-

$$U_1 = \frac{1}{2EI} \int_0^H (Fx - M)^2 dx$$

$$U_2 = \frac{1}{2EI} \int_0^\pi [F(H + R \sin \phi_1) - M]^2 (R d\phi_1)$$

$$U_3 = \frac{1}{2EI} \int_0^\pi [F(H - R \sin \phi_2) - M]^2 (R d\phi_2)$$

ฉะนั้นพลังงานความเครียดทั้งหมดคือ:-

$$U = 2U_1 + U_2 \quad : \text{จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับศูนย์}$$

$$U = 2U_1 + 2U_2 + U_3 \quad : \text{จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 1}$$

$$U = 2U_1 + 3U_2 + 2U_3 \quad : \text{จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 2}$$

$$U = 2U_1 + 4U_2 + 3U_3 \quad : \text{จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 3}$$

ถ้าให้ N แทนจำนวนของครึ่งรอบวงกลมของเฮลิคซ์แล้ว สามารถเขียนสมการพลังงานความเครียดทั้งหมดได้ดังนี้

$$U = 2U_1 + \left(\frac{N+1}{2}\right)U_2 + \left(\frac{N-1}{2}\right)U_3 \quad (6)$$

โดยที่ N เป็นเลขคี่ $= 1, 3, 5, 7, \dots$ ดังนั้นสมการ (6) จึงเขียนได้ดังนี้:-

$$\begin{aligned} EIU &= \int_0^H (Fx - M)^2 dx + \frac{1}{2} \left(\frac{N+1}{2}\right) \int_0^\pi [F(H + R \sin \phi_1) - M]^2 (Rd\phi_1) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\frac{N-1}{2}\right) \int_0^\pi [F(H - R \sin \phi_2) - M]^2 (Rd\phi_2) \end{aligned} \quad (7)$$

จากทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนตามสมการที่ (4) จะได้ว่า:-

$$\begin{aligned} EI\theta &= EI \frac{\partial U}{\partial M} \\ &= -2 \int_0^H (Fx - M) dx - R \left(\frac{N+1}{2}\right) \int_0^\pi [F(H + R \sin \phi_1) - M] d\phi_1 \\ &\quad - R \left(\frac{N-1}{2}\right) \int_0^\pi [F(H - R \sin \phi_2) - M] d\phi_2 \end{aligned}$$

หลังจากทำการอินทิเกรตและจัดรูปใหม่จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงดึง คือ:-

$$M / F = \frac{H^2 + \pi NRH + 2R^2 + EI\theta / F}{2H + \pi NR} \quad (8)$$

ในการคำนวณหาสูตรความแข็งดิ่ง K ของลูปให้ใช้ทฤษฎีของคาสติกลีอาโนตามสมการที่ (3) ในขณะที่โมเมนต์ $M = 0$ คือ:-

$$\begin{aligned} EI\delta &= EI \frac{\partial U}{\partial F} (M = 0) \\ &= 2 \int_0^H Fx^2 dx + R \left(\frac{N+1}{2} \right) \int_0^\pi F(H + R \sin \phi_1)^2 d\phi_1 \\ &\quad + R \left(\frac{N-1}{2} \right) \int_0^\pi F(H - R \sin \phi_2)^2 d\phi_2 \end{aligned}$$

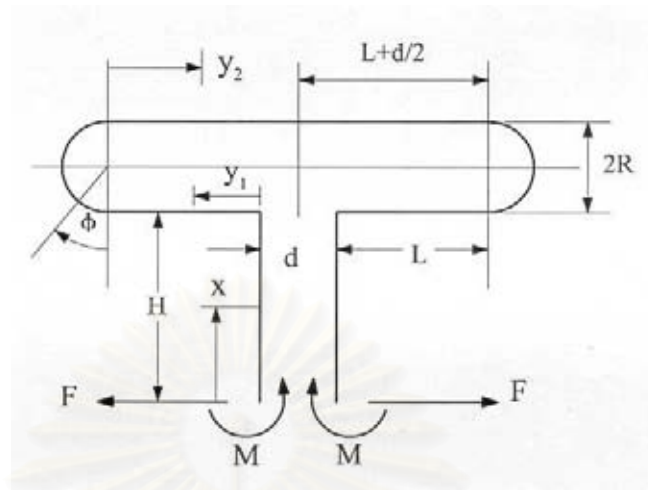
หลังจากการอินทิเกรต และจัดรูปใหม่จะได้สมการความแข็งดิ่งของ vertical helical loop คือ:-

$$K = F / \delta = \frac{6EI}{4H^3 + 24HR^2 + 3\pi NR(2H^2 + R^2)} \quad (9)$$

ค่าความแข็งดิ่งของสมการที่ (9) นี้ตรงกับค่าที่ Haack¹⁴ แสดงไว้ในบทความ แต่ไม่ได้แสดงรายละเอียดของการได้มา ส่วนสมการ M/F ของลูปเขามิได้แสดงอยู่ในบทความด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ M/F ของ Siatkowski¹ จะพบว่า เครื่องหมายของเทอมสุดท้ายจะแตกต่างจากสมการที่ (8) (ของ Siatkowski¹ เป็น $-EI\theta / F$) ซึ่งผู้วิจัยได้ให้ผู้เชี่ยวชาญทางสาขากลศาสตร์วัสดุตรวจสอบสมการคำนวณดูแล้วพบว่า สมการที่ (8) เป็นสมการที่ถูกต้องแล้วตามสัญลักษณ์ทิศทางของมุม θ ในรูปที่ 11

ถ้า θ เป็นมุมเกเบิลที่ปลายขาของลูป จะพบว่า ถ้าไม่มีเกเบิลเป็นต้น ($\theta = 0$) ค่า M/F จะต่ำสุด และเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น (θ เป็น +) ค่า M/F จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามที่ได้พบจากความเป็นจริง อย่างไรก็ตามถ้าถือให้ว่าทิศทางของมุม θ ในบทความของ Siatkowski¹ มีค่าเป็นลบ (-) สมการของเขา ก็จะตรงกับสมการที่ (8) พอดี

T-loop



รูปที่ 13 T-loop

เนื่องจากโคลสซิงรูปมีความสมมาตร ณ ตำแหน่งกึ่งกลางที่ $L+d/2$ ดังนั้นในการหาพลังงานความเครียดทั้งหมด จึงสามารถเขียนสมการเพียงครึ่งหนึ่งของรูป แล้วคูณด้วย 2 ได้ โมเมนต์ที่กระทำต่อส่วนพื้นฐานของรูปแต่ละส่วน คือ :-

$$M_1 = Fx - M, \quad 0 < x < H \quad (10a)$$

$$M_2 = FH - M, \quad 0 < y_1 < L \quad (10b)$$

$$M_3 = F[H+R(1-\cos\phi)]-M, \quad 0 < \phi < \pi \quad (10c)$$

$$M_4 = F(H+2R) - M, \quad 0 < y_2 < (L+d/2) \quad (10d)$$

พลังงานความเครียดทั้งหมดของ T-loop คือ:-

$$EIU = \int_0^H (Fx - M)^2 dx + \int_0^L (FH - M)^2 dy_1 + \int_0^\pi [FH + FR(1 - \cos\phi) - M]^2 (Rd\phi) + \int_0^{L+d/2} [F(H + 2R) - M]^2 dy_2$$

จากทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนตามสมการที่ (4) จะได้ว่า :-

$$EI\theta = \frac{\partial U}{\partial M}$$

$$\begin{aligned}
&= -2 \int_0^H (Fx - M) dx - 2 \int_0^L (FH - M) dy_1 \\
&\quad - 2R \int_0^\pi [FH - FR(1 - \cos \phi) - M] d\phi - 2 \int_0^{L+d/2} [F(H + 2R) - M] dy_2
\end{aligned}$$

หลังจากทำการอินทิเกรตและจัดรูปใหม่จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงดึงคือ:-

$$M / F = \frac{H^2 + 4L(H + R) + 2\pi R^2 + 2\pi RH + d(H + 2R) + EI\theta / F}{2H + 4L + 2\pi R + d} \quad (11)$$

ในการคำนวณหาสูตรความแข็งดึง K ของลูป ให้ใช้ทฤษฎีของคาสติกกลีอาโนตามสมการที่ (3) ในขณะที่โมเมนต์ $M = 0$ คือ:-

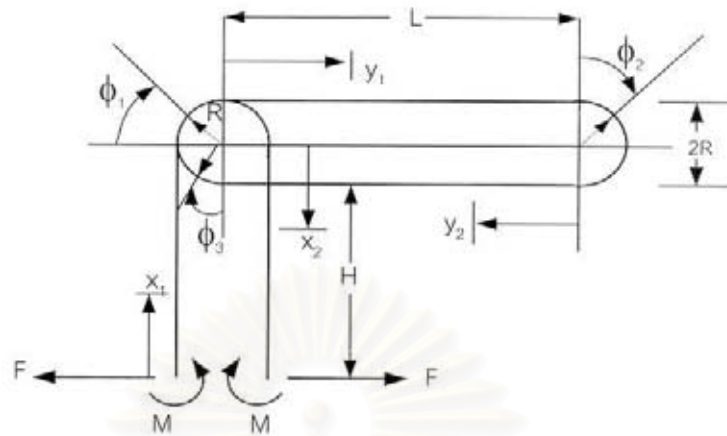
$$\begin{aligned}
EI\delta &= EI \frac{\partial U}{\partial F} (M = 0) \\
&= 2 \int_0^H Fx^2 dx + 2 \int_0^L FH^2 dy_1 + 2R \int_0^\pi F[H + R(1 - \cos \phi)]^2 d\phi \\
&\quad + 2 \int_0^{L+d/2} F(H + 2R)^2 dy_2
\end{aligned}$$

หลังจากทำการอินทิเกรต และจัดรูปใหม่จะได้สมการความแข็งดึงของ T-loop คือ:-

$$\begin{aligned}
K &= F / \delta \\
&= \frac{3EI}{2H^3 + 6H^2L + 6\pi RH^2 + 12\pi HR^2 + 9\pi R^3 + 3(2L + d)(H + 2R)^2} \quad (12)
\end{aligned}$$

จากการตรวจสอบสมการที่ (11) กับค่าของ Siatkowski¹ ปรากฏว่ามีบางเทอมไม่ตรงกัน แต่ผู้วิจัยได้ขอให้ผู้เชี่ยวชาญทางทฤษฎีบทของคาสติกกลีอาโนตรวจสอบ รวมถึงการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการอินทิเกรตแล้ว พบว่าสมการที่ (11) มีความถูกต้องอย่างแน่นอน ส่วนสมการของความแข็งดึง (12) นี้ Siatkowski¹ มิได้หาเอาไว้

Opus90 loop



รูปที่ 14 Opus90 loop

จากรูปที่ 14 โมเมนต์ที่กระทำต่อส่วนพื้นฐานของลูปแต่ละส่วน คือ :-

$$\begin{aligned}
 M_1 &= Fx_1 - M & 0 < x_1 < H+R \\
 M_2 &= F[(H+R)+R \sin \phi_1] - M, & 0 < \phi_1 < \pi / 2 \\
 M_3 &= F(H+2R) - M, & 0 < y_1 < L \\
 M_4 &= F[(H+2R)-R(1-\cos \phi_2)] - M, & 0 < \phi_2 < \pi \\
 M_5 &= FH - M, & 0 < y_2 < L \\
 M_6 &= F[H+R(1-\cos \phi_3)] - M, & 0 < \phi_3 < 3\pi/2 \\
 M_7 &= F[(H+R)-x_2] - M, & 0 < x_2 < H+R
 \end{aligned}$$

พลังงานความเครียดทั้งหมดของ Opus90 loop คือ :-

$$\begin{aligned}
 EIU &= \frac{1}{2} \int_0^{H+R} (Fx_1 - M)^2 dx_1 + \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} [F(H+R+R \sin \phi_1) - M]^2 (Rd\phi_1) \\
 &+ \frac{1}{2} \int_0^L F[(H+2R) - M]^2 dy_1 + \frac{1}{2} \int_0^{\pi} [F\{(H+2R) - R(1-\cos \phi_2)\} - M]^2 (Rd\phi_2) \\
 &+ \frac{1}{2} \int_0^L (FH - M)^2 dy_2 + \frac{1}{2} \int_0^{3\pi/2} [F\{H+R(1-\cos \phi_3)\} - M]^2 (Rd\phi_3)
 \end{aligned}$$

$$+ \int_0^{H+R} [F(H+R-x_2)-M]^2 dx_2$$

จากทฤษฎีบทของคาลตูกลิอาโนตามสมการที่ (4) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} EI\theta &= EI \frac{\partial U}{\partial M} \\ &= - \int_0^{H+R} (Fx_1 - M) dx_1 - R \int_0^{\pi/2} [F(H+R+R\sin\phi_1) - M] d\phi_1 \\ &\quad - \int_0^L [F(H+2R) - M] dy_1 - R \int_0^{\pi} [F(H+2R - R(1-\cos\phi_2)) - M] d\phi_2 \\ &\quad - \int_0^L (FH - M) dy_2 - R \int_0^{3\pi/2} [F\{H+R(1-\cos\phi_3)\} - M] d\phi_3 \\ &\quad - \int_0^{H+R} [F(H+R-x_2) - M] dx_2 \end{aligned}$$

หลังจากทำการอินทิเกรตและจัดรูปใหม่จะได้อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงดึง คือ:-

$$M/F = \frac{H^2(2+3\pi)RH + 3(1+\pi)R^2 + 2HL + 2RL + EI\theta/F}{2(H+R) + 3\pi R + 2L} \quad (13)$$

ในการคำนวณหาสูตรความแข็งดึง K ของลูปให้ใช้ทฤษฎีบทของคาลตูกลิอาโนตามสมการที่ (3) ในขณะที่โมเมนต์ $M=0$ คือ :-

$$\begin{aligned} EI\delta &= EI \frac{\partial U}{\partial M} (M=0) \\ &= \int_0^{H+R} Fx_1^2 dx_1 + R \int_0^{\pi/2} F(H+R+R\sin\phi_1)^2 d\phi_1 + \int_0^L F(H+2R)^2 dy_1 \\ &\quad + R \int_0^{\pi} F[H+2R - R(1-\cos\phi_2)]^2 d\phi_2 + \int_0^L FH^2 dy_2 \\ &\quad + R \int_0^{3\pi/2} F[H+R(1-\cos\phi_3)]^2 d\phi_3 + \int_0^{H+R} F(H+R-x_2)^2 dx_2 \end{aligned}$$

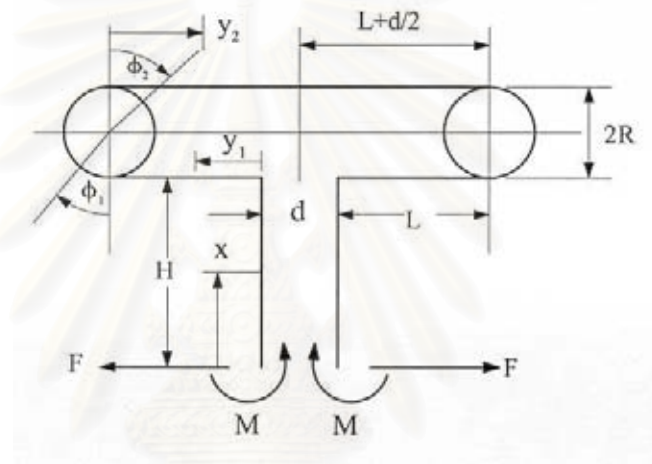
หลังจากทำการอินทิเกรตและจัดรูปของสมการใหม่ให้เหมาะสม จะได้สมการความแข็งดึงของ Opus90 loop คือ :-

$$K = F / \delta$$

$$= \frac{12EI}{8H^3 + 12(2 + 3\pi)H^2R + 72(1 + \pi)HR^2 + (56 + 54\pi)R^3 + 24(2R^2L + 2RHL + H^2L)} \quad (14)$$

สมการที่ (13) นี้จะมีความแตกต่างจากของ Siatkowski¹ และด้วยเหตุผลและการตรวจสอบ เช่นเดียวกับสมการที่ (11) ดังที่กล่าวมาแล้ว ผู้วิจัยจึงยืนยันถึงความถูกต้องของสมการที่ (13) นี้ ส่วนสมการความแข็งดิ่งที่ (14) Siatkowski¹ มิได้หาเอาไว้

Helical T-loop



รูปที่ 15 Helical T-loop

จากประสบการณ์ในการวิเคราะห์ลูปต่างๆ ที่ผ่านมาแล้ว ผู้วิจัยจึงคิดแบบของลูปขึ้นมาใหม่ ให้มีค่า M/F สูงขึ้น และมีความหยุ่นตัวมากขึ้น โดยเรียกชื่อว่า helical T-loop ซึ่งเป็นการนำ T-loop มาเพิ่มเฮลิคซ์เข้าไปที่ปลายปีกทั้งสองด้านดังรูปที่ 15 ในการหาพลังงานความเครียดจึงสามารถเขียนสมการเพียงครึ่งหนึ่งของลูปแล้วคูณด้วย 2 ได้ จากรูปที่ 15 โมเมนต์ที่กระทำต่อส่วนพื้นฐานของลูปแต่ละส่วน คือ :-

$$\begin{aligned} M_1 &= Fx - M, & 0 < x < H \\ M_2 &= FH - M, & 0 < y_1 < L \\ M_3 &= F[H + R(1 - \cos\phi_1)] - M, & 0 < \phi_1 < \pi \\ M_4 &= F[(H + 2R) - R(1 - \cos\phi_2)] - M, & 0 < \phi_2 < \pi \\ M_5 &= F(H + 2R) - M, & 0 < y_2 < L + d/2 \end{aligned}$$

พลังงานความเครียดในส่วนพื้นฐานของรูปแต่ละส่วนเหล่านี้ คือ :-

$$U_1 = \frac{1}{2EI} \int_0^H (Fx - M)^2 dx$$

$$U_2 = \frac{1}{2EI} \int_0^L (FH - M)^2 dy_1$$

$$U_3 = \frac{1}{2EI} \int_0^\pi [F \{H + R(1 - \cos \phi_1)\} - M]^2 (Rd\phi_1)$$

$$U_4 = \frac{1}{2EI} \int_0^\pi [F \{(H + 2R) - R(1 - \cos \phi_2)\} - M]^2 (Rd\phi_2)$$

$$U_5 = \frac{1}{2EI} \int_0^{L+d/2} [F(H + 2R) - M]^2 dy_2$$

ฉะนั้นพลังงานความเครียดทั้งหมดคือ:-

$$U = 2(U_1 + U_2 + U_3 + U_5) \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับศูนย์ (T-loop)}$$

$$U = 2(U_1 + U_2 + 2U_3 + U_4 + U_5) \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 1}$$

$$U = 2(U_1 + U_2 + 3U_3 + 2U_4 + U_5) \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 2}$$

$$U = 2(U_1 + U_2 + 4U_3 + 3U_4 + U_5) \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 3}$$

ถ้าให้ N แทนจำนวนของครึ่งรอบวงกลมของเฮลิคซ์แล้ว สามารถเขียนสมการพลังงานความเครียดทั้งหมดได้ดังนี้

$$U = 2 \left[U_1 + U_2 + \left(\frac{N+1}{2} \right) U_3 + \left(\frac{N-1}{2} \right) U_4 + U_5 \right]$$

โดยที่ $N = \text{เลขคี่} = 1 \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับศูนย์ (T-loop)}$

$= 3 \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 1}$

$= 5 \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 2}$

$= 7 \quad : \text{ จำนวนเฮลิคซ์เท่ากับ 3}$

ซึ่งหลังจากแทนค่า U แล้วจะสมการพลังงานความเครียดดังนี้ได้ดังนี้:-

$$\begin{aligned}
EIU = & \int_0^H (Fx - M)^2 dx + \int_0^L (FH - M)^2 dy_1 + \left(\frac{N+1}{2}\right) \int_0^\pi [F \{H + R(1 - \cos \phi_1)\} - M]^2 (Rd\phi_1) \\
& + \left(\frac{N-1}{2}\right) \int_0^\pi [F \{(H + 2R) - R(1 - \cos \phi_2)\} - M]^2 (Rd\phi_2) + \int_0^{L+d/2} [F(H + 2R) - M]^2 dy_2
\end{aligned}$$

จากทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนตามสมการที่ (4) จะได้ว่า :-

$$\begin{aligned}
EI\theta = EI \frac{\partial U}{\partial M} \\
= -2 \int_0^H (Fx - M) dx - 2 \int_0^L (FH - M) dy_1 - 2R \left(\frac{N+1}{2}\right) \int_0^\pi [F \{H + R(1 - \cos \phi_1)\} - M] d\phi_1 \\
- 2R \left(\frac{N-1}{2}\right) \int_0^\pi F [\{(H + 2R) - R(1 - \cos \phi_2)\} - M] d\phi_2 - 2 \int_0^{L+d/2} [F(H + 2R) - M] dy_2
\end{aligned}$$

หลังจากทำการอินทิเกรต และจัดรูปใหม่จะได้อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงดึง คือ :-

$$M / F = \frac{H^2 + 4L(H + R) + 2\pi NR^2 + 2\pi NRH + d(H + 2R) + EI\theta / F}{2H + 4L + 2\pi NR + d} \quad (15)$$

ในการคำนวณหาสูตรความแข็งดึงของลูปให้ใช้ทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนตามสมการที่ (3) ในขณะที่โมเมนต์ $M = 0$ คือ :-

$$\begin{aligned}
EI\delta = EI \frac{\partial U}{\partial F} (M = 0) \\
= 2 \int_0^H Fx^2 dx + 2 \int_0^L FH^2 dy_1 + 2R \left(\frac{N+1}{2}\right) \int_0^\pi F [H + R(1 - \cos \phi_1)]^2 d\phi_1 \\
+ 2R \left(\frac{N-1}{2}\right) \int_0^\pi F [(H + 2R) - R(1 - \cos \phi_2)]^2 d\phi_2 + 2 \int_0^{L+d/2} F(H + 2R)^2 dy_2
\end{aligned}$$

หลังจากการอินทิเกรตสมการข้างบนจะได้สมการความแข็งดึงของ helical T-loop คือ:-

$$K = F / \delta = \frac{3EI}{2H^3 + 6H^2L + 6\pi RH^2 + 12\pi HR^2 + 3(2L+d)(H+2R)^2 + 9\pi NR^3} \quad (16)$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์และเลือกสัดส่วนของโคลสซิงรูป

บทนำ

การเลือกสัดส่วนของโคลสซิงรูปให้เหมาะสม หมายถึง การเลือกสัดส่วนของรูปเพื่อให้มีอัตราส่วน M/F อยู่ในช่วงที่ต้องการใช้ดึงฟันเขี้ยว ในขณะที่เดียวกันค่าความแข็งดึง $K = F / \delta$ จะต้องพอเหมาะด้วย ถ้าค่า K สูงเกินไป แรงที่ใช้ในการแอกทิเวตต่อหนึ่งมิลลิเมตรก็จะสูงตามไปด้วย ค่า K ที่สูงจะทำให้แรงในรูปลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อฟันเขี้ยวเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามแม้ว่ารูปจะให้ค่า M/F ที่พอเหมาะจนสามารถหักล้างโมเมนต์ที่จะทำให้เกิดทipping แล้วก็ตาม แต่แรง F ต้องไม่น้อยจนเกินไป มิฉะนั้นฟันอาจจะไม่เคลื่อนที่ได้ สำหรับฟันเขี้ยวแล้ว Ricketts และคณะ³⁶ ได้แนะนำให้ใช้แรงดึงขั้นต่ำ 75 กรัม ส่วน Lee³⁵ แนะนำให้ใช้แรงอยู่ในช่วง 150-260 กรัม ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างมาก แต่ค่า M/F ประมาณ 8-10 มม. จะเป็นค่าหลักที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบรูปก่อนค่าอื่นๆ

Vertical helical loop

โดยปรกติรูปที่ไม่มีเกเบิลเป็นดัดไม่สามารถให้ค่า M/F ถึง 8 อยู่แล้ว ทั้งนี้เพราะภายในช่องปากมีเนื้อที่จำกัด แต่เพื่อที่จะศึกษาและกำหนดสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดของรูปให้ได้เสียก่อน จึงให้สมมติในขั้นต้นว่ารูปไม่มีเกเบิลเป็นดัด นั่นคือให้เทอม $EI\theta / F$ ในสมการที่ (8) เท่ากับศูนย์ ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงอยู่ในตารางที่ 6 จากนั้นให้นำผลนี้มาเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วน M/F และความสูงของรูป H ที่รัศมีของเฮลิคซ์ต่างๆ กัน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 16 สำหรับเฮลิคซ์หนึ่งวง และในรูปที่ 17 สำหรับเฮลิคซ์สองวง

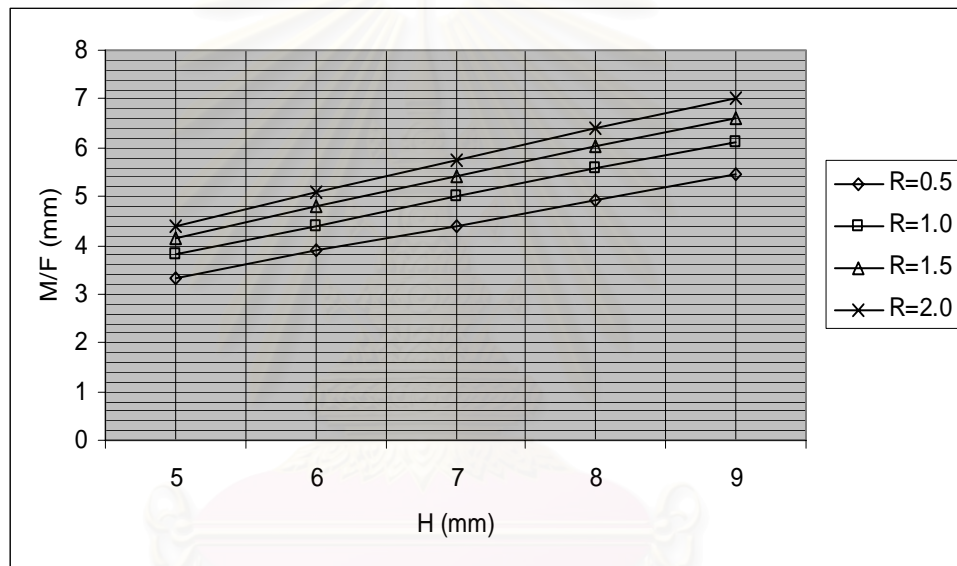
จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่าค่า M/F เพิ่มขึ้นตามความสูงของรูป H และตามขนาดของรัศมีของวงเฮลิคซ์ R อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว รัศมีสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ดีและไม่ทำให้คนไข้เกิดความไม่สบายจนมากเกินไปจะอยู่ที่ $R = 1.5$ มม. ส่วนความสูงของรูป H ก็มีขีดจำกัดทางกายวิภาคเท่ากับระยะจากร่องของแบรคเกตไปจนถึงช่องปากส่วนหน้า (vestibule) เท่านั้น ถ้าให้ความสูงของรูปที่มากที่สุดสำหรับฟันเขี้ยวบนและฟันเขี้ยวล่างเท่ากับ 10 มม. และ 8 มม. ตามลำดับแล้ว สมการสัดส่วนของรูปที่ให้ค่า M/F มากที่สุดตามข้อจำกัดในทางปฏิบัตินี้คือ:

$$H+R = 10 \quad \text{สำหรับฟันเขี้ยวบน} \quad (17)$$

$$H+R = 8 \quad \text{สำหรับฟันเขี้ยวล่าง} \quad (18)$$

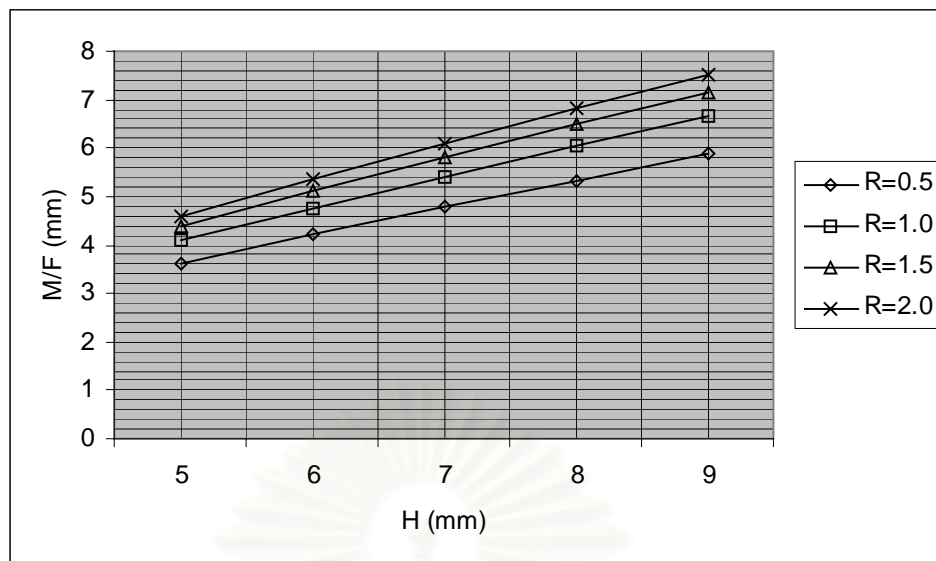
ตารางที่ 6 ค่า M/F ของ vertical helical loop ไม่มีเกบิลเบนด์

H มม.	R = 0.5 มม.		R = 1.0 มม.		R = 1.5 มม.		R = 2.0 มม.	
	หนึ่งวง	สองวง	หนึ่งวง	สองวง	หนึ่งวง	สองวง	หนึ่งวง	สองวง
5	3.33	3.63	3.82	4.11	4.15	4.39	4.41	4.59
6	3.88	4.21	4.41	4.77	4.79	5.11	5.09	5.35
7	4.41	4.78	4.99	5.42	5.42	5.81	5.75	6.10
8	4.93	5.34	5.56	6.04	6.02	6.50	6.39	6.82
9	5.46	5.89	6.11	6.66	6.62	7.16	7.02	7.52



รูปที่ 16 ค่า M/F ของ vertical helical loop วงเดียว ไม่มีเกบิลเบนด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



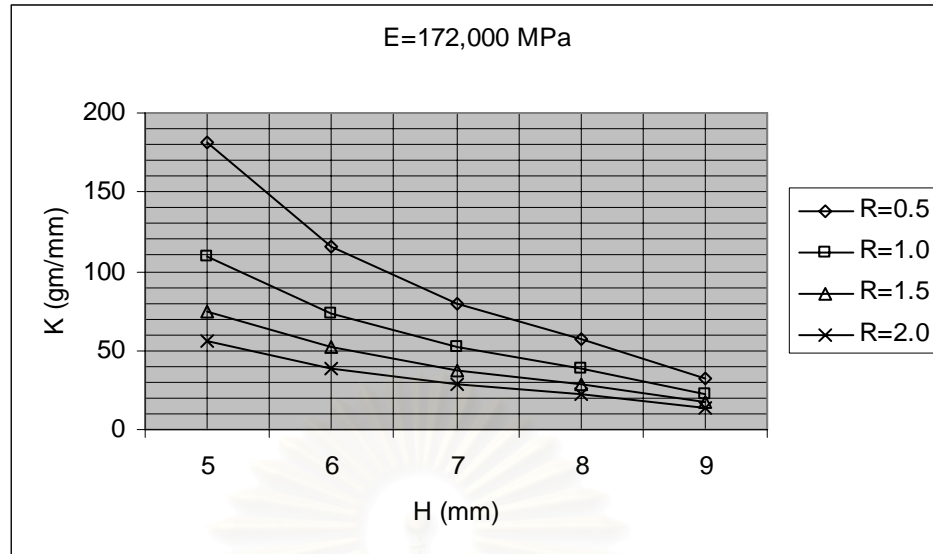
รูปที่ 17 ค่า M/F ของ vertical helical loop สองวง ไม่มีเกเบิลเป็นต์

ฉะนั้นถ้าให้รัศมีของเฮลิคซ์ R สูงสุดเท่ากับ 1.5 มม. แล้ว ความสูงของลูป H ของฟันเขี้ยวบนจะเท่ากับ 8.5 มม. และของฟันเขี้ยวล่างเท่ากับ 6.5 มม. และค่า M/F ที่ได้จะเป็นไปตามตารางที่ 7

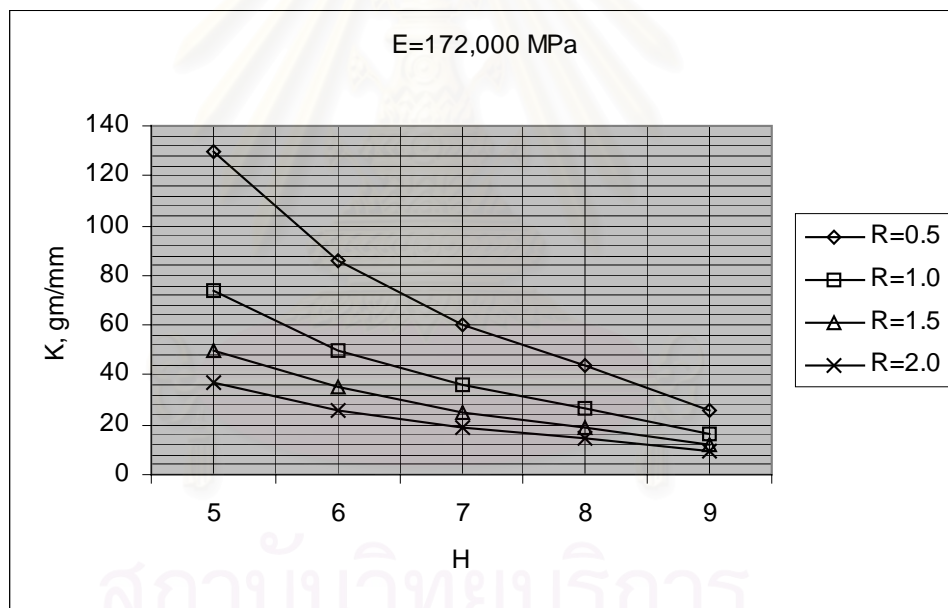
ตารางที่ 7 ค่า M/F ของ vertical helical loop R=1.5 มม. ไม่มีเกเบิลเป็นต์

H มม.	เฮลิคซ์ 1 วง	เฮลิคซ์ 2 วง
6.5	5.11	5.47
8.5	6.32	6.83

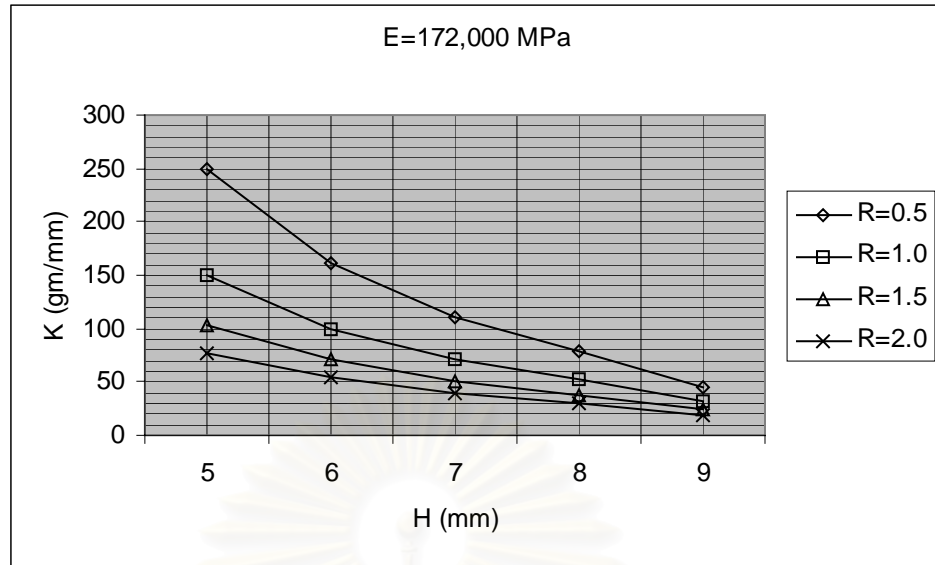
ก่อนที่จะแสดงผลของการมีเกเบิลเป็นต์ จะพิจารณาค่าความแข็งตึง K ของลูปตามสมการที่ (9) เสียก่อน ในที่นี้จะศึกษาเฉพาะลวดสี่เหลี่ยมทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีขนาด 0.016x0.016 นิ้ว (0.40x0.40 มม.) และ 0.016x0.022 นิ้ว (0.40x0.55 มม.) เท่านั้น ค่าโมดูลัสของ Young $E=172,000$ MPa ผลของการคำนวณตามสมการที่ (9) สำหรับ vertical helical loop ขนาดต่างๆ กันแสดงอยู่ในรูปที่ 18-21 ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่า H และ R เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งตึง K ของลูปจะลดลงตามลำดับ



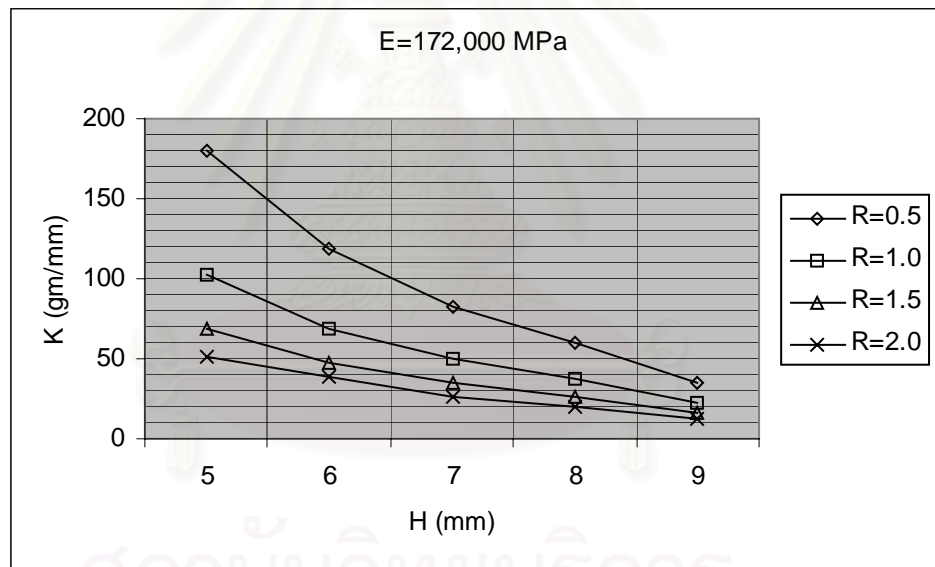
รูปที่ 18 ค่าความแข็งตึงของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss



รูปที่ 19 ค่าความแข็งตึงของ vertical helical loop สองวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss



รูปที่ 20 ค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss



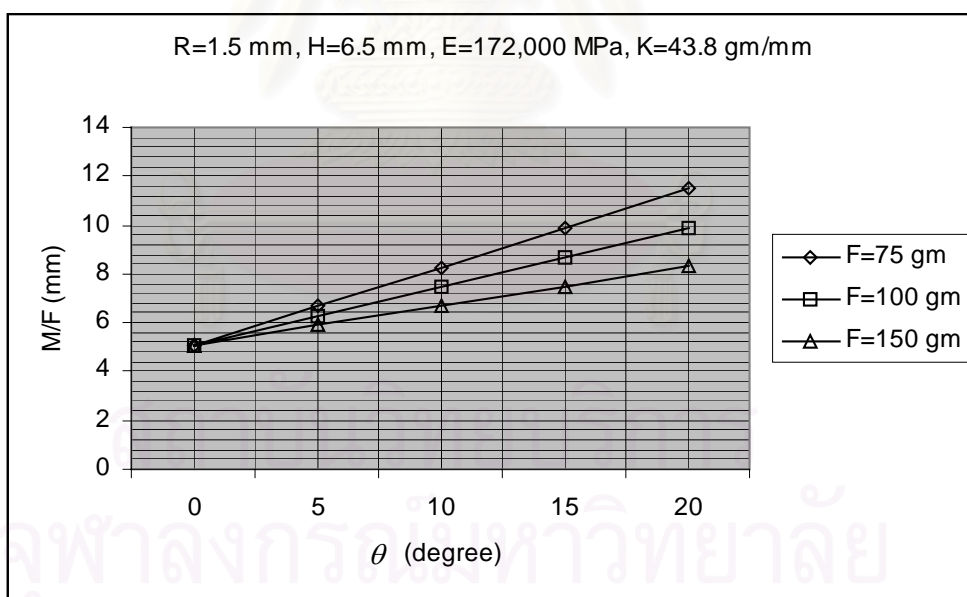
รูปที่ 21 ค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop สองวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss

ค่าความแข็งตึงของ vertical helical loop เมื่อใช้สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดสำหรับลวดทั้งสองขนาด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (9) แสดงอยู่ในตารางที่ 8

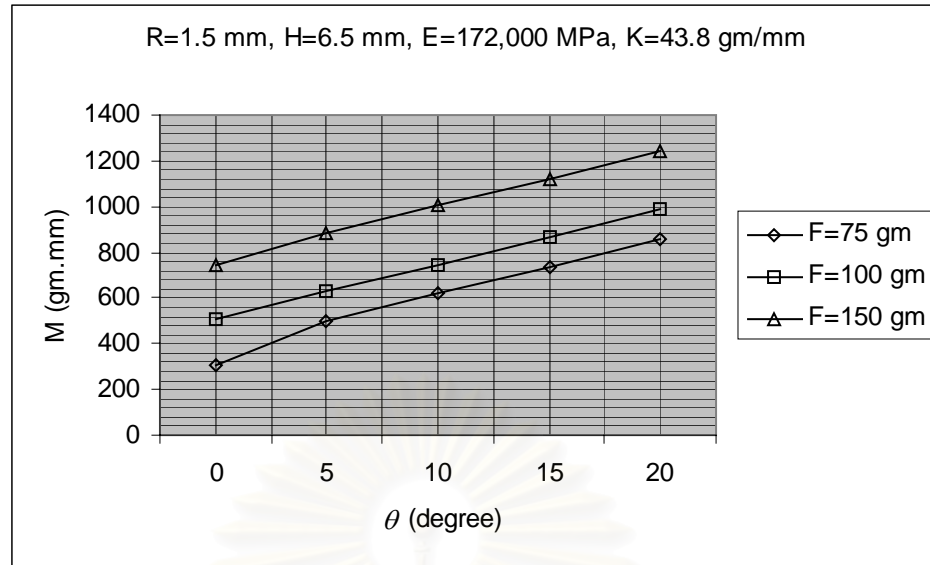
ตารางที่ 8 ค่าความแข็งตึง K (กรัม/มม.) ของ vertical helical loop R=1.5 มม. E=172,000 MPa

H มม.	เฮลิคซ์ หนึ่งวง		เฮลิคซ์ สองวง	
	0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว	0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว
6.5	43.8	60.2	29.6	40.7
8.5	24.6	33.8	16.9	23.2

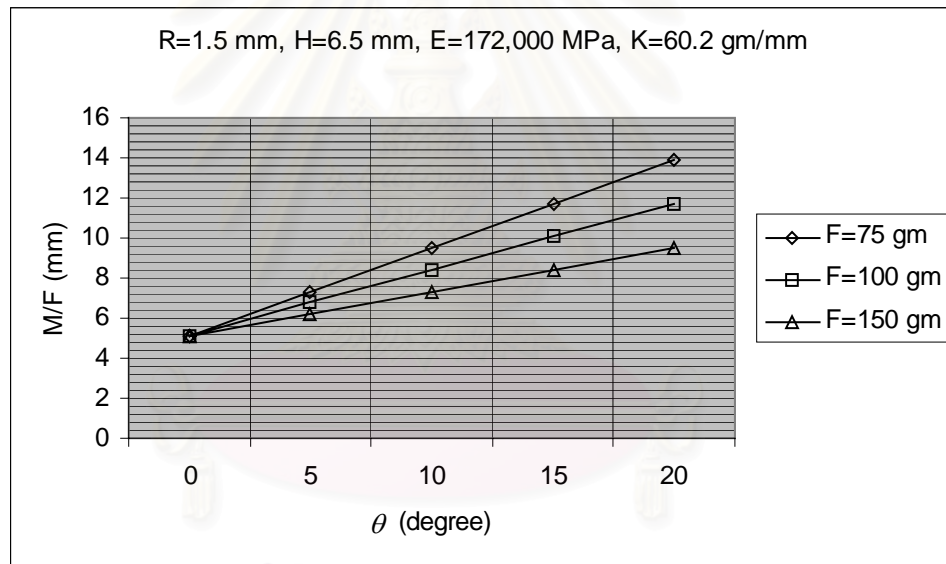
เนื่องจาก vertical loop ชนิดที่มีเฮลิคซ์หนึ่งวง สามารถตัดได้เร็วและเป็นที่ยอมรับโดยทันตแพทย์จัดฟันมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลของการเพิ่มมุมเกเบิลที่มีต่อลวด จะพิจารณาเฉพาะลวดขนาด 0.016x0.016 นิ้ว และ 0.016x0.022 นิ้วที่มีเฮลิคซ์หนึ่งวงเท่านั้น รูปที่ 22-29 แสดงถึงค่า M/F และโมเมนต์ที่ได้จากการเพิ่มมุมเกเบิลไปจนถึง 20 องศา แรงที่ใช้ดึงเส้นลวดคือ 75, 100 และ 150 กรัม



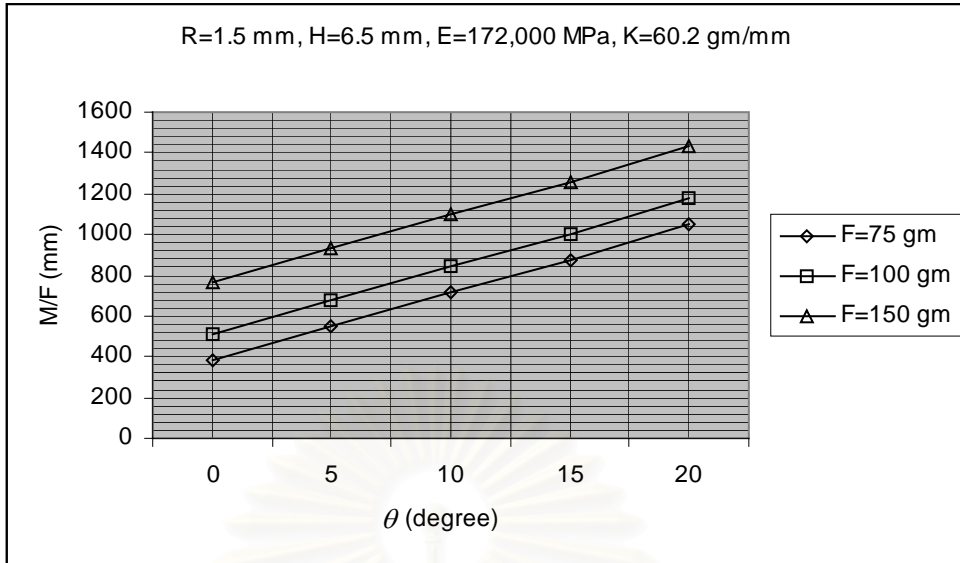
รูปที่ 22 ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss



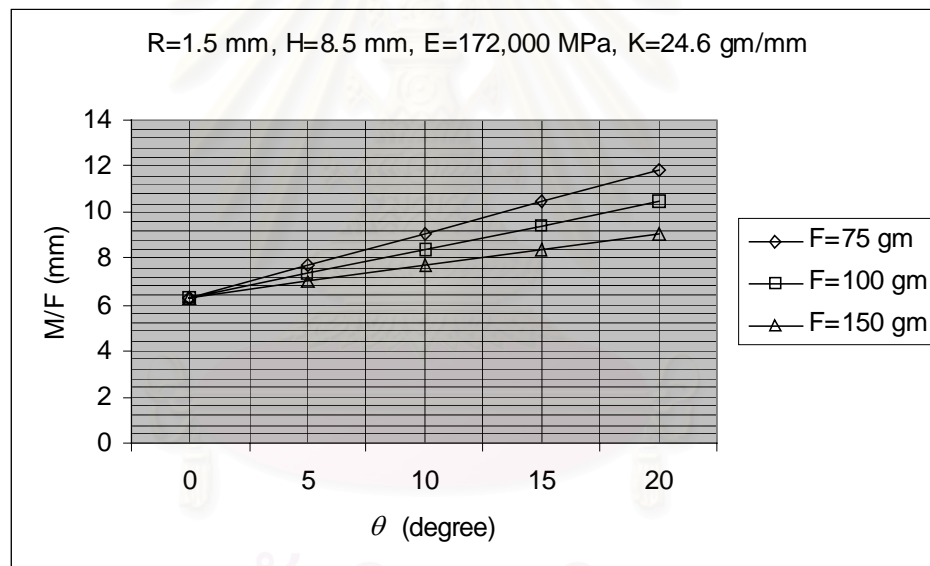
รูปที่ 23 โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss



รูปที่ 24 ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss

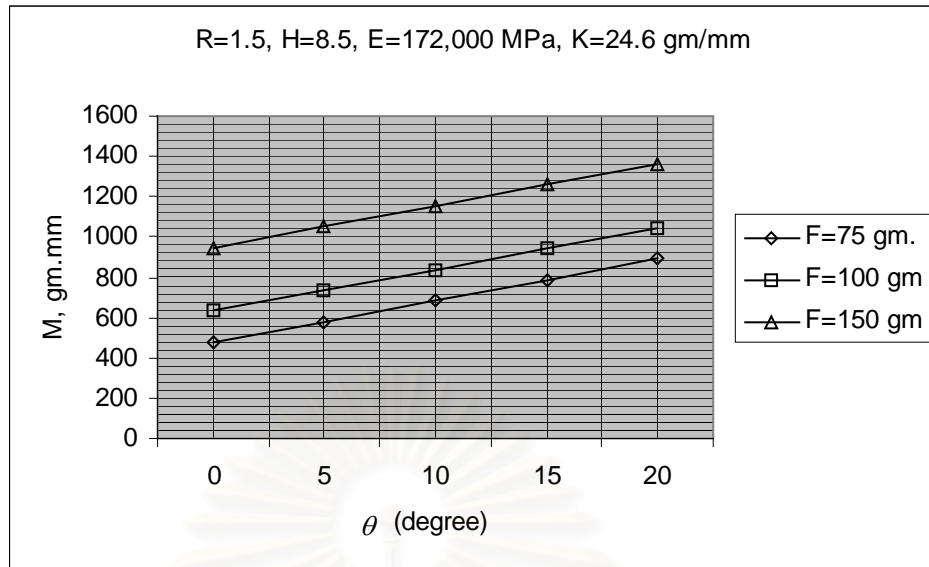


รูปที่ 25 โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss

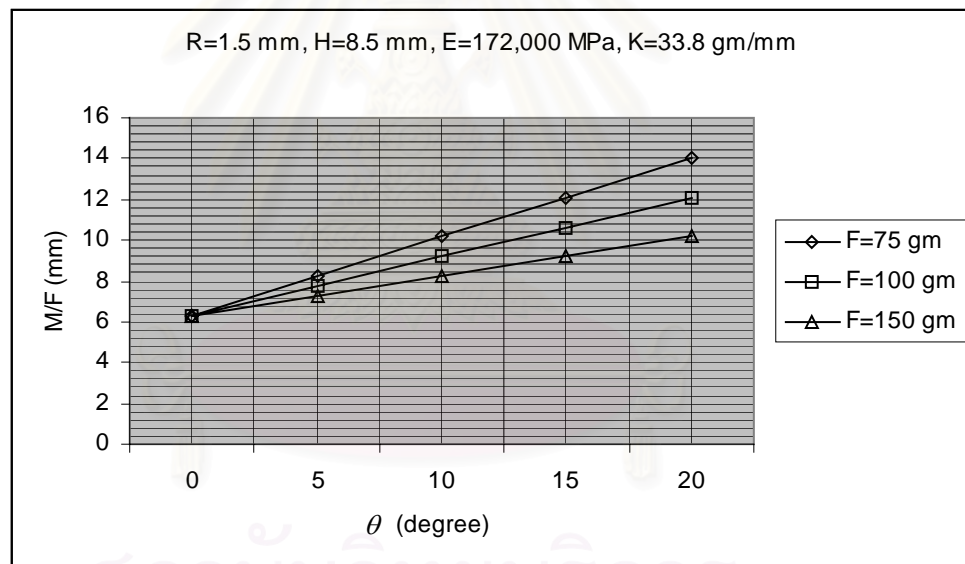


รูปที่ 26 ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

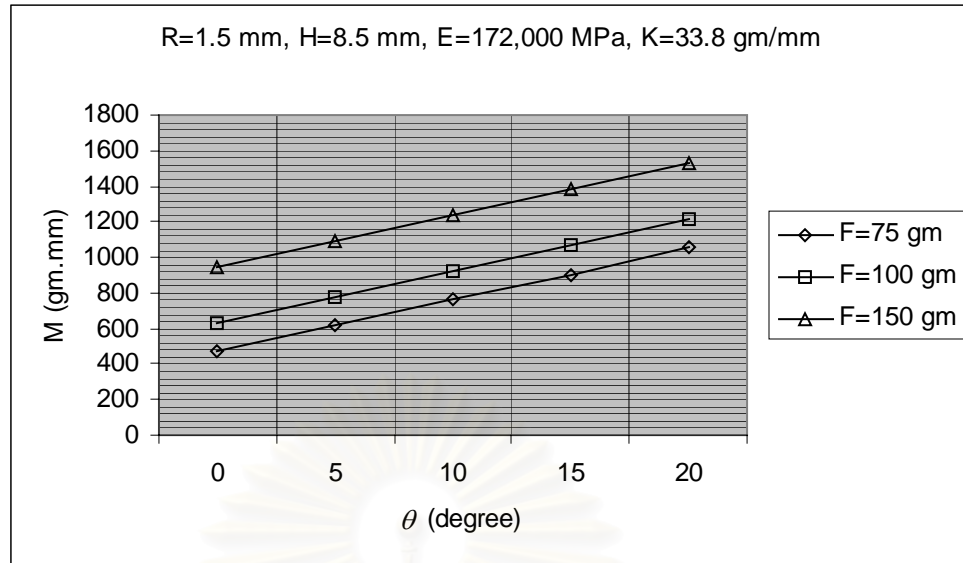


รูปที่ 27 โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss



รูปที่ 28 ค่า M/F ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 29 โมเมนต์ของ vertical helical loop หนึ่งวง ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss

จากผลที่ได้จะเห็นว่า ถ้าแรงดึงเพิ่มขึ้น M/F จะลดลง ฉะนั้นเมื่อใช้แรงดึงสูงขึ้นก็จำเป็นที่จะต้องเลือกมุมเกเบิลมากขึ้นตามไปด้วย จากกราฟพบว่า โคลสซิงรูปทุกขนาดที่เสนอผลมานี้ สามารถที่จะเลือกมุมเกเบิล θ เพื่อให้ค่า M/F อยู่ระหว่าง 8-10 มม.ได้ แต่ก็ต้องพิจารณาถึงแรงที่ต้องใช้ในการแอคทีเวทในแต่ละครั้ง และขนาดของโมเมนต์ที่ได้ด้วย

T-loop

ในการกำหนดสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดของ T-loop จะดำเนินการในลักษณะเดียวกับของ vertical helical loop นั่นคือ ศึกษาค่า M/F ของรูปในขณะที่ยังไม่มีเกเบิลเป็นค โดยการใช้เทอม $EI\theta/F$ ในสมการที่ (11) เท่ากับศูนย์ ในการกำหนดสัดส่วนของรูป จะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปากและเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างรูปที่มีขนาดสูงxกว้างเท่าๆ กัน ซึ่งเขียนเป็นสมการตามรูปที่ 13 ได้ดังนี้คือ:-

$$H+2R = H_T \quad (19)$$

$$2L+2R+d = W \quad (20)$$

โดยที่ H_T และ W เป็นความสูงและความกว้างทั้งหมดของรูป เนื่องข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปาก ค่า H_T และ W สูงสุดสำหรับฟันเขี้ยวบนและล่าง คือ 10 และ 8 มม. ตามลำดับ

ขั้นแรกให้ศึกษาถึงผลของระยะห่างระหว่างขาของรูป d ว่ามีผลอย่างไรกับค่า M/F โดยกำหนดให้ขนาดสูงxกว้างของรูปที่นำมาเปรียบเทียบเท่ากัน ในที่นี้เลือกใช้ค่า $H_T = W = 10$ มม. ถ้าให้รัศมี $R = 1$ มม. แล้ว ตามสมการที่ (19) จะได้ $H = 8$ มม. ผลการคำนวณเปรียบเทียบ M/F โดย

ไม่มีเกเบิลเบ็นด์ ($\theta = 0$) แสดงอยู่ในตารางที่ 9 ซึ่งจะพบว่า $d = 0$ มม. ให้อัตราส่วน M/F สูงสุด แต่ค่า M/F ที่ระยะห่างระหว่างขาของรูป d ต่างๆ ก็มีได้แตกต่างกันมากน้ก การสร้างรูปให้ $d = 0$ มม. ยังจะมีผลดีต่อการทำงานของทันตแพทย์จัดฟันอีกด้วย เพราะจะช่วยให้การวัดระยะที่แอคทิเวทในแต่ละครั้ง และการติดตามผลการเคลื่อนที่ของฟันสะดวกขึ้น ดังนั้นสมการที่ (20) จึงกลายเป็น

$$L+R = W/2 \quad (21)$$

ตารางที่ 9 ผลของค่า d ที่มีต่อค่า M/F ของ T-loop เมื่อ $H_r=W=10$ มม., $R=1$ มม., $H=8$ มม.

d มม.	L=4 มม.	L=3.5 มม.	L=3 มม.
0	6.91		
1		6.88	
2			6.85

ในการศึกษาเพื่อหาค่า R ที่เหมาะสมที่สุด ให้คำนวณหา M/F ตามสมการที่ (11) โดยไม่มีเกเบิลเบ็นด์ เมื่อทดลองให้ $R = 0.5, 1$ และ 1.5 มม. ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 10-12 และแสดงเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 30-32 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ $R=0.5$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเป็นต้น

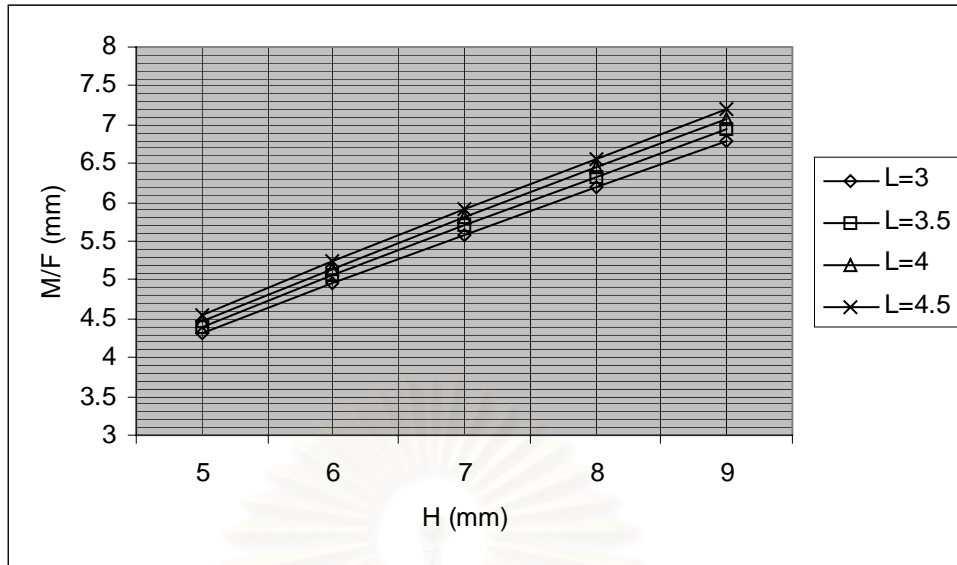
H มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.	L=4.5 มม.
5	4.31	4.39	4.47	4.54
6	4.95	5.06	5.15	5.23
7	5.58	5.70	5.81	5.91
8	6.19	6.33	6.45	6.56
9	6.78	6.94	7.08	7.20

ตารางที่ 11 ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ $R=1$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเป็นต้น

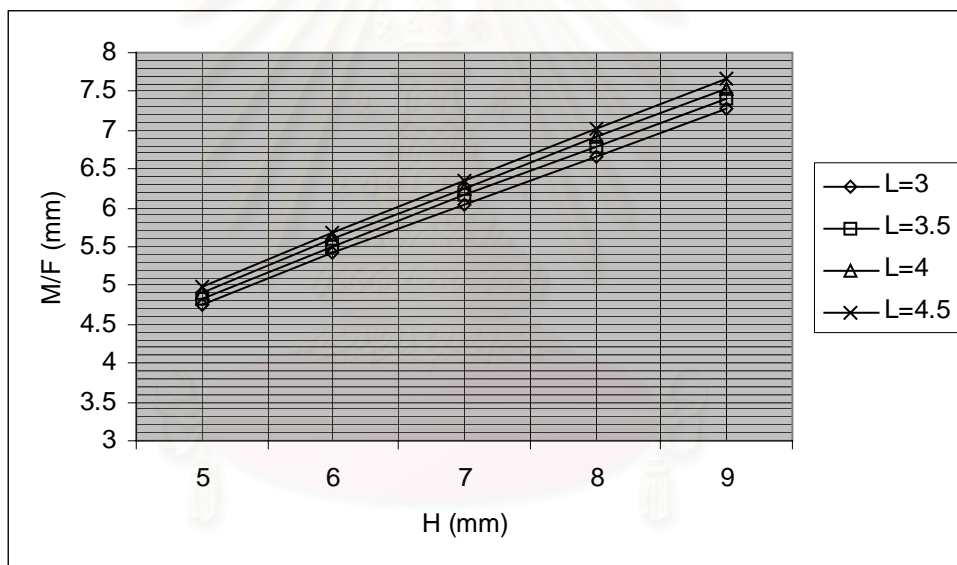
H มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.	L=4.5 มม.
5	4.76	4.84	4.91	4.98
6	5.41	5.51	5.60	5.67
7	6.04	6.16	6.26	6.35
8	6.66	6.79	6.91	7.01
9	7.27	7.41	7.54	7.66

ตารางที่ 12 ค่า M/F ของ T-loop เมื่อ $R=1.5$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเป็นต้น

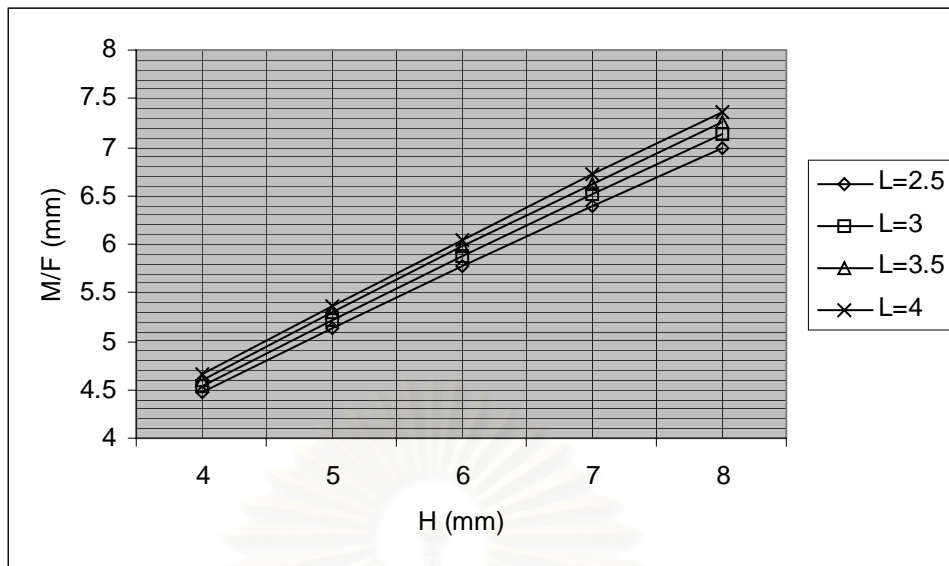
H มม.	L=2.5 มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.
4	4.47	4.54	4.60	4.66
5	5.13	5.22	5.30	5.36
6	5.77	5.88	5.97	6.05
7	6.40	6.52	6.62	6.72
8	7.00	7.14	7.26	7.37



รูปที่ 30 ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=0.5$ มม.



รูปที่ 31 ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=1$ มม.



รูปที่ 32 ค่า M/F ของ T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=1.5$ มม.

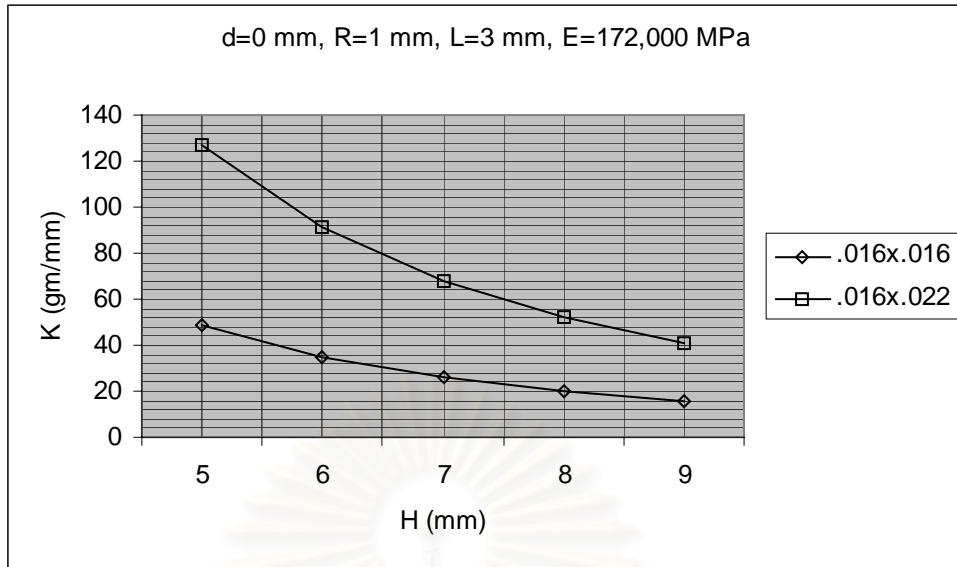
จากการเปรียบเทียบอัตราส่วน M/F เมื่อให้ $H_T \times W$ มีค่าเท่าๆ กัน จะพบว่า R ยิ่งน้อยก็จะยิ่งได้ค่า M/F สูงขึ้น ตัวอย่าง เช่น :-

ถ้าให้ $H_T = W = 10$ มม.:- จากตารางที่ 10: $R = 0.5$ มม., $H = 9$ มม., $L = 4.5$ มม., $M/F = 7.20$ มม. จากตารางที่ 11: $R = 1$ มม., $H = 8$ มม., $L = 4$ มม., $M/F = 6.91$ มม. จากตารางที่ 12: $R = 1.5$ มม., $H = 7$ มม., $L = 3.5$ มม., $M/F = 6.62$ มม.

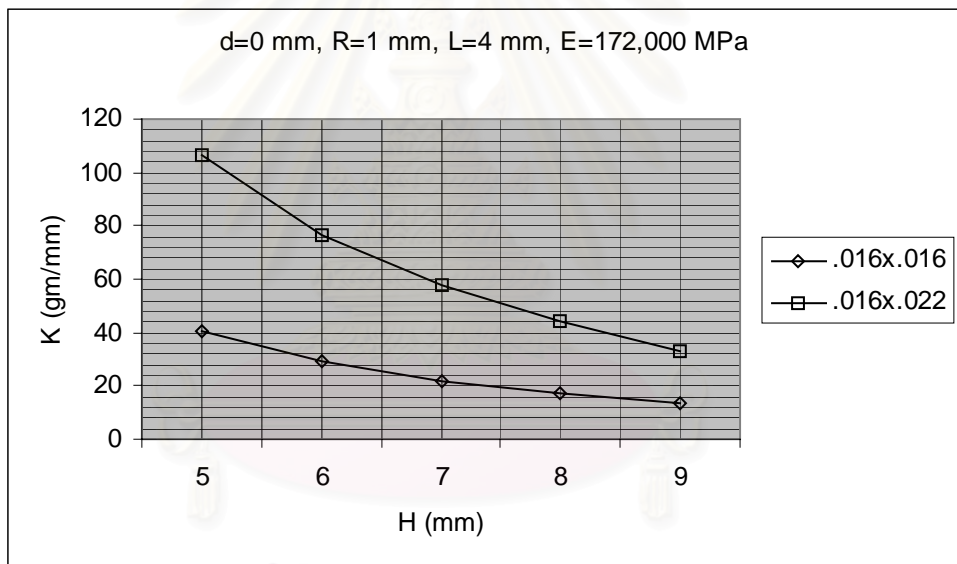
หรือถ้าให้ $H_T = W = 8$ มม.:- จากตารางที่ 10: $R = 0.5$ มม., $H = 7$ มม., $L = 3.5$ มม., $M/F = 5.70$ มม. จากตารางที่ 11: $R = 1$ มม., $H = 6$ มม., $L = 3$ มม., $M/F = 5.41$ มม. จากตารางที่ 12: $R = 1.5$ มม., $H = 5$ มม., $L = 2.5$ มม., $M/F = 5.13$ มม.

จากตารางที่ 10-12 แสดงว่า สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด จะต้องมามีค่า R น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติการตัด T-loop ให้ $R = 0.5$ มม. ทำได้ยากและไม่สะดวก ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะกำหนดให้ใช้ $R = 1$ มม. เป็นค่าต่ำสุด ฉะนั้นสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดของ T-loop คือ $d = 0$ มม., $R = 1$ มม. ส่วนค่า H และ L จะขึ้นอยู่กับความสูงและความกว้างทั้งหมด $H_T \times W$ ที่ทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้ ซึ่งจะวิเคราะห์และแสดงผลเมื่อมีเกเบิลเป็นดัดต่อไป

เพื่อให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งดิ่ง K ของ T-loop ระหว่างการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว และ 0.016×0.022 นิ้ว จึงคำนวณหาค่าความแข็งดิ่งที่ H ต่างๆ กัน โดยให้ความกว้าง W เท่ากับ 8 และ 10 มม. ซึ่งแสดงเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 33 และ 34 ตามลำดับ



รูปที่ 33 ค่าความแข็งตึง K ของ T-loop W=8 มม.



รูปที่ 34 ค่าความแข็งตึง K ของ T-loop W=10 มม.

จากการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด พร้อมทั้งคำนึงถึงข้อจำกัดทางกายวิภาคภายในช่องปาก เมื่อไม่มีเกเบิลเบนด์ สรุปได้ว่าจะต้องใช้ค่า d=0 มม., R=1 มม. และ

$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวบน ซึ่ง H=8 มม., L=4 มม., M/F=6.91 มม.

$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวล่าง ซึ่ง H=6 มม., L=3 มม., M/F=5.41 มม.

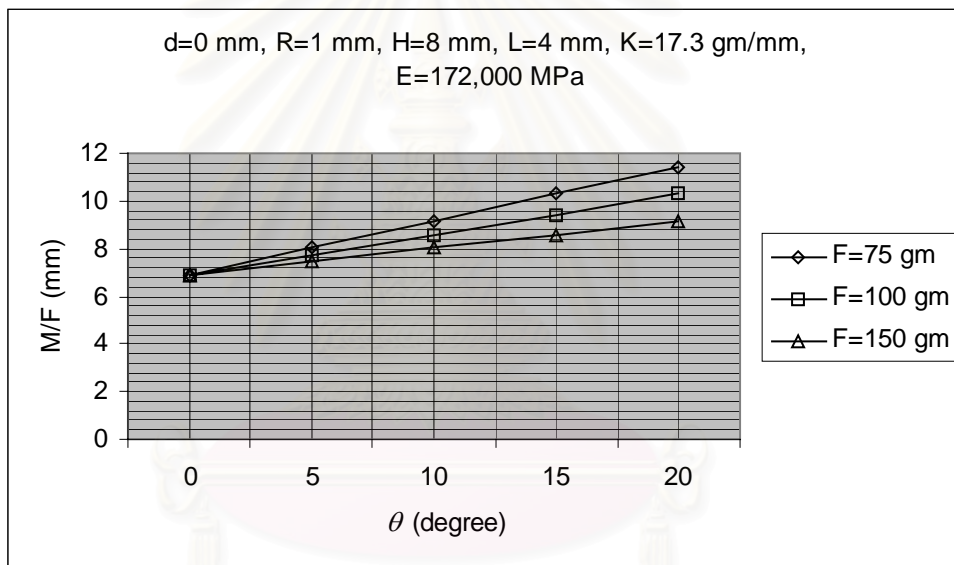
อย่างไรก็ตามถ้าทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้สัดส่วน 8x8 มม. สำหรับฟันเขี้ยวบนด้วยก็ย่อมจะทำได้ โดยใช้ข้อมูล M/F เมื่อมีเกเบิลเบนด์ที่จะแสดงต่อไป

ค่าความแข็งตึงของ T-loop เมื่อใช้สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดสำหรับลวดทั้ง 2 ขนาดคำนวณได้ตามสมการที่ (12) แสดงอยู่ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าความแข็งตึง K (กรัม/มม.) ของ T-loop $d=0$ มม., $R=1$ มม. $E=172,000$ MPa

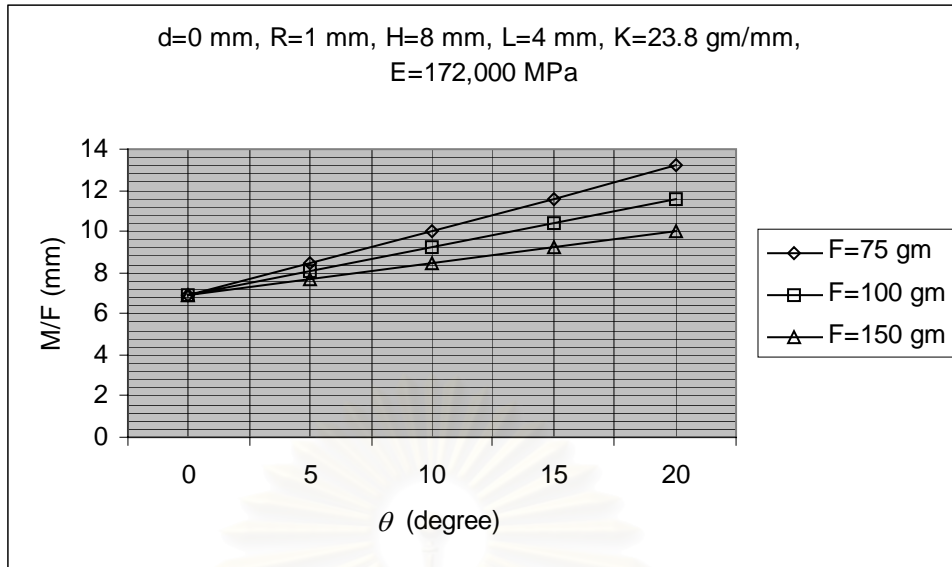
$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. ($H=8$ มม., $L=4$ มม.)		$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. ($H=6$ มม., $L=3$ มม.)	
0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว	0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว
17.3	23.8	35.5	48.8

สำหรับค่า M/F ที่ได้จากการเพิ่มมุมเกบิลของสัดส่วนที่ได้เลือกมาแล้วนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 35-38 แรงที่ใช้ดึงเส้นลวด คือ 75,100 และ 150 กรัม ในการคำนวณเราใช้สมการที่ (11) ที่มุม θ จาก 5 องศาไปจนถึง 20 องศา ส่วนรูปที่ 39-42 แสดงถึงขนาดของโมเมนต์ที่คล้องจองกับรูปที่ 35-38

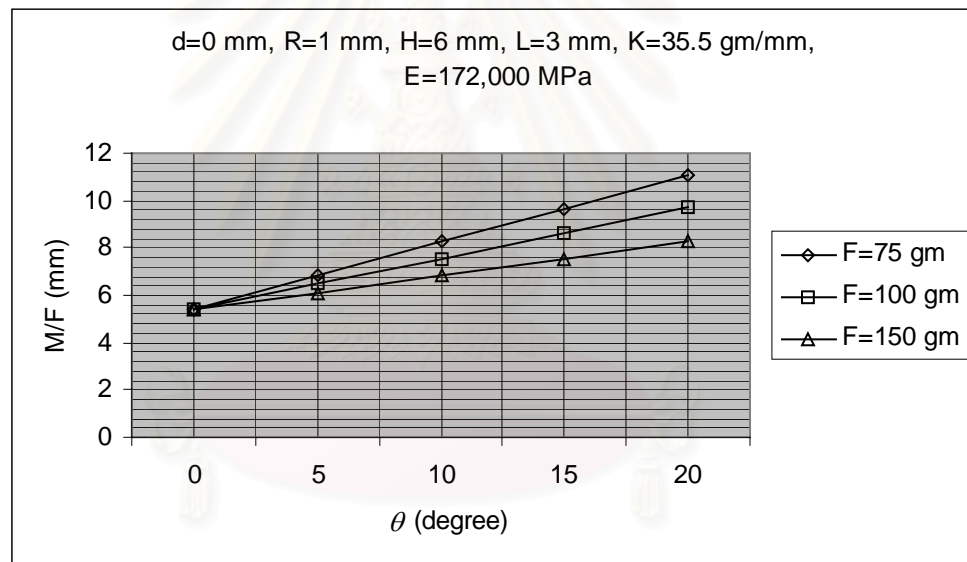


รูปที่ 35 ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

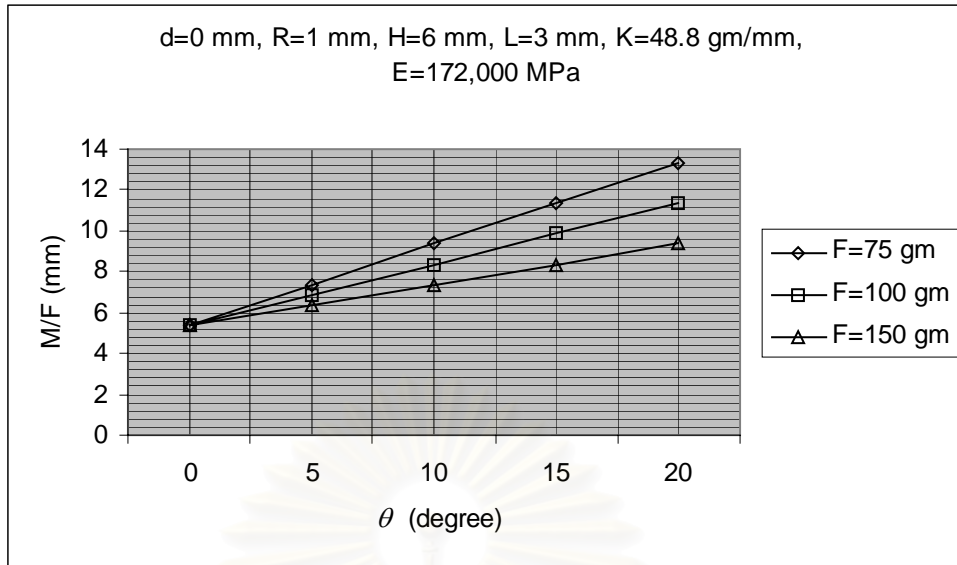


รูปที่ 36 ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)

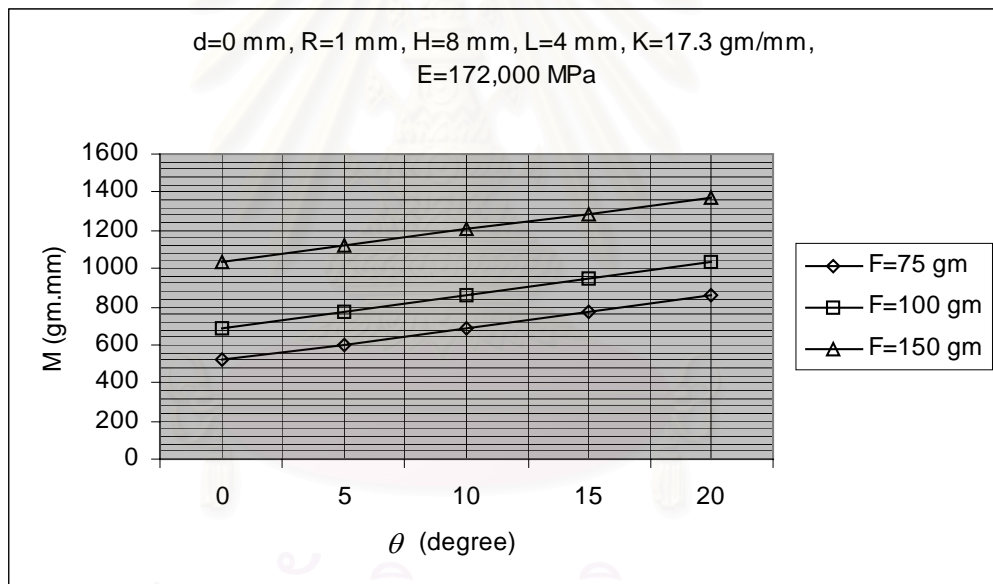


รูปที่ 37 ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)

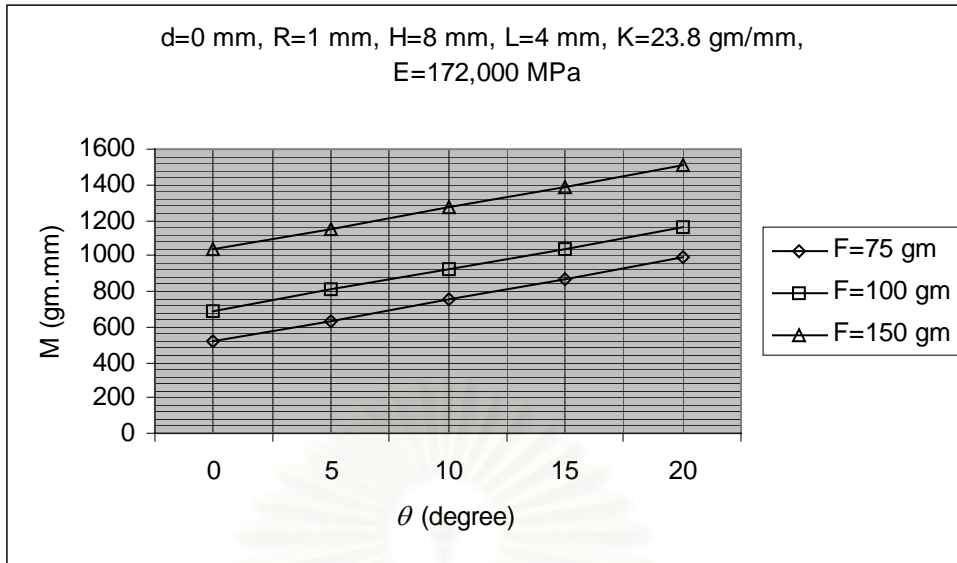
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



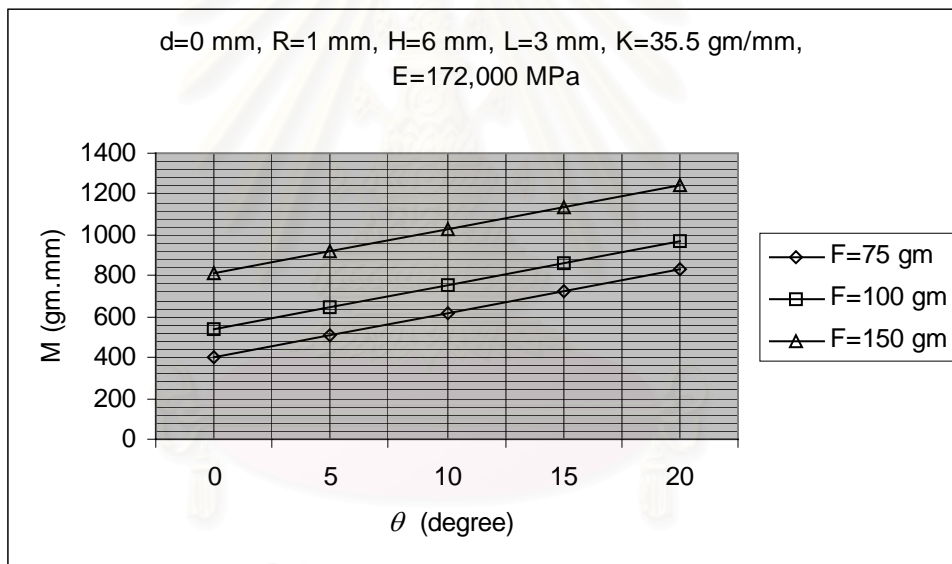
รูปที่ 38 ค่า M/F ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)



รูปที่ 39 โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)

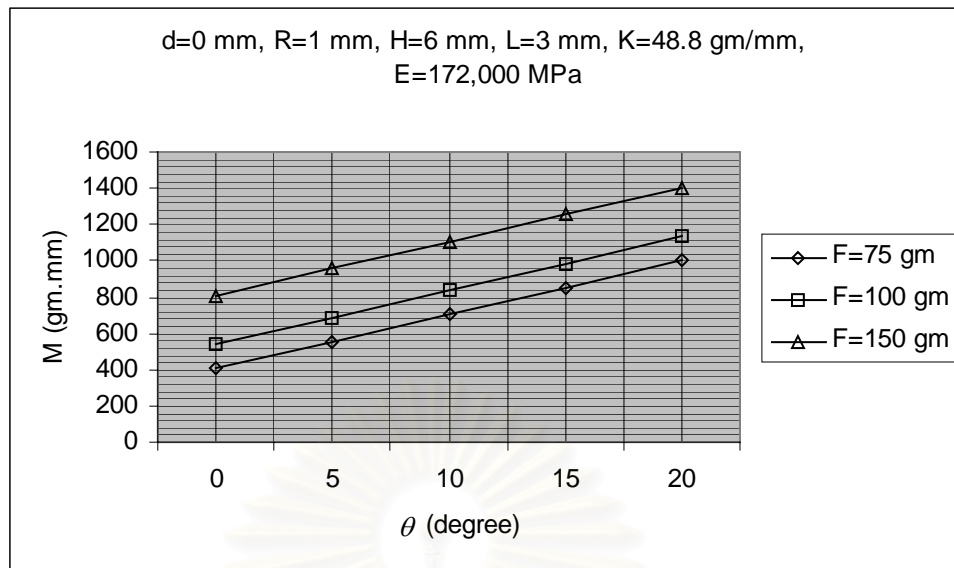


รูปที่ 40 โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)



รูปที่ 41 โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 42 โมเมนต์ของ T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)

Opus90 loop

Siatkowski¹⁸ ศึกษาโคลอสซิงรูปที่นิยมใช้กัน พบว่าไม่มีรูปใดที่ให้อัตราส่วน M/F อยู่ใน ช่วง 8-9 ตามที่ต้องการ โดยไม่ทำเกลียวเป็นค้ ดังนั้นเขาจึงออกแบบรูปใหม่ เรียกว่า Opus90 ดังรูปที่ 14 แต่ก็ยังให้ค่า M/F ต่ำกว่าที่ต้องการ เขาจึงทดลองค้นหาแนวค้ให้เอียงเป็นมุมต่างๆ กันกับแนว ลวดที่สอดอยู่ในร่องของแบรคเกต และพบว่าถ้าให้ขาต้านหนึ่งทำมุม 70 องศา และอีกด้านหนึ่ง 110 องศาแล้ว จะได้ค่า M/F ที่ขาทั้งสองข้างของรูปเท่ากัน โดยไม่ทำเกลียวเป็นค้ รูปนี้มีชื่อว่า Opus70 loop แต่รูปดังกล่าวให้ค่า M/F ในตัวเองเพียง 5.5 มม. เมื่อวางรูปให้ขาต้านใกล้กลางของ รูปห่างจากแบรคเกตที่อยู่ใกล้กลาง 1.5 มม. จะทำให้ค่า M/F ที่ขาต้านใกล้กลางเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 8-9 มม. แต่นั่นเป็นผลจากการวางตำแหน่งของรูปในแนวหน้า-หลัง ไม่ใช่ผลจากสัดส่วนของรูป เพียงอย่างเดียว

ในการกำหนดสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดของ Opus90 loop จะดำเนินการในลักษณะ เดียวกันกับของ vertical helical loop นั่นคือ ศึกษาค่า M/F ของรูปในขณะที่ยังไม่มีการให้เกลียวเป็นค้ โดยการให้เทอม $EI\theta / F$ ในสมการที่ (13) เท่ากับศูนย์ ในการกำหนดสัดส่วนของรูป จะต้องคำนึงถึง ข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปากและเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างรูปที่มีขนาดสูงxกว้างเท่าๆ กัน ซึ่งเขียนเป็นสมการตามรูปที่ 14 ได้ดังนี้ คือ :-

$$H+2R = H_T \quad (22)$$

$$L+2R = W \quad (23)$$

โดยที่ H_T และ W เป็นความสูงและความกว้างทั้งหมดของรูป เนื่องจากข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปาก ค่า H_T และ W สูงสุดสำหรับฟันเขี้ยวบนและล่างคือ 10 และ 8 มม. ตามลำดับ

ขั้นแรกให้ศึกษาถึงผลของค่า R ว่ามีผลอย่างไรกับค่า M/F โดยมีเกบิลเบิร์ต ($\theta = 0$) โดยคำนวณหา M/F ตามสมการที่ (13) เพื่อหาค่า R ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อทดลองให้ $R = 0.5, 1$ และ 1.5 มม. จะได้ผลดังแสดงอยู่ในตารางที่ 14-16 และแสดงเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 33-35 ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ $R=0.5$ มม. ไม่มีเกบิลเบิร์ต

H มม.	L=6 มม.	L=7 มม.	L=8 มม.	L=9 มม.
6	5.09	5.18	5.26	5.33
7	5.74	5.85	5.94	6.02
8	6.37	6.49	6.60	6.69
9	6.99	7.12	7.24	7.35

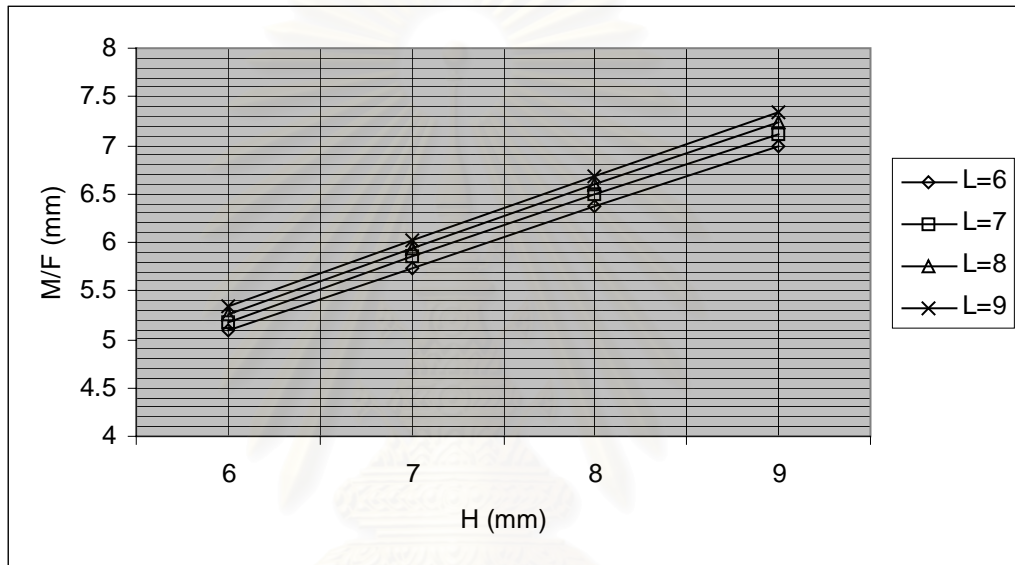
ตารางที่ 15 ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ $R=1$ มม. ไม่มีเกบิลเบิร์ต

H มม.	L=6 มม.	L=7 มม.	L=8 มม.	L=9 มม.
6	5.67	5.74	5.81	5.87
7	6.34	6.43	6.50	6.57
8	7.00	7.09	7.18	7.26
9	7.63	7.74	7.84	7.93

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

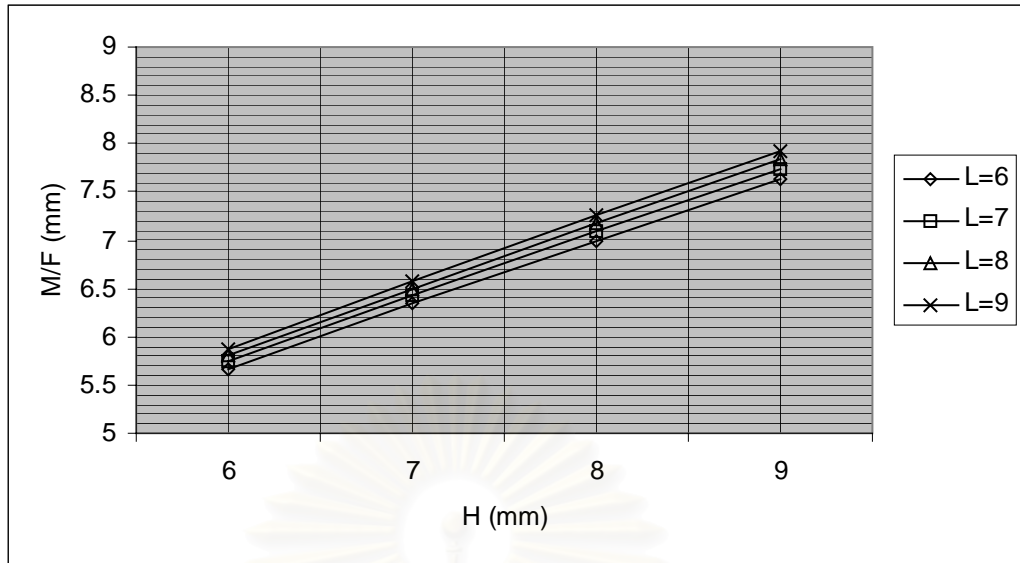
ตารางที่ 16 ค่า M/F ของ Opus90 loop เมื่อ R=1.5 มม. ไม่มีเกเบิลเบนด์

H มม.	L=6 มม.	L=7 มม.	L=8 มม.	L=9 มม.
6	6.24	6.30	6.35	6.40
7	6.93	7.00	7.06	7.12
8	7.60	7.68	7.75	7.82
9	8.26	8.35	8.43	8.51

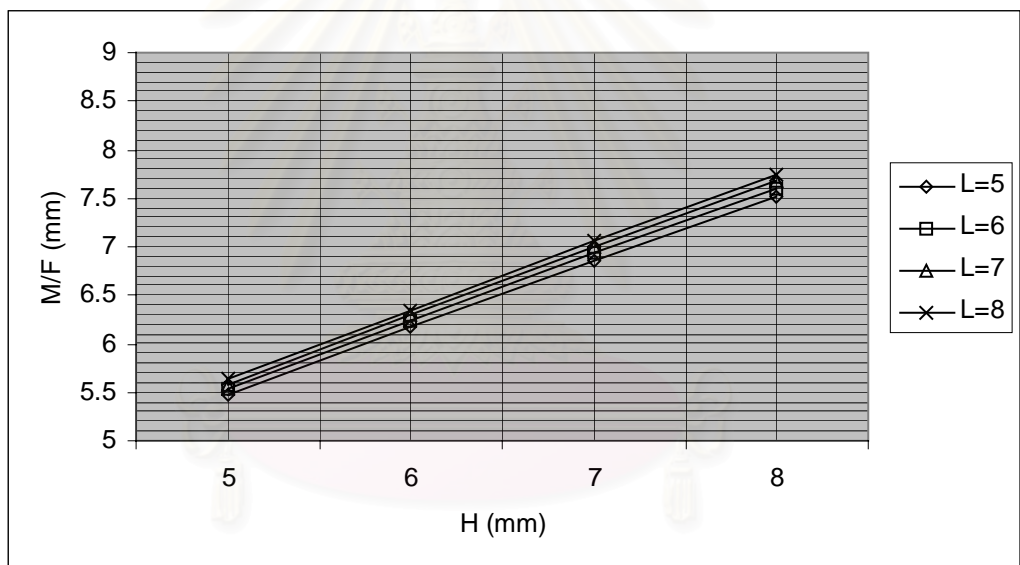


รูปที่ 43 ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเบนด์ R=0.5 มม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 44 ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด R=1 มม.



รูปที่ 45 ค่า M/F ของ Opus90 loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด R=1.5 มม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

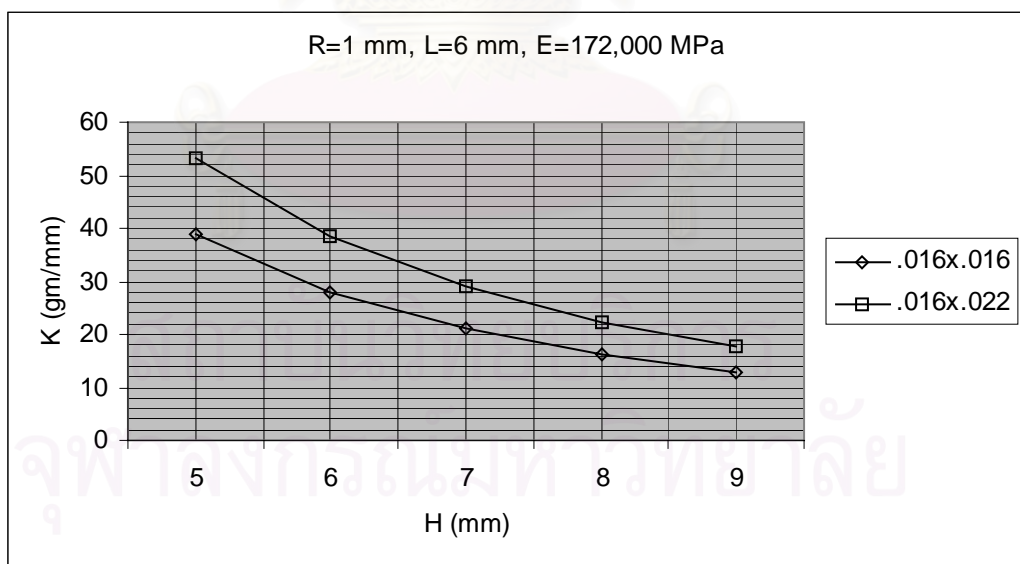
จากการเปรียบเทียบอัตราส่วน M/F เมื่อให้ $H_T \times W$ มีค่าเท่าๆ กัน จะพบว่า R ยิ่งน้อยก็จะยิ่งได้ค่า M/F สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น

ถ้าให้ $H_T = W = 10$ มม.:- จากตารางที่ 14: R = 0.5 มม., H = 9 มม., L = 9 มม., M/F = 7.35 มม.
จากตารางที่ 15: R = 1 มม., H = 8 มม., L = 8 มม., M/F = 7.18 มม. จากตารางที่ 16: R = 1.5 มม., H = 7 มม., L = 7 มม., M/F = 7.00 มม.

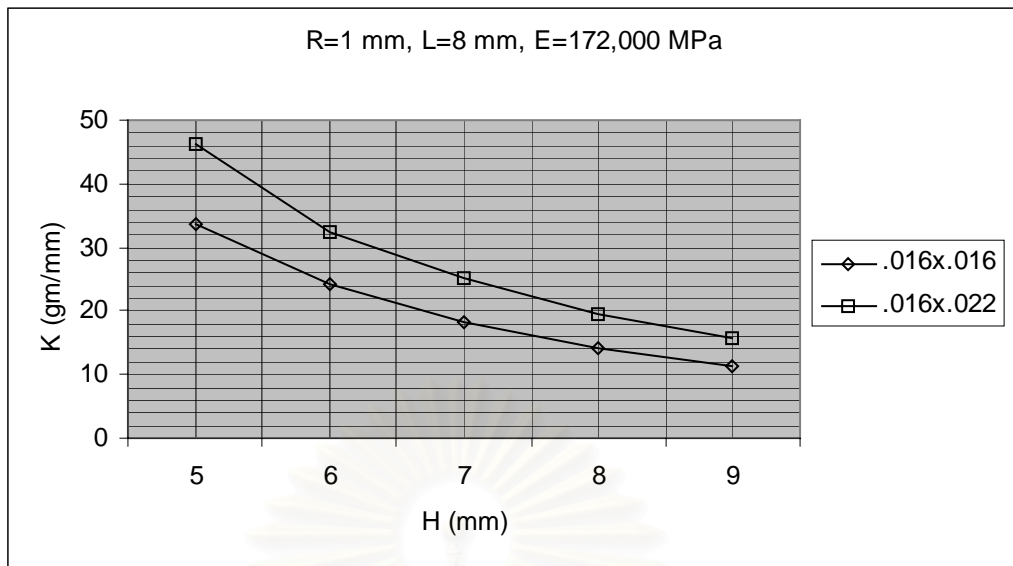
หรือถ้าให้ $H_T = W = 8$ มม.:- จากตารางที่ 14: R = 0.5 มม., H = 7 มม., L = 7 มม., M/F = 5.85 มม.
จากตารางที่ 15: R = 1 มม., H = 6 มม., L = 6 มม., M/F = 5.67 มม. จากตารางที่ 16: R = 1.5 มม., H = 5 มม., L = 5 มม., M/F = 5.48 มม.

จากตารางที่ 14-16 แสดงว่า สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด จะต้องมียุค R น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติการตัด Opus90 loop ให้ R = 0.5 มม. ทำได้ยากและไม่สะดวก ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะกำหนดให้ใช้ R = 1 มม. เป็นค่าต่ำสุด ฉะนั้นสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด ของ Opus90 loop คือ R = 1 มม. ส่วนค่า H และ L จะขึ้นอยู่กับความสูงและความกว้างทั้งหมด $H_T \times W$ ที่ทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์และแสดงผลเมื่อมีเกเบิลเป็นค้ต่อไป

เพื่อให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งตึง K ของ Opus90 loop ระหว่างการใช้ลวดขนาด 0.016x0.016 นิ้ว และ 0.016x0.022 นิ้ว จึงคำนวณหาค่าความแข็งตึงที่ H ต่างๆ กัน พร้อมเขียนเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 46 และ 47 โดยให้ความกว้าง W เท่ากับ 8 และ 10 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 46 ค่าความแข็งตึง K ของ Opus90 loop W=8 มม.



รูปที่ 47 ค่าความแข็งตึง K ของ Opus90 loop W=10 มม.

จากการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด พร้อมทั้งคำนึงถึงข้อจำกัดทางกายวิภาคภายในช่องปาก เมื่อไม่มีเกเบิลเบนด์ สรุปได้ว่าจะต้องใช้ค่า R = 1 มม. และ

$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวบน ซึ่ง H = 8 มม., L = 8 มม., M/F = 7.18 มม.

$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวล่าง ซึ่ง H = 6 มม., L = 6 มม., M/F = 5.67 มม.

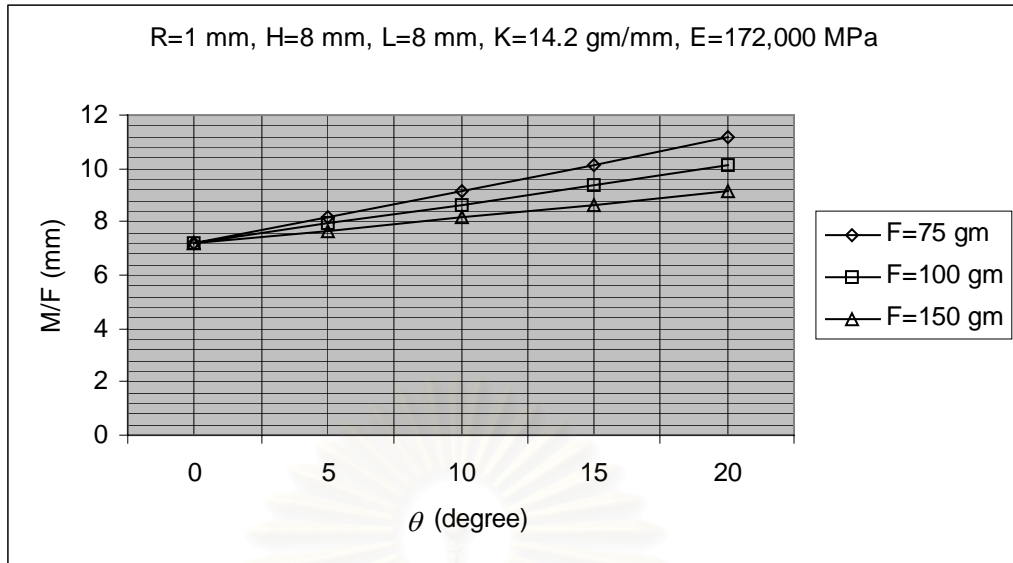
อย่างไรก็ตามถ้าทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้สัดส่วน 8x8 มม. สำหรับฟันเขี้ยวบนด้วยก็ย่อมจะทำได้ โดยใช้ข้อมูล M/F เมื่อมีเกเบิลเบนด์ที่จะแสดงต่อไป

ค่าความแข็งตึงของ Opus90 loop เมื่อใช้สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดสำหรับลวดทั้ง 2 ขนาดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (14) แสดงอยู่ในตารางที่ 17

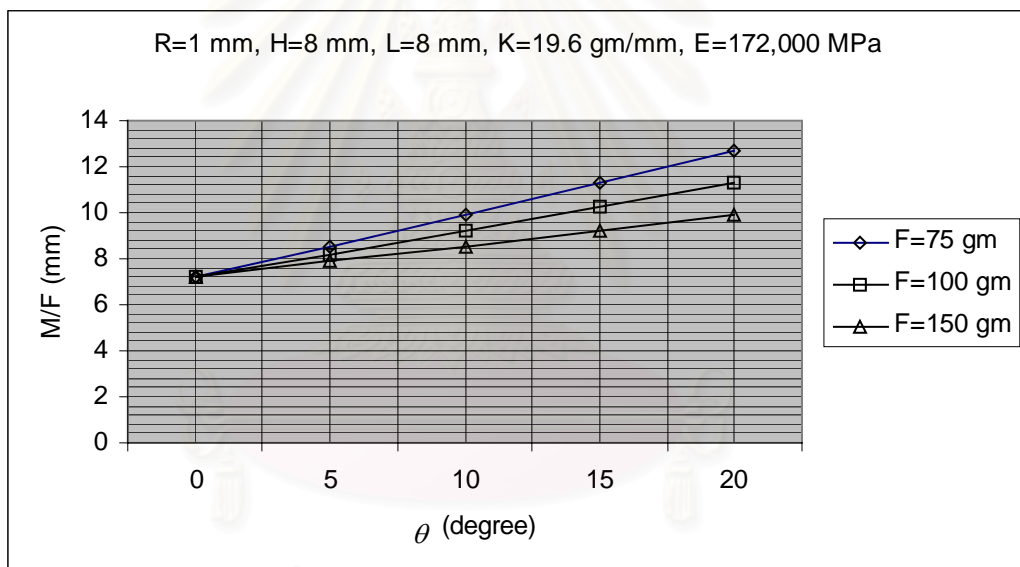
ตารางที่ 17 ค่าความแข็งตึง K (กรัม/มม.) ของ Opus90 loop R=1 มม. E=172,000 MPa

$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. (H=8 มม., L=8 มม.)		$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. (H=6 มม., L=6 มม.)	
0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว	0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว
14.2	19.6	27.9	38.4

สำหรับค่า M/F ที่ได้จากการเพิ่มมุมเกเบิลของสัดส่วนที่ได้เลือกมาแล้วนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 48-51 แรงที่ใช้ดึงเส้นลวดคือ 75, 100 และ 150 กรัม ในการคำนวณจะใช้สมการที่ (13) ที่มุม θ จาก 5 องศาไปจนถึง 20 องศา ส่วนรูปที่ 52-55 แสดงถึงขนาดของโมเมนต์ที่คล้องจอบกับรูปที่ 48-51

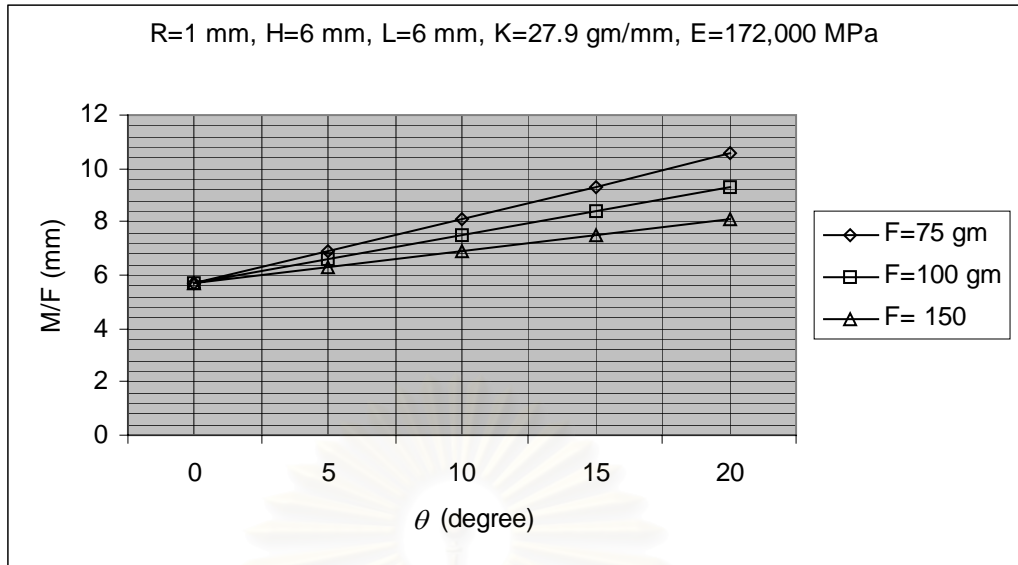


รูปที่ 48 ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)

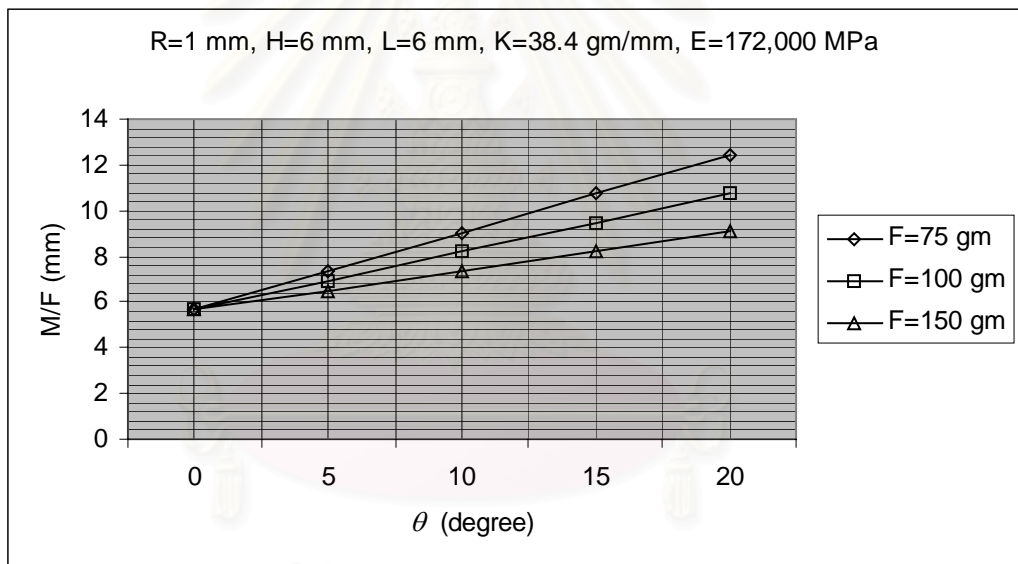


รูปที่ 49 ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

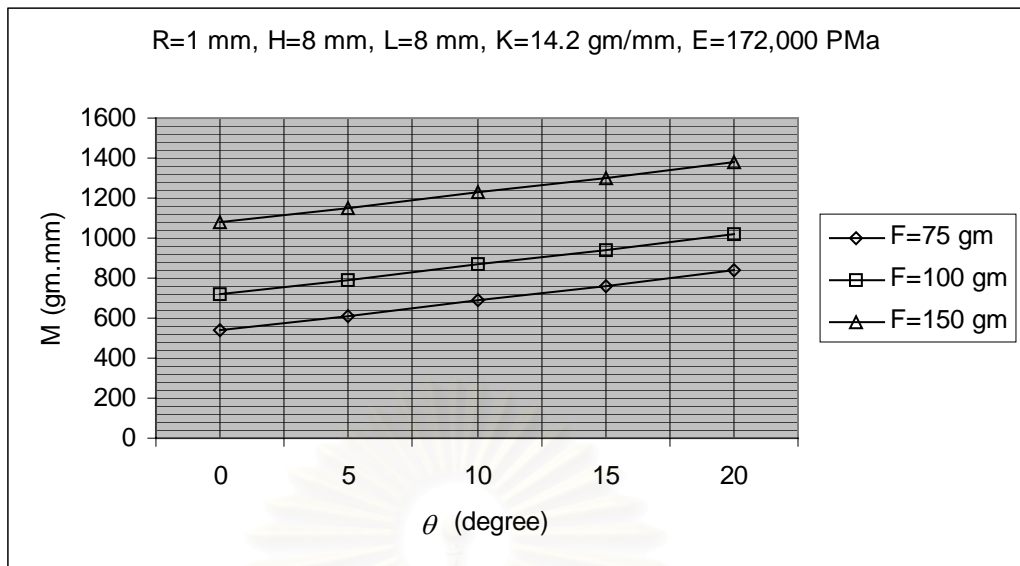


รูปที่ 50 ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)

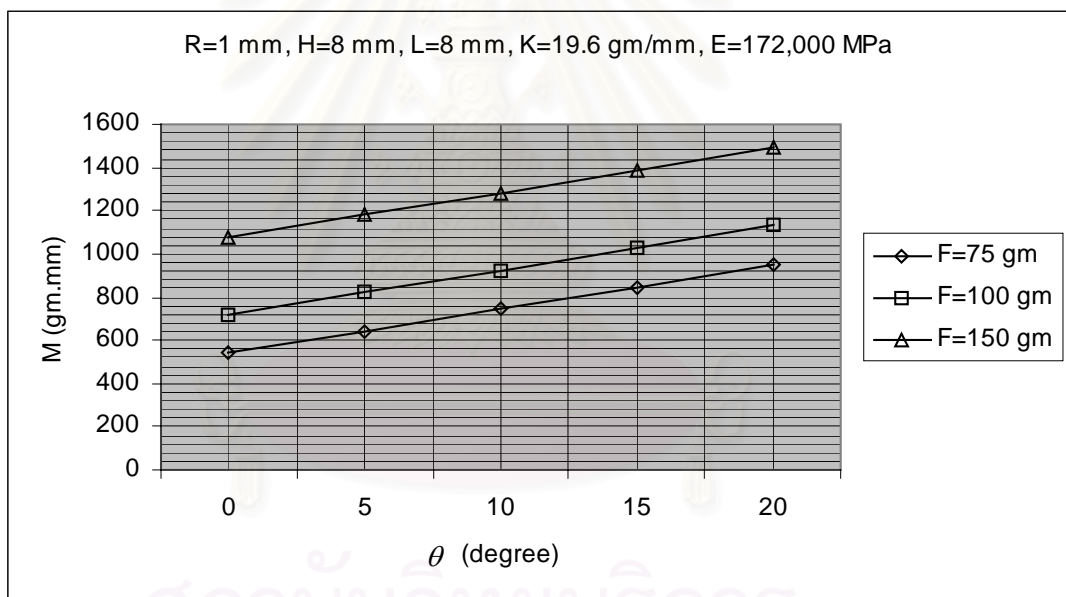


รูปที่ 51 ค่า M/F ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)

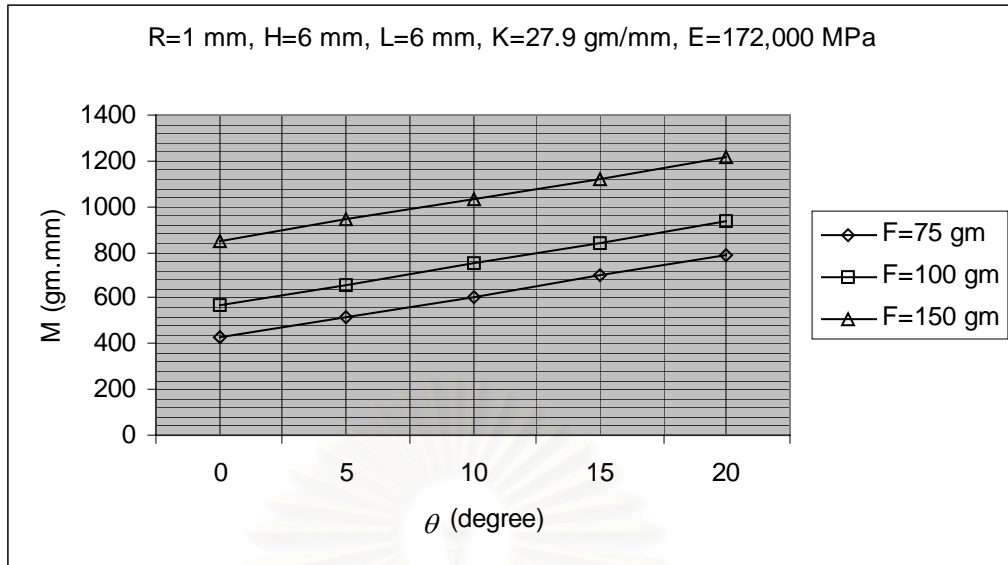
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



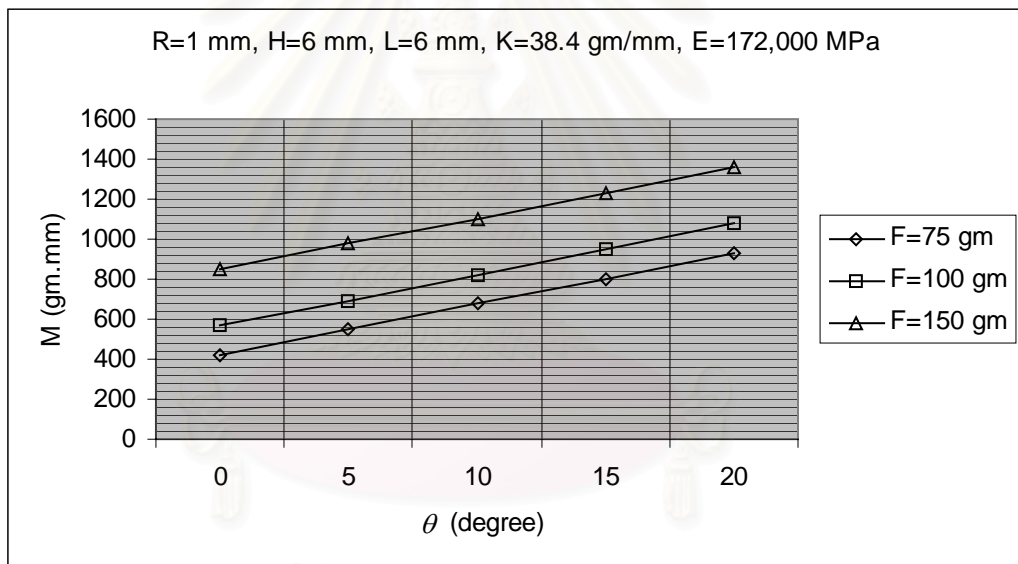
รูปที่ 52 โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)



รูปที่ 53 โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)



รูปที่ 54 โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)



รูปที่ 55 โมเมนต์ของ Opus90 loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Helical T-loop

ในการกำหนดสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดของ helical T-loop จะดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับของ vertical helical loop นั่นคือศึกษาค่า M/F ของลูปในขณะที่ยังไม่มีเกเบิลเป็นต้น โดยให้การให้เทอม $EI\theta/F$ ในสมการที่ (15) เท่ากับศูนย์ ในการกำหนดสัดส่วนของลูป จะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปากและเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างลูปที่มีขนาดสูงxกว้างเท่าๆกัน ซึ่งเขียนเป็นสมการตามรูปที่ 15 ได้ดังนี้คือ:-

$$H+2R = H_T \quad (24)$$

$$2L+2R+d = W \quad (25)$$

โดยที่ H_T และ W เป็นความสูงและความกว้างทั้งหมดของลูป เนื่องข้อจำกัดทางกายวิภาคของช่องปาก ค่า H_T และ W สูงสุดสำหรับฟันเขี้ยวบนและล่างคือ 10 และ 8 มม. ตามลำดับ

ขั้นแรกให้ศึกษาถึงผลของระยะห่างระหว่างขาของลูป d ว่ามีผลอย่างไรกับค่า M/F โดยกำหนดให้ขนาดสูงxกว้างของลูปที่นำมาเปรียบเทียบเท่ากัน ในที่นี้เลือกใช้ค่า $H_T = W = 10$ มม. ถ้าให้รัศมี $R = 1$ มม. แล้ว ตามสมการที่ (24) จะได้ $H = 8$ มม. ผลการคำนวณเปรียบเทียบ M/F โดยไม่มีเกเบิลเป็นต้น ($\theta = 0$) แสดงอยู่ในตารางที่ 18 ซึ่งจะพบว่า $d = 0$ มม. ให้อัตราส่วน M/F สูงสุด แต่ค่า M/F ที่ระยะห่างระหว่างขาของลูป d ต่างๆ ก็ได้แตกต่างกันมากนัก การสร้างลูปให้ $d = 0$ มม. ยังจะมีผลดีต่อการทำงานของทันตแพทย์จัดฟันอีกด้วย เพราะจะช่วยให้การวัดระยะที่เอกทิวเทในแต่ละครั้ง และการติดตามผลการเคลื่อนที่ของฟันสะดวกขึ้น ดังนั้นสมการที่ (25) จึงกลายเป็น

$$L+R = W/2 \quad (26)$$

ตารางที่ 18 ผลของค่า d ที่มีต่อ M/F ของ helical T-loop เมื่อ $H_T=W=10$ มม., $R=1$ มม., $H=8$ มม.

d มม.	L=4 มม.	L=3.5 มม.	L=3 มม.
0	7.43		
1		7.41	
2			7.40

ในการศึกษาเพื่อหาค่า R ที่เหมาะสมที่สุด ให้คำนวณหา M/F ตามสมการที่ (15) โดยไม่มีเกเบิลเป็นต้น เมื่อทดลองให้ $R = 0.5, 1$ และ 1.5 มม. ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 19-21 และแสดงเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 56-58 ตามลำดับ

ตารางที่ 19 ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ $R=0.5$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเบนด์

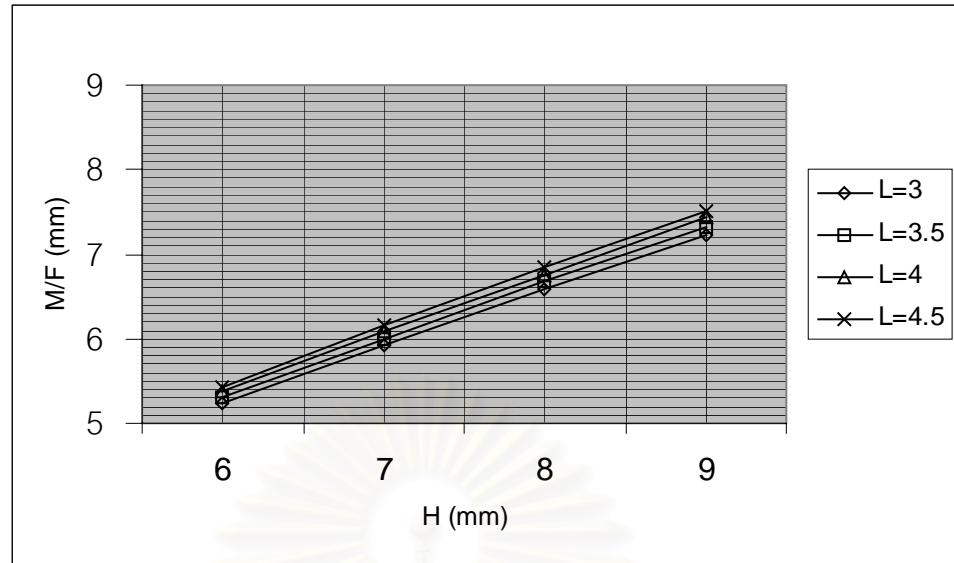
H มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.	L=4.5 มม.
6	5.24	5.31	5.38	5.43
7	5.92	6.00	6.08	6.15
8	6.58	6.67	6.76	6.84
9	7.22	7.33	7.43	7.52

ตารางที่ 20 ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ $R=1$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเบนด์

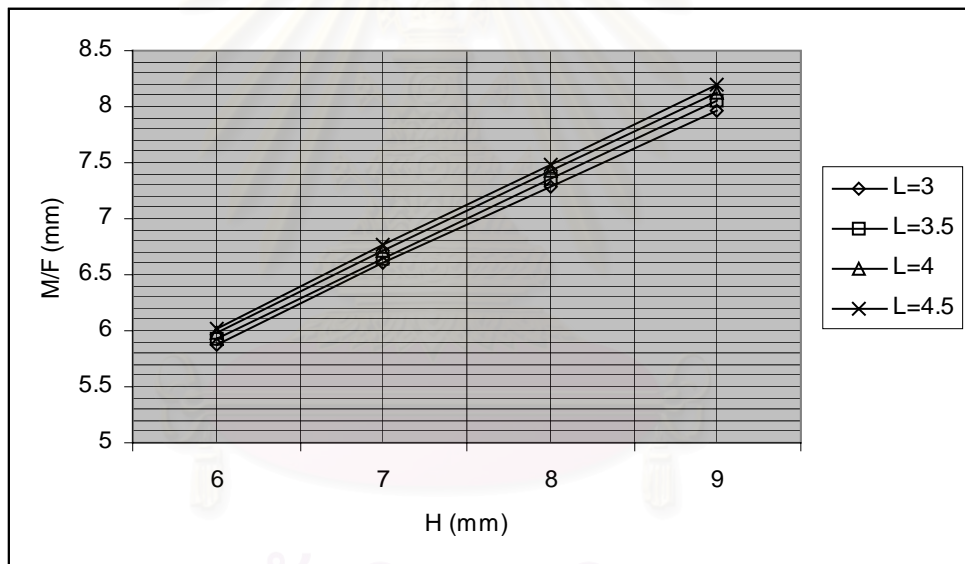
H มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.	L=4.5 มม.
6	5.88	5.93	5.98	6.02
7	6.60	6.65	6.71	6.76
8	7.29	7.36	7.42	7.49
9	7.97	8.05	8.13	8.19

ตารางที่ 21 ค่า M/F ของ helical T-loop เมื่อ $R=1.5$ มม., $d=0$ มม. ไม่มีเกเบิลเบนด์

H มม.	L=2.5 มม.	L=3 มม.	L=3.5 มม.	L=4 มม.
5	5.67	5.70	5.73	5.76
6	6.43	6.47	6.50	6.54
7	7.16	7.21	7.26	7.30
8	7.88	7.94	9.99	8.04

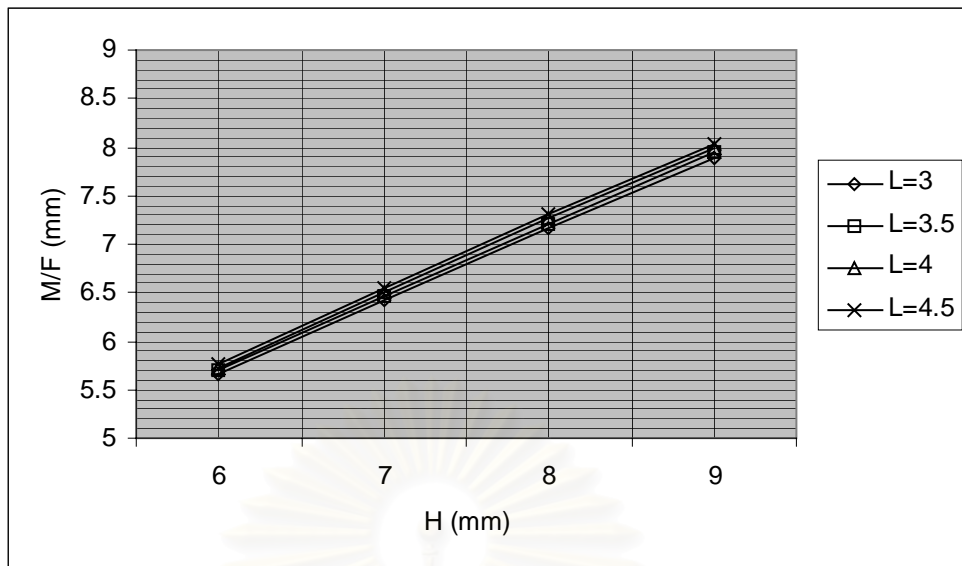


รูปที่ 56 ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=0.5$ มม.



รูปที่ 57 ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=1$ มม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 58 ค่า M/F ของ helical T-loop ไม่มีเกเบิลเป็นดัด $d=0$ มม., $R=1.5$ มม.

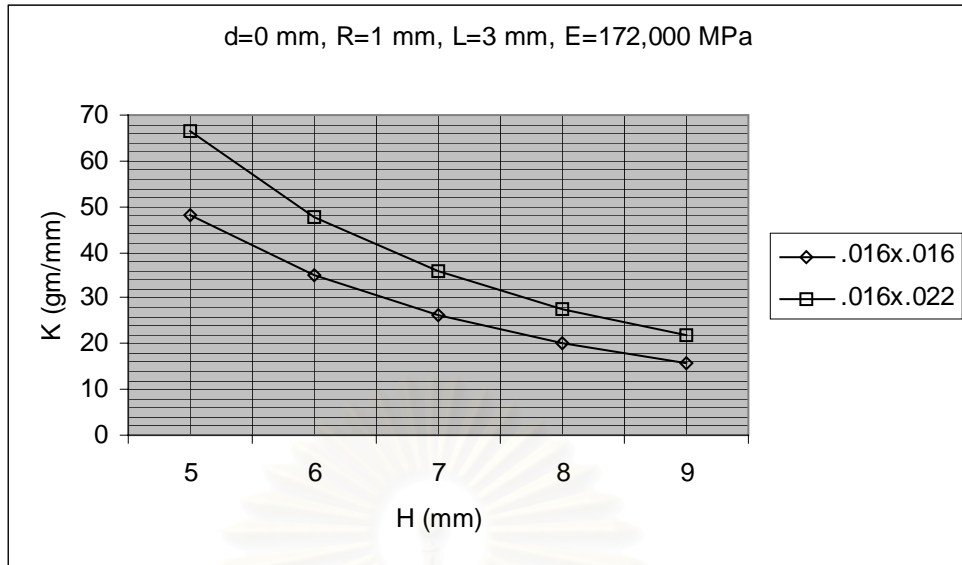
จากการเปรียบเทียบอัตราส่วน M/F เมื่อให้ $H_T \times W$ มีค่าเท่าๆ กัน จะพบว่า R ยิ่งน้อยก็จะยิ่งได้ค่า M/F สูงขึ้น ตัวอย่าง เช่น :-

ถ้าให้ $H_T = W = 10$ มม.:- จากตารางที่ 19: $R = 0.5$ มม., $H = 9$ มม., $L = 4.5$ มม., $M/F = 7.52$ มม. จากตารางที่ 20: $R = 1$ มม., $H = 8$ มม., $L = 4$ มม., $M/F = 7.43$ มม. จากตารางที่ 21: $R = 1.5$ มม., $H = 7$ มม., $L = 3.5$ มม., $M/F = 7.26$ มม.

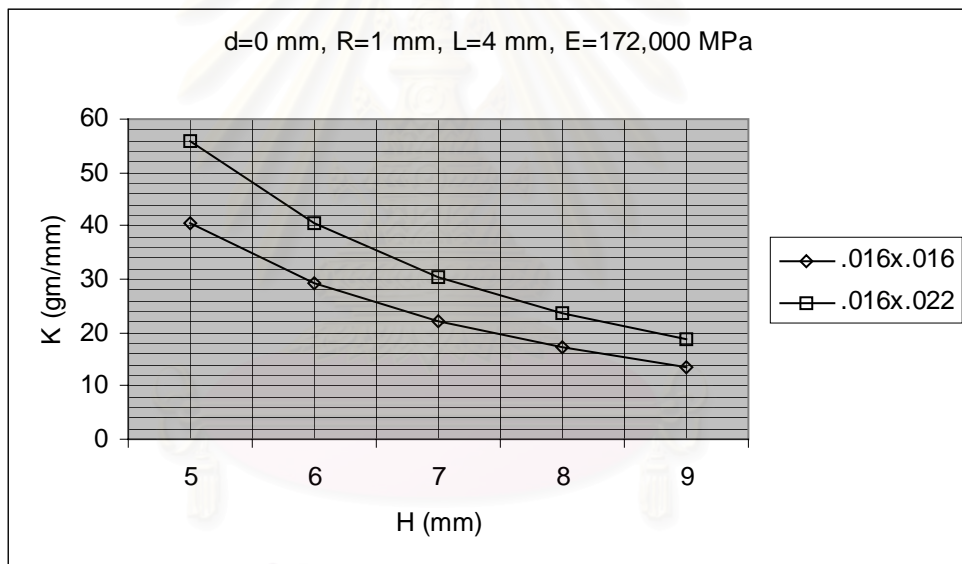
หรือถ้าให้ $H_T = W = 8$ มม.:- จากตารางที่ 19: $R = 0.5$ มม., $H = 7$ มม., $L = 3.5$ มม., $M/F = 6.00$ มม. จากตารางที่ 20: $R = 1$ มม., $H = 6$ มม., $L = 3$ มม., $M/F = 5.88$ มม., จากตารางที่ 21: $R = 1.5$ มม., $H = 5$ มม., $L = 2.5$ มม., $M/F = 5.67$ มม.

จากตารางที่ 19-21 สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด จะต้องมามีค่า R น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติการตัด helical T-loop ให้ $R = 0.5$ มม. ทำได้ยากและไม่สะดวก ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะกำหนดให้ใช้ $R = 1$ มม. เป็นค่าต่ำสุด ฉะนั้นสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด ของ helical T-loop คือ $d = 0$ มม., $R = 1$ มม. ส่วนค่า H และ L จะขึ้นอยู่กับความสูงและความกว้างทั้งหมด $H_T \times W$ ที่ทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้ ซึ่งจะวิเคราะห์และแสดงผลเมื่อมีเกเบิลเป็นดัดต่อไป

เพื่อให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งดึง K ของ helical T-loop ระหว่างการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว และ 0.016×0.022 นิ้ว จึงคำนวณหาค่าความแข็งดึงที่ค่า H ต่างๆ กัน โดยให้ความกว้าง W เท่ากับ 8 และ 10 มม. ซึ่งแสดงเป็นกราฟอยู่ในรูปที่ 59 และ 60 ตามลำดับ



รูปที่ 59 ค่าความแข็งตึง K ของ helical T- loop W=8 มม.



รูปที่ 60 ค่าความแข็งตึง K ของ helical T- loop W=10 มม.

จากการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด พร้อมทั้งคำนึงถึงข้อจำกัดทางกายวิภาคภายในช่องปาก เมื่อไม่มีเกเบิลเป็นค้ สรุปได้ว่าจะต้องใช้ค่า d=0 มม., R=1 มม. และ

$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวบน ซึ่ง H=8 มม., L=4 มม., M/F=7.43 มม.

$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. สำหรับฟันเขี้ยวล่าง ซึ่ง H=6 มม., L=3 มม., M/F=5.88 มม.

อย่างไรก็ตามถ้าทันตแพทย์จัดฟันจะเลือกใช้สัดส่วน 8x8 มม. สำหรับฟันเขี้ยวบนด้วยก็ย่อมจะทำได้ โดยใช้ข้อมูล M/F เมื่อมีเกเบิลเป็นค้ที่จะแสดงต่อไป

ค่าความแข็งตึงของ helical T-loop เมื่อใช้สัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดสำหรับลวดทั้งสองขนาด คำนวณได้ตามสมการที่ (16) แสดงอยู่ในตารางที่ 22

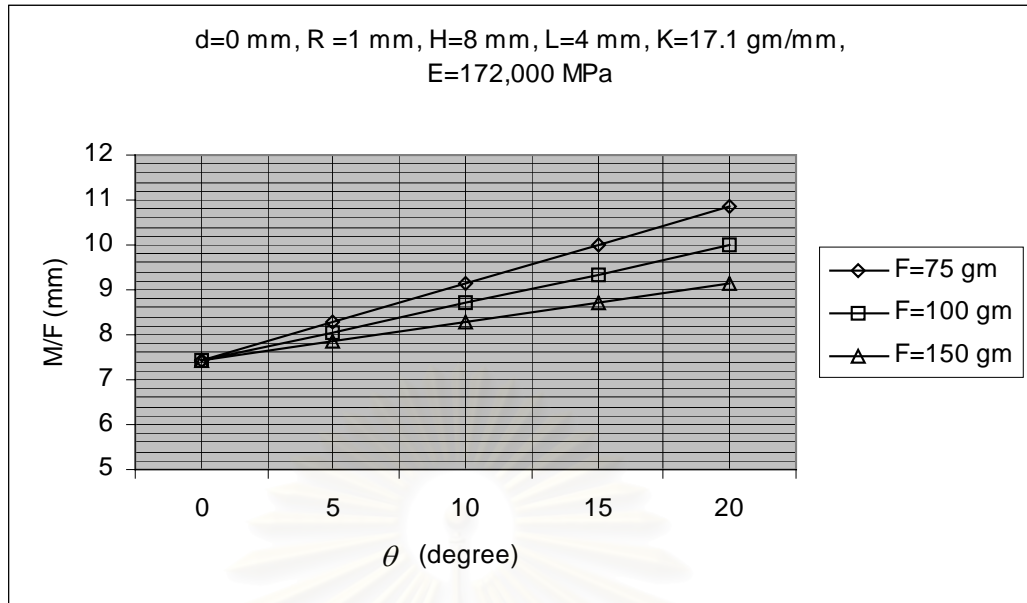
ตารางที่ 22 ค่าความแข็งตึง K (กรัม/มม.) ของ helical T-loop $d=0$ มม., $R=1$ มม. $E=172,000$ MPa

$H_T \times W = 10 \times 10$ มม. ($H=8$ มม., $L=4$ มม.)		$H_T \times W = 8 \times 8$ มม. ($H=6$ มม., $L=3$ มม.)	
0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว	0.016x0.016 นิ้ว	0.016x0.022 นิ้ว
17.1	23.5	34.8	47.9

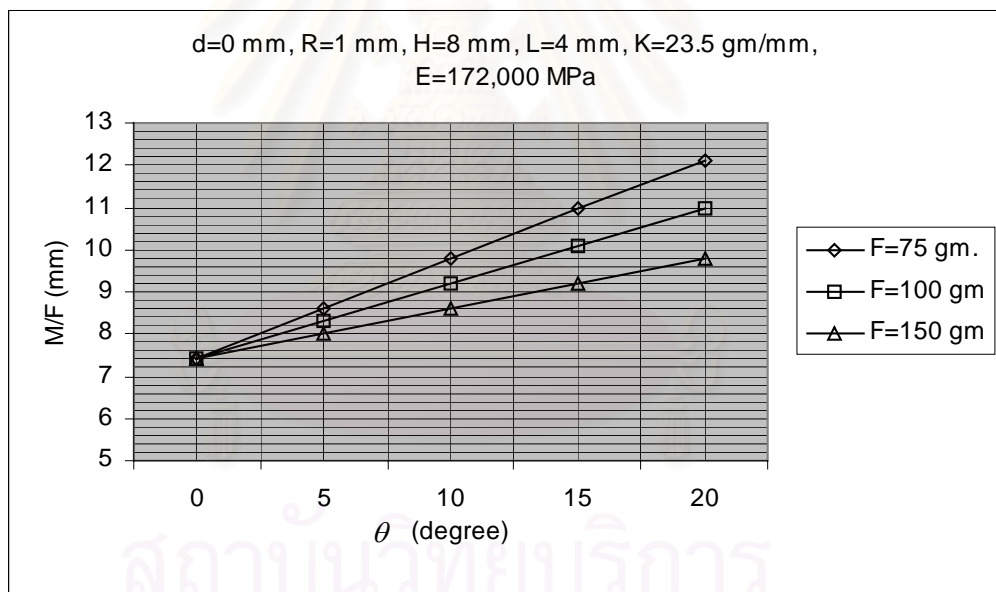
สำหรับค่า M/F ที่ได้จากการเพิ่มมุมเกลียวของสัคส่วนที่ได้เลือกมาแล้วนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 61-64 แรงที่ใช้ดึงเส้นลวดคือ 75, 100 และ 150 กรัม ในการคำนวณเราใช้สมการที่ (15) ที่มุม θ จาก 5 องศาไปจนถึง 20 องศา ส่วนรูปที่ 65-68 แสดงถึงขนาดของโมเมนต์ที่คล้องจองกับรูปที่ 61-64



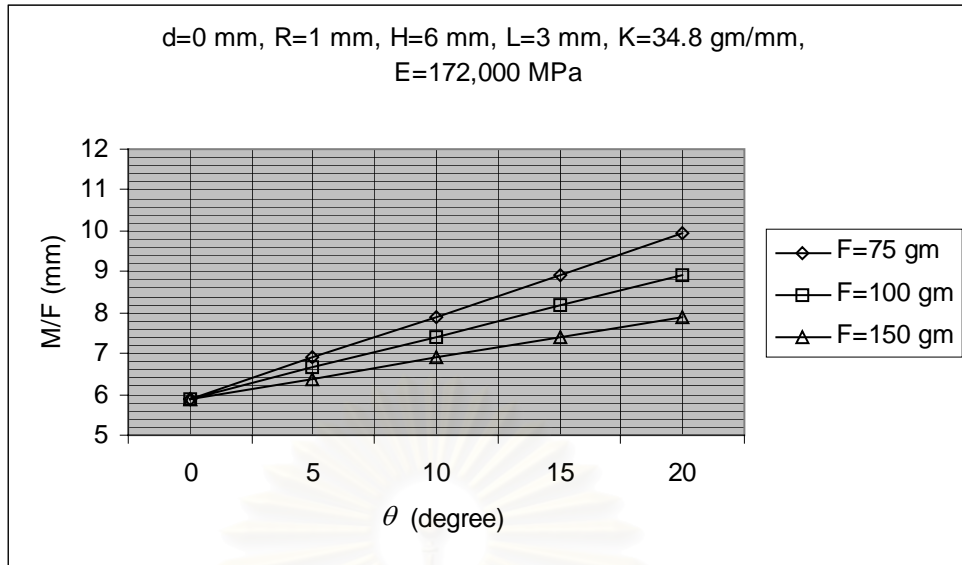
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



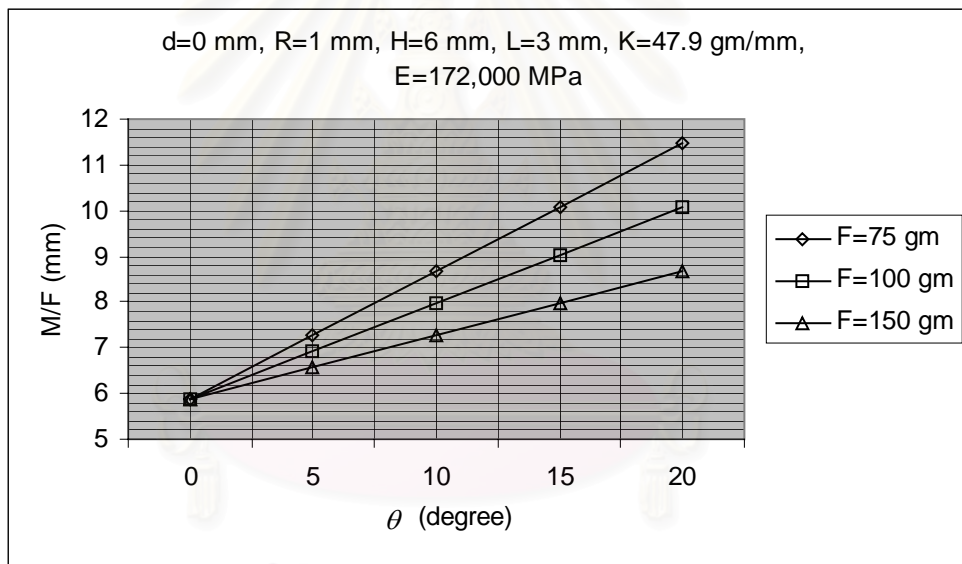
รูปที่ 61 ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)



รูปที่ 62 ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)

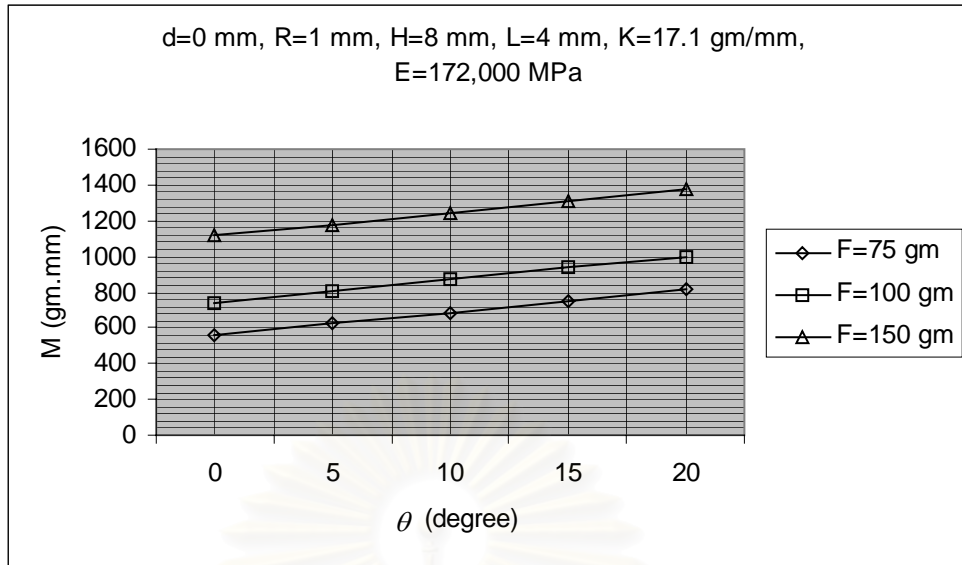


รูปที่ 63 ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)

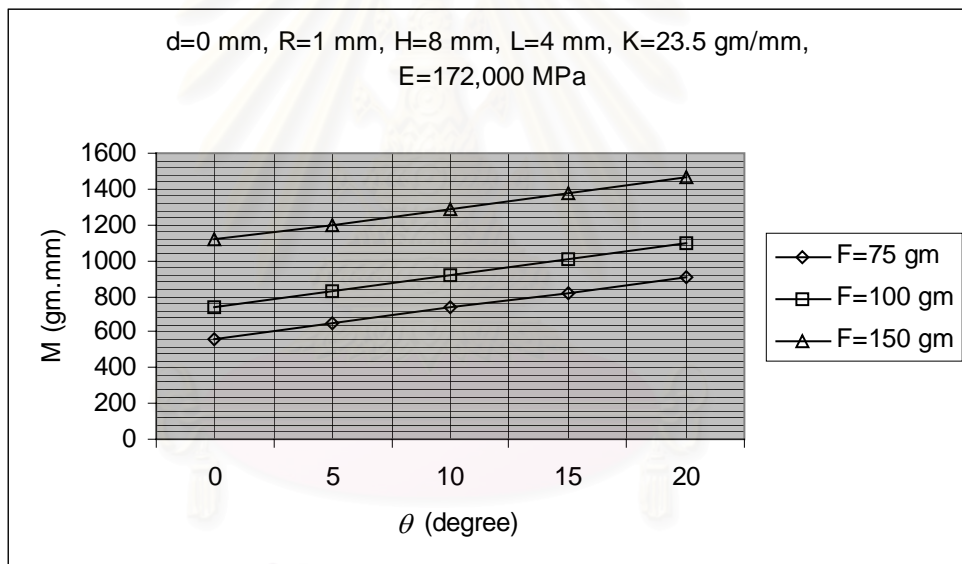


รูปที่ 64 ค่า M/F ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

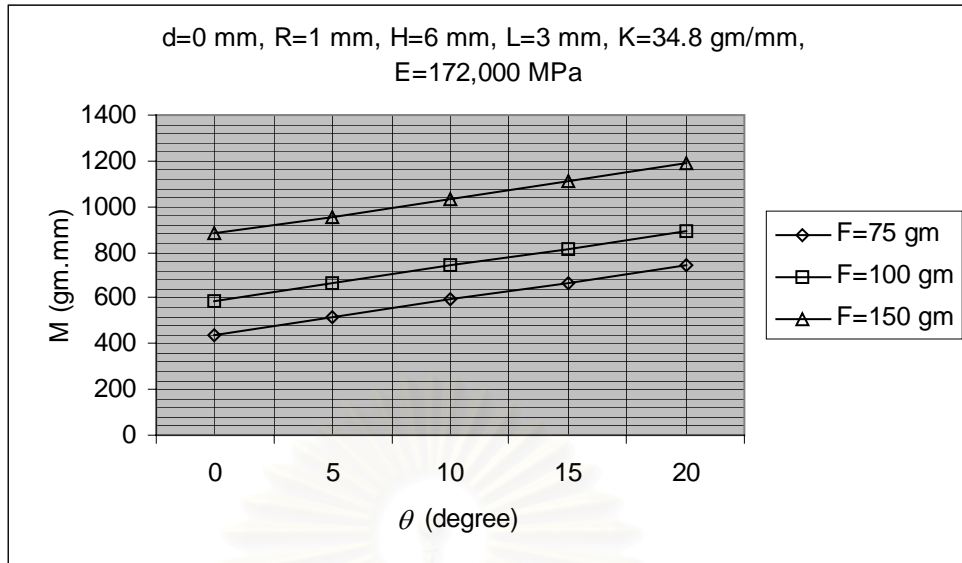


รูปที่ 65 โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (10x10 มม.)

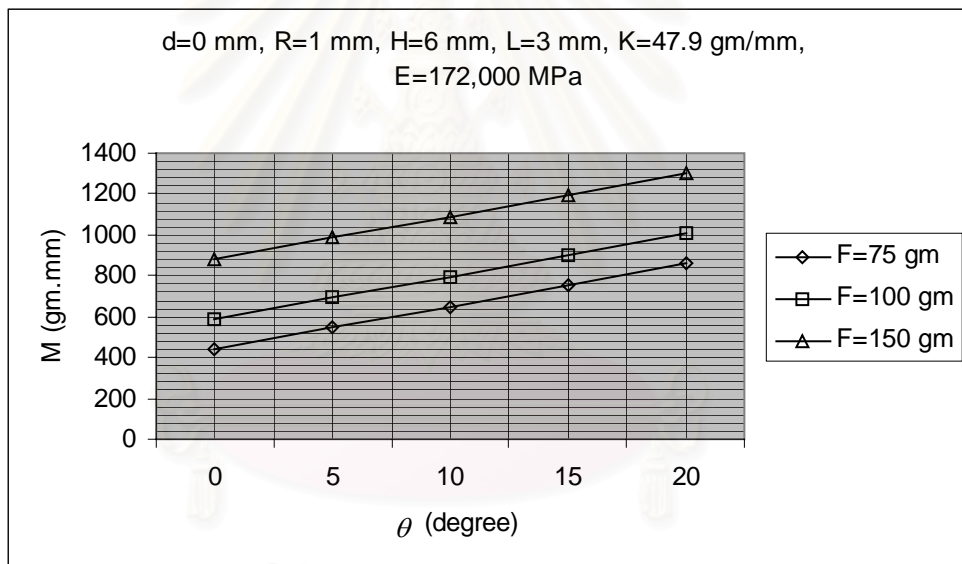


รูปที่ 66 โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (10x10 มม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 67 โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.016 นิ้ว ss (8x8 มม.)



รูปที่ 68 โมเมนต์ของ helical T-loop ลวด 0.016x0.022 นิ้ว ss (8x8 มม.)

บทที่ 6

ระเบียบวิธีวิจัย

ประชากร

โคลสซิงลูปที่ตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว แบบ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ซึ่งมีสัดส่วนตามสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดจากการคำนวณ โดยทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน (รูปที่ 69)

กลุ่มตัวอย่าง

โคลสซิงลูปซึ่งตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว จำนวน 20 ลูป (ภาคผนวก ก) ประกอบด้วย

1. Vertical helical loop	5	ลูป
2. T-loop	5	ลูป
3. Opus90 loop	5	ลูป
4. Helical T-loop	5	ลูป

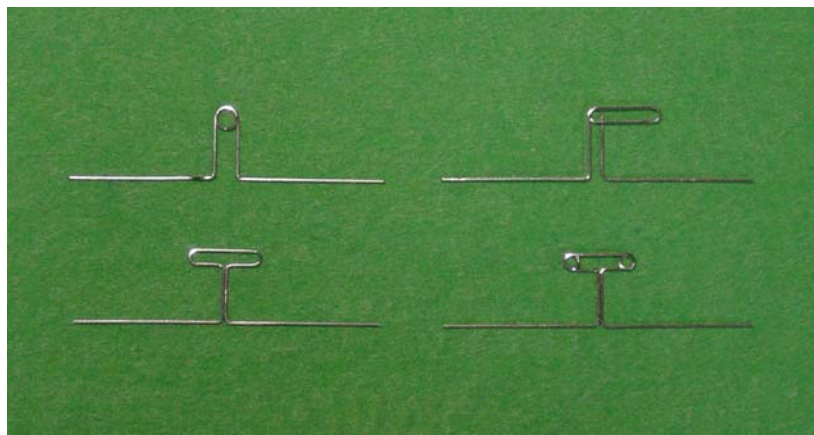
สัดส่วนของลูปทุกรูปแบบได้จากสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด ซึ่งได้จากการคำนวณ โดยทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน

ตัวแปรของการวิจัย

ตัวแปรอิสระ การวิจัยนี้มีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการประเมิน ดังนี้

- ระยะทางในการแอกทีเวท 0.50, 1.00 , 1.50, 2.00, 2.50 และ 3.00 มม.
- รูปแบบของโคลสซิงลูปที่ตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว โดยตัดตามสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ได้แก่
 - Vertical helical loop
 - T-loop
 - Opus90 loop
 - Helical T-loop

ตัวแปรตาม การวิจัยนี้มีตัวแปรตามเพียงตัวแปรเดียว คือ ขนาดแรงในแนวขนานกับขาของลูปในแนวระดับที่ได้จากการแอกทีเวทลูป



รูปที่ 69 โคลสซิงรูปที่ตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว แบบ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ซึ่งมีสัดส่วนตามสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุดจากการคำนวณโดยทฤษฎีบทของคาสติกลีโอน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดโคลสซิงรูป ได้แก่

1. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ของบริษัท แอคคอร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัด
2. คีมตัดลวด (รูปที่ 70)
 - 2.1 Tweed loop forming plier (ETM 7H86)
 - 2.2 Tweed rectangular arch-forming plier (Dentaurum 003-442)
 - 2.3 Jarabak plier (E209)
 - 2.4 คีมตัดลวด
3. แบบกระดาดอ้างอิงในการตัดลวด (รูปที่ 71)
4. ปากกาเมจิก
5. ดิจิตอลคาลิเปอร์ (digital caliper) (รูปที่ 70)

เครื่องมือวัดแรง ได้แก่ ลอยด์ยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีนรุ่น LF plus (รูปที่ 72) โปรแกรมสำเร็จรูป Nexygen เวอร์ชัน 4.1

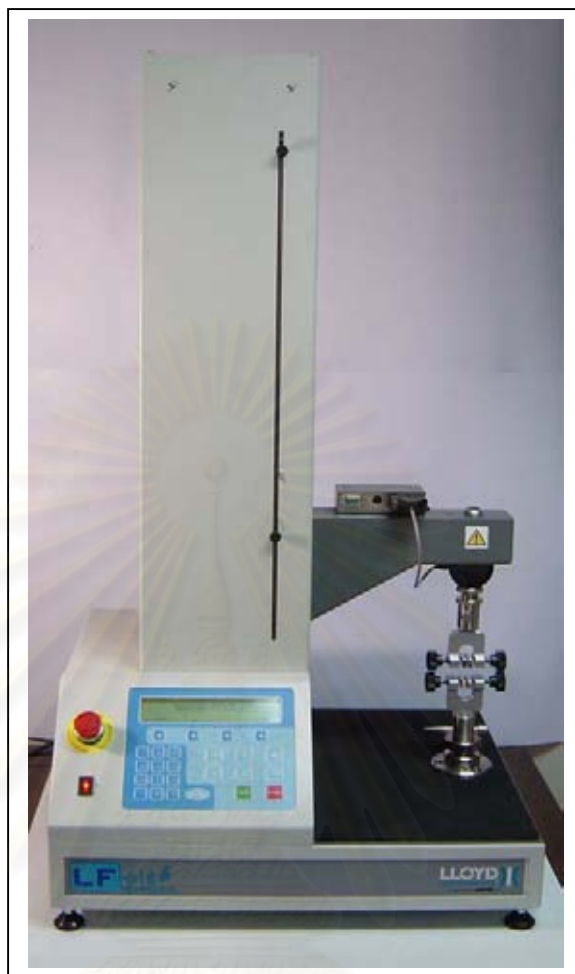


รูปที่ 70 คีมตัดลวด คีมตัดลวด และดิจิตอลคาลิเปอร์



รูปที่ 71 แบบกระดาศอ้างอิงในการตัดลวด

สถาบันวิทยุเทคโนโลยี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 72 ลอยด์ยูนิเวอร์แซลทดสอบดึงแมชชีนรุ่น LF plus

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การรวบรวมข้อมูล

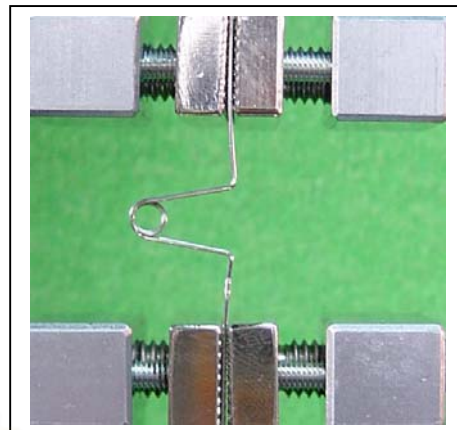
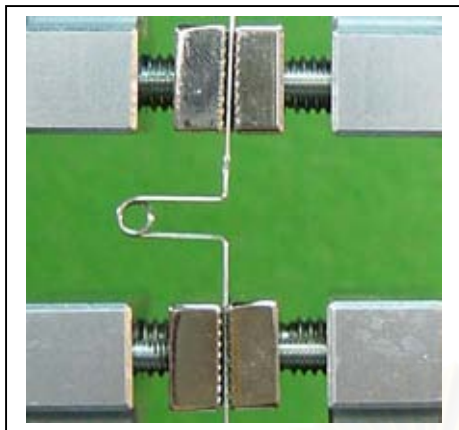
เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล

ใช้ล้อยค้ยูนีเวอร์แซลทดสอบดึงแมชชีน รุ่น LF plus ในการวัดขนาดแรงซึ่งมีทัศนนานกับขาในแนวราบของรูปเป็นนิวตัน เมื่อแอกทิเวทรูปที่ระยะ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 และ 3.00 มม. ตามลำดับ เครื่องมือนี้ประกอบด้วย

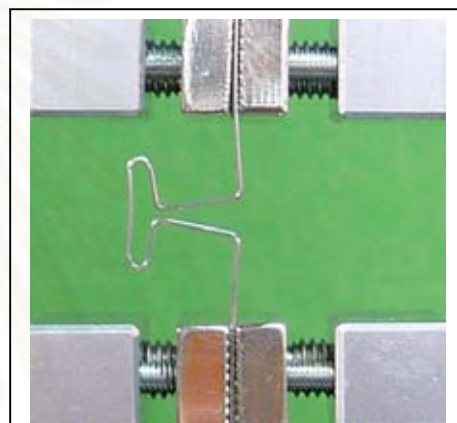
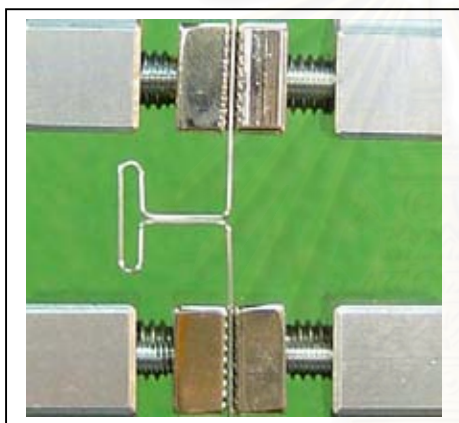
- ฟิกซ์เฮด (fixed head) เป็นส่วนของเครื่องมือซึ่งอยู่กับที่ขณะวัดแรง
- ครอสเฮด เป็นส่วนของเครื่องมือซึ่งยึดรูปที่ศึกษา ส่วนปลายมีลักษณะเป็นแท่งสำหรับหนีบลวด ครอสเฮดสามารถเคลื่อนขึ้นลงได้ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราบ
- หน่วยน้ำหนัก (load cell) เป็นส่วนของเครื่องมือซึ่งใช้วัดแรงที่กระทำ โดยแสดงหน่วยบนหน้าปัทม์แบบดิจิตอล

วิธีการรวบรวมข้อมูล

1. คัดโคลตซึ่งรูปทั้ง 4 แบบซึ่งได้แก่ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ด้วยลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ตามแผ่นแบบ ตรวจสอบสัดส่วนของรูปด้วยดิจิตอลคาลิเปอร์ ให้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 0.05 มม.
2. ตั้งการทำงานของล้อยค้ยูนีเวอร์แซลทดสอบดึงแมชชีนตามคู่มือการใช้งาน รวมทั้งตั้งอัตราการเคลื่อนที่ของครอสเฮด 3 มม./นาทื และใช้หน่วยน้ำหนักขนาด 20 นิวตัน
3. ใช้ครอสเฮดจับยึดรูปที่ต้องการศึกษา ดึงรูปจนมีระยะแอกทิเวทตั้งแต่ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 และ 3.00 มม. อ่านขนาดแรงที่ระยะแอกทิเวทต่างๆ แต่ละรูปจะทำการทดลองเพียง 1 ครั้ง (รูปที่ 73-76)
4. ถอดรูปออกจากครอสเฮด ดำเนินการซ้ำในรูปต่อไปตั้งแต่ข้อ 3-4
5. ดำเนินการซ้ำในรูปเดิมตั้งแต่ข้อ 2-4 ในอีก 2 สัปดาห์ถัดมา เพื่อเป็นการป้องกันความคลาดเคลื่อนจากความจำของผู้วัด และนำมาทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการโดยใช้สูตรของ Dahlberg และสถิติการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่ (paired t-test)

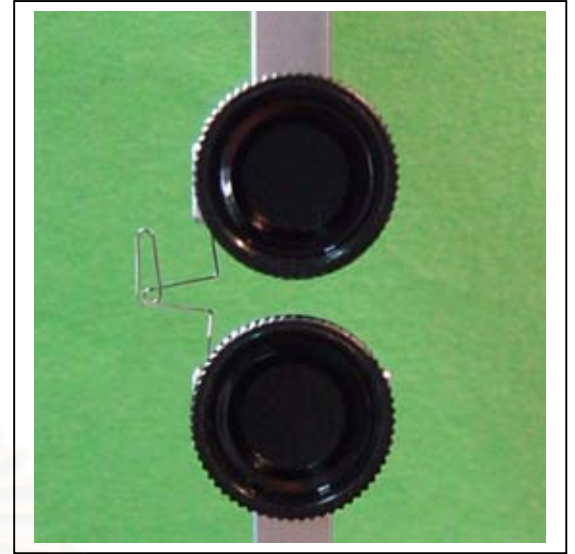
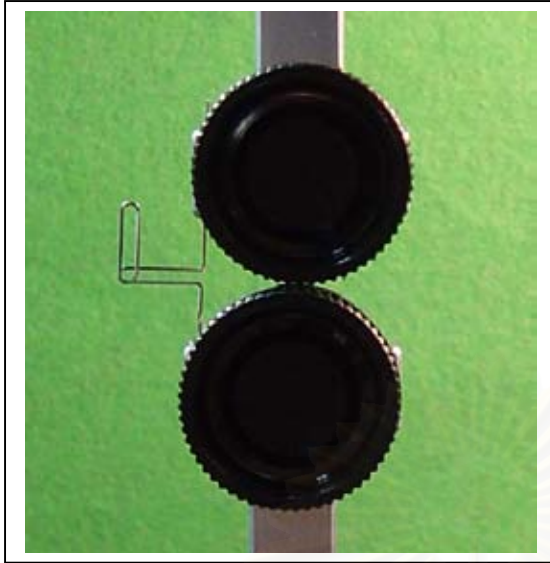


รูปที่ 73 Vertical helical loop ก่อนแอดทิเวท และที่ระยะแอดทิเวท 3 มม.

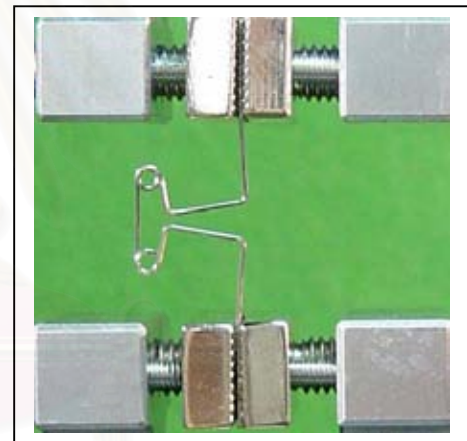
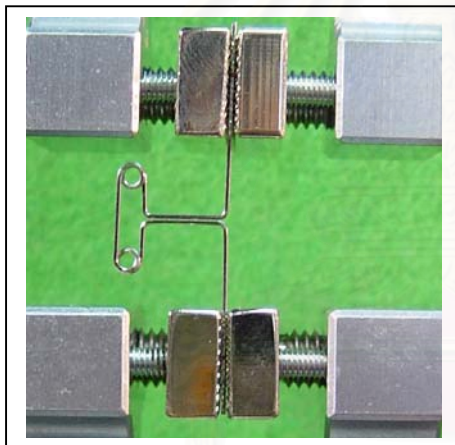


รูปที่ 74 T-loop ก่อนแอดทิเวท และที่ระยะแอดทิเวท 3 มม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 75 Opus90 loop ก่อนแอดทิเวท และที่ระยะแอดทิเวท 3 มม.



รูปที่ 76 Helical T-loop ก่อนแอดทิเวท และที่ระยะแอดทิเวท 3 มม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลได้จากการศึกษาค่าความแข็งดึงของโคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ดัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว รูปแบบละ 5 รูป แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง และการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการ

ก. การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

1. ค่าความแข็งดึงที่ได้จากการทดลองดึงโคลสซิงรูป 4 รูปแบบที่มีสัดส่วนที่ให้ค่า M/F มากที่สุด ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎี จะใช้ค่าสถิติดังนี้

1.1 การวัดค่ากลางของข้อมูล เนื่องจากการกระจายของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ (normal distribution) ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข สถิติที่ใช้วัดจะใช้ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (mean, \bar{X})

1.2 การวัดการกระจายของข้อมูล สถิติที่ใช้ประกอบด้วย

- ค่าสูงสุด (maximum, Max) และต่ำสุด (minimum, Min)
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, S.D.)
- ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error, S.E.)
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (coefficient of variation, C.V.)

2. การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง โดยคิดเป็นร้อยละ

3. เปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของโคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบที่ให้ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุดซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการทดลองโดยใช้สถิติการทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว (one-sample t-test) ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ข. การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการ

การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการในแง่ความสามารถในการทำซ้ำ ทำได้โดยการวัดค่าความแข็งดึงของรูปทุกรูปอีกครั้ง หลังจากการทดสอบครั้งแรก 2 สัปดาห์ การทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1. การทดสอบความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ (method error, S_e) โดยใช้สูตรของ Dahlberg คือ

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

โดย d แทน ความแตกต่างระหว่างการวัดครั้งที่ 1 และ 2

n แทน จำนวนตัวอย่างที่วัด

2. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของโคลตซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 โดยใช้สถิติการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่ ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ก. การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

การเปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของโคลตซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบที่มีสัดส่วนที่ให้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงสูงสุด (และสามารถตัดได้ภายในขีดจำกัดในช่องปาก) ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลอง ใช้ค่าสถิติ ดังนี้

1. การวัดค่ากลางของข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ vertical helical loop มีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ตามลำดับ ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ss

Loop configuration	Mean (gm/mm)	Max (gm/mm)	Min (gm/mm)	S.D (gm/mm)	S.E.	C.V. (%)
Vertical helical loop	81.90	83.26	80.60	1.01	0.45	1.23
T-loop	59.63	60.77	58.17	1.13	0.51	1.90
Opus90 loop	55.94	56.86	54.90	0.89	0.40	1.60
Helical T-loop	47.66	48.30	46.83	0.63	0.28	1.31

จากตารางที่ 23 ค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 81.90 กรัม/มม. ค่าสูงสุดเท่ากับ 83.26 กรัม/มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 80.60 กรัม/มม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.01 กรัม/มม. ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.45 สัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 1.23

ค่าความแข็งดึงของ T-loop มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 59.63 กรัม/มม. ค่าสูงสุดเท่ากับ 60.77 กรัม/มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 58.17 กรัม/มม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.13 กรัม/มม. ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.51 สัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 1.90

ค่าความแข็งดึงของ Opus90 loop มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 55.94 กรัม/มม. ค่าสูงสุดเท่ากับ 56.86 กรัม/มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 54.90 กรัม/มม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.89 กรัม/มม. ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.40 สัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 1.60

ค่าความแข็งดึงของ helical T-loop มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 47.66 กรัม/มม. ค่าสูงสุดเท่ากับ 48.30 กรัม/มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 46.83 กรัม/มม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.63 กรัม/มม. ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.28 สัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 1.31

2 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง โดยคิดเป็นร้อยละ (Diff (%)) ดังนี้

$$Diff = \frac{(K_E - K_C)100}{K_C}$$

ตารางที่ 24 ค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณ (K) และจากการทดลอง (K_E) คิดเป็นร้อยละ

Loop configuration	K (gm/mm)	K_E (gm/mm)	$K_E - K$ (gm/mm)	Diff (%)
Vertical helical loop	33.80	81.90	48.10	142.31
T-loop	23.80	59.63	35.83	150.55
Opus90 loop	19.60	55.94	36.34	185.41
Helical T-loop	23.50	47.66	24.16	102.81

จากตาราง ที่ 24 พบว่า ค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 142.31

ค่าความแข็งดึงของ T-loop ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 150.55

ค่าความแข็งดึงของ Opus90 loop ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 185.41

ค่าความแข็งดึงของ helical T-loop ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 102.81

สัดส่วนและค่าความแข็งดึงของ โคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎีแสดงไว้ในตารางที่ 25

ตารางที่ 25 สัดส่วนและค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop จากผลการคำนวณทางทฤษฎี

Loop configuration	H (mm)	R (mm)	N (1/2 turn)	L (mm)	d (mm)	K (gm/mm)
Vertical helical loop	8.5	1.5	3	-	-	33.80
T-loop	8.0	1.0	-	4.0	0	23.80
Opus90 loop	8.0	1.0	-	8.0	-	19.60
Helical T-loop	8.0	1.0	3	4.0	0	23.50

3. การเปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของ โคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบที่ให้ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมากที่สุดขณะยังไม่มีเกเบิลเบนด์ ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (ตารางที่ 25) และจากการทดลอง ใช้สถิติการทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ข้อตกลงเบื้องต้นของการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว คือ ประชากรที่จะนำมาทดสอบมีข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ และมีการแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงกับแบบปกติ การทดสอบการแจกแจงของประชากรของข้อมูลในการวิจัยนี้ โดยใช้สถิติทดสอบ Kolmogorov-Smirnov ให้ผลว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (ตารางข1 ภาคผนวก ข) ดังนั้นจึงใช้การทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของประชากรเดียวได้

การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียวที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ค่าความแข็งดึงของรูปทั้ง 4 รูปแบบที่ได้จากการทดลองไม่เท่ากับค่าความแข็งดึงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ระดับนัยสำคัญ .05 ($p = .000$) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ค ดังนั้นทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณหาอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึงของโคลสซิงรูป

ข. ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการ

1. การทดสอบความคลาดเคลื่อนจากวิธีการวัดค่าความแข็งดึง โดยใช้สูตรของ Dahlberg พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ โคลสซิงรูปทุกรูปแบบมีค่าน้อย โดยมีค่าสูงสุดเพียง 1.04 กรัม/มม. ใน vertical helical loop ส่วนรูปอื่นๆ มีค่าระหว่าง 0.25-0.70 กรัม/มม. (ตาราง ง 1-4 ภาคผนวก ง)

2. การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ โคลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 โดยใช้สถิติการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบ

จับคู่ ที่ระดับนัยสำคัญ .05 พบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งตึงของโกลสซิงรูปทั้ง 4 รูปแบบในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกัน ($p = .348, .142, .133$ และ $.382$ ตามลำดับ) ดังตาราง ข2 ภาคผนวก ข และ ตาราง จ1 ภาคผนวก จ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูป อย่างไรก็ตามผลทางทฤษฎียังมีประโยชน์ในการทำให้อธิบายอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนต่างๆ ของลูปต่อค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึง ดังนั้นทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนจึงเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่อาจมีส่วนช่วยในการออกแบบ และทำให้เข้าใจคุณลักษณะของโคลสซิงลูปอันเกิดจากสัดส่วนต่างๆ ของลูปได้

อภิปรายผลการวิจัย

ค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปทุกรูปแบบที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำ ได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อย แสดงว่าการคัดลูปมีมาตรฐานใกล้เคียงกัน ข้อมูลที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถืออย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้จากค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการจากการคำนวณ โดยใช้สูตรของ Dahlberg พบสูงสุดเพียง 1.04 กรัม/มม. (ตาราง ง1 ภาคผนวก ง) เมื่อใช้สถิติทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง 0.25-1.04 กรัม/มม. ก็ไม่ทำให้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางคลินิก นั่นแสดงว่าวิธีการวัดมีความสามารถในการทำซ้ำสูง (ตาราง จ1 ภาคผนวก จ)

Haack¹⁴ และ Siatkowski^{1,8} นำทฤษฎีบทของคาสติกเลียโนมาใช้ในการออกแบบโคลสซิงลูป Haack¹⁴ แสดงเฉพาะสมการความแข็งดึงของ vertical helical loop แต่ไม่ได้แสดงรายละเอียดของที่มา ส่วน Siatkowski^{1,8} แสดงขั้นตอนการใช้ทฤษฎีอย่างคร่าวๆ และสมการอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงของ vertical helical loop, T-loop, L-loop และ Opus90 loop ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงนั้นแสดงในรูปกราฟ โดยให้ vertical helical loop เป็นลูปอ้างอิงในการนำไปเปรียบเทียบกับลูปรูปแบบอื่นๆ แต่มิได้แสดงค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของแต่ละลูปออกมาเป็นตัวเลข อีกทั้งมิได้เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลอง จะแสดงเพียงค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึงจากการทดลองเท่านั้น สำหรับสมการความแข็งดึงของลูปอื่นนอกจาก vertical helical loop ผู้วิจัยพบว่ายังไม่มีผู้ใดกล่าวถึง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งดึงของ T-loop และ Opus90 loop ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Siatkowski^{1,8} ซึ่งใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้วเช่นเดียวกัน สัดส่วนของ Opus90 loop เท่ากัน แต่สัดส่วนของ T-loop ต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ สัดส่วนของ T-loop ในงานวิจัยของ

Siatkowski^{1,8} มี $H = 8$ มม. $R = 1$ มม. $L = 3.5$ มม. $d = 1$ มม. นั่นคือ ขาในแนวดิ่งห่างกัน 1 มม. ในขณะที่งานวิจัยนี้งานวิจัยนี้ขาในแนวดิ่งอยู่ชิดกัน ค่าความแข็งดึงของ T-loop ในงานวิจัยของ Siatkowski^{1,8} เท่ากับ 58.5 กรัม/มม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งดึงของ T-loop ในงานวิจัยนี้ร้อยละ 1.41 ส่วนค่าความแข็งดึงของ Opus90 loop ในงานวิจัยของ Siatkowski^{1,8} เท่ากับ 62.5 กรัม/มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความแข็งดึงของ Opus90 loop ในงานวิจัยนี้ร้อยละ 10.50 เมื่อพิจารณาในทางคลินิกแล้ว ถือว่าค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปทั้งสองชนิดในงานวิจัยทั้งสองงานมีความใกล้เคียงกัน

แม้ว่าค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำ แต่ก็ไม่ได้ใกล้เคียงกับค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูปที่ได้จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโน สาเหตุน่าจะเกิดจากข้อจำกัดที่ว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลูปจากการแอคทิเวทมิ้นไม่มาก ระยะ 3 มม. อาจเป็นระยะที่ไม่มาก แต่เมื่อเทียบกับขนาดของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.016×0.022 นิ้ว หรือ 0.40×0.55 มม. ก็อาจเป็นระยะแอคทิเวทที่มากเกินไปจนจะนำเอาทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ (รูปที่ 73-76)

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทของคาสติกลีอาโนมีประโยชน์ในการทำให้อธิบายอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนต่างๆ ของลูปต่อค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึงของโคลสซิงลูป สำหรับค่าอัตราส่วน โมเมนต์ต่อแรง การเพิ่มความสูง (H) ความยาวปีก (L) และจำนวนรอบของเฮลิคซ์ และการลดระยะระหว่างขาของลูป (d) ทำให้ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเพิ่มขึ้นในโคลสซิงลูปทุกรูปแบบ โดยการเพิ่มความสูงจะมีอิทธิพลมากที่สุด ส่วนการเพิ่มรัศมีของลูป (R) จะทำให้ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเพิ่มขึ้นเฉพาะ vertical helical loop เท่านั้น T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop จะมีค่าอัตราส่วน โมเมนต์ต่อแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับหลายๆ งานวิจัย^{1, 5, 8, 16, 20, 21, 28, 39}

การพิจารณาคูณสมบัติของโคลสซิงลูปมีความเกี่ยวข้องกับค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึง งานวิจัยนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่าโคลสซิงลูปรูปแบบใดใน 4 รูปแบบมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ค่าความแข็งดึงจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถนำค่าความแข็งดึงจากการคำนวณทางทฤษฎีมาอ้างได้ ถ้ามีเครื่องมือวัดโมเมนต์ ค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองก็มีความเป็นไปได้ที่จะมีความแตกต่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงและค่าความแข็งดึงจากการคำนวณทางทฤษฎีมาใช้ในการพิจารณาคูณสมบัติของโคลสซิงลูป

ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันมีระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์หลายวิธีที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อแสดงแบบจำลอง เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งที่ใช้ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณสำหรับปัญหาต่างๆ ในทางวิศวกรรมหรือวิทยาศาสตร์ ในทางทันตกรรมจัดฟันก็สามารถนำวิธีนี้ไปใช้ในการวัดปฏิกิริยาของลวดเมื่อมีแรงมากระทำ โดยยึดหลัก

ของสมมติฐานทฤษฎีเชิงเส้นที่มีการยุบตัวน้อย (linear theory and small deformation assumption) หรือทฤษฎีไม่เชิงเส้นที่มีการยุบตัวมาก (nonlinear large deformation theory) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทำนายค่าอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง และค่าความแข็งดิ่งของโคลสซิงรูปต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Siatkowski, R. E. Continuous arch wire closing loop design, optimization and verification: part I. Am J Orthod Dentofac Orthop 112 (October 1997): 393-402.
2. Burstone, C. J., Pryputniewicz, R. J., and Bowley, W. W. Holographic measurement of tooth mobility in three dimensions. J Periodontal Res 13 (July 1978): 283-294.
3. กรพินท์ มหาทุมะรัตน์. Biomechanics aspects of tooth movement. เอกสารประกอบการสอน นิสิตปริญญาโท ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อัสสำเนา).
4. Pryputniewicz, R. J., and Burstone, C. J. The effect of time and force magnitude on orthodontic tooth movement. J Dent Res 58 (August 1979): 1754-1764.
5. Gjessing P. Biomechanical design and clinical evaluation of a new canine-retraction spring. Am J Orthod 87 (May 1985): 353-362.
6. Burstone, C. J., and Goldberg, A. J. Beta titanium: a new orthodontic alloy. Am J orthod 77 (February 1980): 121-132.
7. Hilgers, J. J., and Farzin-Nia, F. Adjuncts to bioprogressive therapy: the asymmetrical "T" arch wire. J Clin Orthod 26 (February 1992): 81-86.
8. Siatkowski, R. E. Continuous arch wire closing loop design, optimization and verification: part II. Am J orthod Dentofac Orthop 112 (November 1997): 487-495.
9. Dermaut, L. R., Kleutghen, J. P. J., and De Clerck, H. J. J. Experimental determination of the center of resistance of the upper first molar in a macerated, dry human skull submitted to horizontal headgear traction. Am J Orthod 90 (July 1986): 29-36.
10. Tanne, k., Sakuda, M., and Burstone, C. J. Three-dimension finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces. Am J Orthod Dentofac Orthop 92 (December 1987): 499-505.
11. Tanne, K., Koenig, H. A., and Burstone, C. J. Moment to force ratios and the center of rotation. Am J Orthod Dentofac Orthop 94 (November 1988): 426-431.
12. Pedersen, E. H., Andersen, K. L., and Melsen, B. Tooth displacement analyzed on human autopsy material by means of a strain gauge technique. Eur J Orthod 13 (February 1991): 65-74.

13. Andersen, K. L., Pedersen, E. H., and Melsen, B. Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. Am J Orthod Dentofac Orthop 99 (May 1991): 427-440.
14. Haack, D. C. The science of mechanics and its importance to analysis and research in the field of orthodontics. Am J Orthod 49 (May 1963): 330-344.
15. Nanda, R. S., and Ghosh, J. Biomechanical considerations in sliding mechanics. In R. Nanda, Biomechanics in clinical orthodontics, p. 188. Philadelphia: W. B. Saunders, 1997.
16. Burstone, C. J., Steenberg, E. V., Hanley, K. J. Modern edgewise mechanics and the segmented arch technique. Glendora, CA: Ormco, 1995.
17. Burstone, C. J. The segmented arch approach to space closure. Am J Orthod 82 (November 1982): 361-378.
18. Ziegler, P., and Ingervall, B. A clinical study of maxillary canine retraction with a retraction spring and with sliding mechanics. Am J Orthod Dentofac Orthop 95 (February 1989): 99-106.
19. Dincer, M., and İşcan, H. The effects of different sectional arches in canine retraction. Eur J Orthod 16 (August 1994): 317-323.
20. Proffit, W. R., and Fields, H. W., Jr. Contemporary orthodontics. St. Louis, MO: C. V. Mosby, 1993.
21. Charles, C. R., and Jones, M. L. Canine retraction with the edgewise appliance: some problems and solutions. Br J Orthod 9 (October 1982): 194-202.
22. Burstone, C. J., and Pryputniewicz, R. J. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. Am J Orthod 77 (April 1980): 396-409.
23. Dividian, E. J. Use of a computer model to study the force distribution on the root of the maxillary central incisor. Am J Orthod 59 (June 1971): 581-588.
24. Pederson, E., Anderson, K., and Gjessing, P. E. Electronic determination of center resistance produced by orthodontic force system. Euro Orthod Soc 12: (1990): 272-280. Cited in Nanda, R. S., and Ghosh, J. Biomechanical considerations in sliding mechanics. In R. Nanda, Biomechanics in clinical orthodontics, p. 188. Philadelphia: W. B. Saunders, 1997.
25. Yamaguchi, K., and Nanda, R. S. Considerations in sliding tooth movement along an archwire I: typodont work. Ind Orthod Jnl (1993). Cited in Nanda, R. S., and Ghosh, J. Biomechanical considerations in sliding mechanics. In R. Nanda, Biomechanics in clinical orthodontics, p. 188. Philadelphia: W. B. Saunders, 1997.

26. Weine, F. S. Endodontic therapy. St. Louis: C. V. Mosby, 1976. Cited in Gjessing, P. Biomechanical design and clinical evaluation of a new canine retraction spring. Am J Orthod 87 (May 1985): 353-362.
27. Wheeler, R. C. A textbook of dental anatomy and physiology. Philadelphia: W. B. Saunders, 1965. Cited in Siatkowski, R. E. Continuous arch wire closing loop design, optimization and verification: part I. Am J Orthod Dentofac Orthop 112 (October 1997): 393-402.
28. Burstone, C. J., and Koenig, H. A. Optimizing anterior and canine retraction. Am J Orthod 70 (July 1976): 1-19.
29. Nikolai, R. J. An optimum orthodontic force theory as applied to canine retraction. Am J Orthod 68 (September 1975): 290-302.
30. Schwartz, A. M. Tissue changes incident to orthodontic tooth movement. Int J Orthod 18 (1932): 331-352. Cited in Nanda, R. S., and Ghosh, J. Biomechanical considerations in sliding mechanics. In R. Nanda, Biomechanics in clinical orthodontics, p. 188. Philadelphia: W. B. Saunders, 1997.
31. Storey, E., and Smith, R. Force in orthodontics and its relation to tooth movement. Aust Dent J 56 (1952): 11-18. Cited in Nanda, R. S., and Ghosh, J. Biomechanical considerations in sliding mechanics. In R. Nanda, Biomechanics in clinical orthodontics, p. 188. Philadelphia: W. B. Saunders, 1997.
32. Quinn, R. B., and Yoshigawa, D. K. A reassessment of force magnitude in orthodontics. Am J Orthod 88 (September 1985): 252-260.
33. Smith, R., and Storey, E. The importance of force in orthodontics. Aus J Dent 56 (1952): 291-304. Cited in Gjessing, P. Biomechanical design and clinical evaluation of a new canine retraction spring. Am J Orthod 87 (May 1985): 353-362.
34. Reitan, K. Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics. Am J Orthod 43 (January 1957): 32-45.
35. Lee, B. Relationships between tooth-movement rate and estimated pressure applied. J Dent Res 44 (September-October 1965): 1053.
36. Ricketts, R. M., Bench, R. W., Gugino, C. F., Hilger, J. J., and Schulhof, R. J. Bioprogressive therapy. Denver: Rocky Mountain Orthodontics, 1979.
37. Boester, C. H., and Johnston, L. E. A clinical investigation of the concepts of differential and optimal force in canine retraction. Angle Orthod 44 (April 1974): 113-119.

38. Chaconas, S. J., Caputo, A. A., and Hayashi, R. K. Effects of wire size, loop configuration, and gabling on canine-retraction springs. Am J Orthod 65 (January 1974): 58-66.
39. Shaw, M. M., and Waters, N. E. The characteristics of the Ricketts maxillary canine retractor. Eur J Orthod 14 (February 1992): 37-46.
40. Gere, J. M., and Timoshenko, S. P. Mechanics of materials. 4th ed. . Boston, MA: PWS Publishing, 1997.
41. Hibbeler, R. C. Mechanics of materials. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall International, 2000.
42. Haskell, B. S., Spencer, W. A., and Day, M. Auxiliary spring in continuous arch treatment: part I An analytical study employing the finite-element method. Am J Orthod Dentofac Orthop 98 (November 1990):387-97.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษานำร่อง

ตาราง ก1 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความแข็งดึงของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ss

Loop configuration	Mean (gm/mm)	Max (gm/mm)	Min (gm/mm)	S.D (gm/mm)	S.E.	C.V. (%)
Vertical helical loop	82.80	84.13	81.75	0.86	0.35	1.04
T-loop	58.44	59.58	57.93	0.61	0.25	1.05
Opus90 loop	54.96	56.04	53.55	1.16	0.47	2.11
Helical T-loop	46.75	48.52	46.03	0.95	0.39	2.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การทดสอบการแจกแจงของประชากร

ตาราง ข1 การทดสอบการแจกแจงของประชากรของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop สำหรับการดึงครั้งที่ 1 สถิติทดสอบ คือ Kolmogorov-Smirnov

		Vertical helical loop	T-loop	Opus90 loop	Helical T-loop
N		5	5	5	5
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	81.897354126	59.625549316	55.941555023	47.661567688
	Std. Deviation	1.0114153624	1.1335119009	.8934594989	.6261222959
Most Extreme	Absolute	.192	.242	.219	.240
Differences	Positive	.177	.179	.219	.223
	Negative	-.192	-.242	-.201	-.240
Kolmogorov-Smirnov Z		.430	.541	.489	.537
Asymp. Sig. (2-tailed)		.993	.932	.970	.936

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

สมมติฐาน H_0 : ความแข็งตึงมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ความแข็งตึงไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า significance $< \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ตัวแปรความแข็งตึงที่วัดได้จาก vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop มีการแจกแจงแบบปกติ

ตาราง ข2 การทดสอบการแจกแจงของประชากรของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop สำหรับการดึงครั้งที่ 2 สถิติทดสอบ คือ Kolmogorov-Smirnov

		Vertical helical loop	T-loop	Opus90 loop	Helical T-loop
N		5	5	5	5
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	82.58715057	59.098197937	55.259937286	47.50390625
	Std. Deviation	1.877179146	.9661217332	.7605328560	.7501677275
Most Extreme	Absolute	.229	.189	.353	.233
Differences	Positive	.218	.189	.353	.193
	Negative	-.229	-.172	-.235	-.233
Kolmogorov-Smirnov Z		.513	.423	.789	.522
Asymp. Sig. (2-tailed)		.955	.994	.562	.948

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

สมมติฐาน H_0 : ความแข็งตึงมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ความแข็งตึงไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า significance $< \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ตัวแปรความแข็งตึงที่วัดได้จาก vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop มีการแจกแจงแบบปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop

ตาราง ค1 การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ vertical helical loop

	Test Value = 33.8					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Vertical helical loop	106.335	4	.000	48.097356	46.841518	49.353193

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ vertical helical loop เท่ากับ 33.80 กรัม/มม.
(หรือ $H_0: \mu = 33.80$)

H_1 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ vertical helical loop ไม่เท่ากับ 33.80 กรัม/มม.
(หรือ $H_1: \mu \neq 33.80$)

สถิติทดสอบ $t = 106.335$ และได้ค่า Sig.(2-tailed) = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig.(2-tailed) < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ vertical helical loop ไม่เท่ากับ 33.80 กรัม/มม. อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค2 การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ T-loop

	Test Value = 23.80					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
T-loop	70.673	4	.000	35.825549	34.418108	37.232991

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ T-loop เท่ากับ 23.80 กรัม/มม.

(หรือ $H_0: \mu = 23.80$)

H_1 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ T-loop ไม่เท่ากับ 23.80 กรัม/มม.

(หรือ $H_1: \mu \neq 23.80$)

สถิติทดสอบ $t = 70.673$ และได้ค่า Sig.(2-tailed) = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า Sig.(2-tailed) < α ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ T-loop ไม่เท่ากับ 23.80 กรัม/มม. อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ตาราง ค3 การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ Opus90 loop

	Test Value = 19.60					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Opus90 loop	90.952	4	.000	36.341556	35.232179	37.450932

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ Opus90 loop เท่ากับ 19.60 กรัม/มม.

(หรือ $H_0: \mu = 19.60$)

H_1 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ Opus90 loop ไม่เท่ากับ 19.60 กรัม/มม.

(หรือ $H_1: \mu \neq 19.60$)

สถิติทดสอบ $t = 90.952$ และได้ค่า Sig.(2-tailed) = .000

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.}(2\text{-tailed}) < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ Opus90 loop ไม่เท่ากับ 19.60 กรัม/มม. อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ตาราง ค4 การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ helical-T loop

	Test Value = 23.5					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Helical T-loop	86.288	4	.000	24.161566	23.384131	24.939000

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ helical T-loop เท่ากับ 23.50 กรัม/มม.

(หรือ $H_0: \mu = 23.50$)

H_1 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ helical T-loop ไม่เท่ากับ 23.50 กรัม/มม.

(หรือ $H_1: \mu \neq 23.50$)

สถิติทดสอบ $t = 86.288$ และได้ค่า $\text{Sig.}(2\text{-tailed}) = .000$

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig.}(2\text{-tailed}) < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่า ปฏิเสธ H_0 คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ Opus90 loop ไม่เท่ากับ 23.50 กรัม/มม. อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การทดสอบความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ

ความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ (method error, S_i) ใช้สูตรของ Dahlberg คือ

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

โดย d แทน ความแตกต่างระหว่างการวัดครั้งที่ 1 และ 2
 n แทน จำนวนตัวอย่างที่วัด

ตาราง ง1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ S_i ของ vertical helical loop K_1 และ K_2 เป็นค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ d เป็นผลต่างค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2

K_1 (gm/mm)	K_2 (gm/mm)	d (gm/mm)	S_i
83.26197757	84.37308869	1.11111100	1.03946897
82.13384302	84.60413863	2.47029600	
80.59796126	82.02513761	1.42717600	
81.27757390	80.16988787	1.10768600	
82.21542304	81.76350663	0.45191640	

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ S_i ของ T-loop K_1 และ K_2 เป็นค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ d เป็นผลต่างค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2

K_1 (gm/mm)	K_2 (gm/mm)	d (gm/mm)	S_i
60.76112130	60.29561672	0.46550459	0.55307183
60.77131498	59.81990826	0.95140673	
58.16513761	58.32143731	0.15629970	
59.03160041	59.03838940	0.00678900	
59.39857288	58.01562691	1.38294597	

ตาราง ง3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ S_i ของ Opus90 loop K_1 และ K_2 เป็นค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ d เป็นผลต่างค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2

K_1 (gm/mm)	K_2 (gm/mm)	d (gm/mm)	S_i
54.90316004	54.70948012	0.19367991	0.70346440
55.12742100	54.71626911	0.41115189	
56.86374108	54.74006116	2.12367992	
56.11620795	55.80020387	0.31600408	
56.69724771	56.33366972	0.36357798	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง4 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการของ S_i , helical T-loop K_1 และ K_2 เป็นค่าความแข็ง
ตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ d เป็นผลต่างค่าความแข็งตั้งจากการวัดครั้งที่ 1 และ 2

K_1 (gm/mm)	K_2 (gm/mm)	d (gm/mm)	S_i
48.29085627	48.30784913	0.01699290	0.25298691
47.44138634	47.42099898	0.02038736	
47.46516820	46.67006116	0.79510703	
48.28405708	48.22969419	0.05436290	
46.82636086	46.89092762	0.06456680	



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่

ตาราง จ1 การทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่ ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical-T loop ในการดึงครั้งที่ 1 และ 2

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	Vertical helical loop	-.6897961	1.45136694	.649071026	-2.491906	1.1123139	-1.063	4	.348
Pair 2	T-loop	.52735372	.645827917	.288823025	-.2745476	1.3292550	1.826	4	.142
Pair 3	Opus90 loop	.68161876	.810185327	.362325893	-.3243592	1.6875967	1.881	4	.133
Pair 4	Helical T-loop	.15765953	.359075603	.160583491	-.2881917	.60351078	.982	4	.382

สมมติฐาน H_0 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 แตกต่างกัน

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $\text{Sig. (2-tailed)} < \alpha$ ในที่นี้กำหนด $\alpha = .05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับ H_0 คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งดึงของ vertical helical loop, T-loop, Opus90 loop และ helical T-loop ในการดึงครั้งที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรือโท ทันตแพทย์หญิง วรินทรา อึ้งภากรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พุทธศักราช 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาทันตแพทยศาสตรบัณฑิต จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2540 จากนั้นรับราชการในสังกัดกองทัพเรือเป็นเวลา 3 ปี โดยเป็นทันตแพทย์ประจำโรงพยาบาลสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ ทันตแพทย์ประจำแผนกแพทย์ ศูนย์ฝึกทหารใหม่ และหัวหน้าหมวดทันตกรรม โรงพยาบาลกรมสรรพาวุธทหารเรือตามลำดับ ต่อมาเข้าศึกษาต่อในสาขาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย