

การเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานระหว่างเบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
ที่มีขนาดลวดและมุมที่กระทำต่างกัน



นางสาว ผกายพฤทธิ์ สุตั้งกานู

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน


คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4607-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARISON OF THE FRICTIONAL FORCE BETWEEN STAINLESS STEEL BRACKET AND WIRE
WITH VARIOUS SIZES OF WIRE AND SECOND-ORDER DEFLECTION



Miss Pagaiprut Sutangcanu

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 974-17-4607-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานระหว่างแบริกเกตและ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีขนาดลวดและมุมที่กระทำต่างกัน
โดย	นางสาว ฅกายพฤทธิ์ สุตั้งคานู
สาขา	ทันตกรรมจัดฟัน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง สมรตรี วิถีพร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไชยรัตน์ เฉลิมรัตน์โรจน์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ปิยารัตน์ อภิวัฒน์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง สมรตรี วิถีพร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไชยรัตน์ เฉลิมรัตน์โรจน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ วิวัฒน์วรพันธ์)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

447 6115632 : MAJOR ORTHODONTICS

KEY WORD: STATIC FRICTION / KINETIC FRICTION / STAINLESS STEEL BRACKET / STAINLESS STEEL WIRE / CRITICAL ANGLE

PAGAIPRUT SUTANGCANU : A COMPARISON OF FRICTIONAL FORCE BETWEEN STAINLESS STEEL BRACKET AND WIRE WITH VARIOUS SIZES OF WIRE AND SECOND-ORDER DEFLECTION. THESIS ADVISOR : PROF. SMORNTREE VITHEPORN, THESIS-COADVISOR : ASST.PROF. CHAIRAT CHAROEMRATROTE, 82 pp. ISBN 974-17-4607-5.

The objective of this research is to study the frictional force between stainless steel bracket and wire. Four sizes of wire, 0.016 inch, 0.018 inch, 0.016x0.016 inch², 0.016x0.022 inch², are selected by setting the angle between a wire and a bracket slot as 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, and 10 degrees

Specimens are 120 0.018x0.025 inch² of stainless steel bracket and 240 samples of mentioned four kinds of stainless steel wires. The brackets are divided into 4 groups. Each group is composed of 30 samples. The wires are divided into 8 groups. Each group is composed of 30 samples also. Pick up a bracket sample as well as a wire sample by random method and set them on fixed head and crossed head of the Universal Testing Machine respectively then tie a wire to a bracket in which the angle of slot has been prepared already with an elastomeric ring. After that pull the wire through bracket slot with speed 1 millimeter per minute in dry state. Static friction is considered when the wire just starts moving. And kinetic friction is considered of the average of force while the wire sample already has moved 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 millimeters. One-way analysis of variance (p < 0.05) is used for testing the difference of friction. Tukey HSD and Tamhane's T2 are provided for assumed equal variance and assumed unequal variance respectively in case of statistically significant difference in analysis result.

The conclusion is that there is statistically significant difference of friction when the angle between wire and bracket slot is changed. The more increasing degree of deflection, the more both of static and kinetic friction are increased also. In fact, the critical angle in the small size of wire is higher than in a large size of wire. In case of constant angulation, there is statistically significant difference of friction when the size of wire is changed. The wire diameter 0.016 inch produces the least friction, the wire diameter 0.018 inch produces the highest static friction, and the wire dimension 0.016x0.022 inch² produces the highest kinetic friction.

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์
ทันตแพทย์หญิง สมรตรี วิถีพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทันตแพทย์ ดร.
ไชยรัตน์ เฉลิมรัตนโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น
ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท แอคคอร์ดคอร์ปอเรชั่น จำกัด สำหรับแบรacket วงแหวนยาง และ
ลวดที่ใช้ในการทำกรวิจัยนี้ทั้งหมด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำชี้แนะ
และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งให้การสนับสนุนด้าน
ทุนอุดหนุนการวิจัย อาจารย์ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ให้คำปรึกษาด้านสถิติที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณนายอนุชาต ศรีจันบาล และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทางทันตวัสดุศาสตร์ที่ให้ความ
เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีในการใช้เครื่องยูนีเวอร์เซลเทสติงมะชีน

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ รวมทั้งกำลังใจที่มีให้กันเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และขอบคุณนาย พีระ สุรพัฒน์นา ที่ให้
ความช่วยเหลือในด้านการจัดเตรียมหาเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย รวมทั้งสนับสนุนในทุกๆด้าน
และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คุณความดีจากงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณต่อผู้วิจัยทุกท่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท

บทที่

1. บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	5
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	6
คำจำกัดความ.....	6

2. วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

กฎของความเสียดทาน.....	7
แรงเสียดทานกับงานทันตกรรมจัดฟัน.....	9
ปัจจัยที่มีผลต่อระดับแรงเสียดทานของแบร็กเกตและลวด.....	11
ผลของลวดต่อแรงเสียดทาน.....	13
- ชนิดของลวด.....	13
- ขนาดของลวด.....	14
- ความหยาบของพื้นผิว.....	15
- ความแข็งตึงของลวด.....	15
ผลของการมัดลวดโค้งติดกับแบร็กเกต.....	18
- ชนิดของวัสดุที่ใช้มัด.....	18

สารบัญ (ต่อ)

- วิธีในการมัด.....	18
แบร็กเกต.....	19
- ชนิดของแบร็กเกต.....	19
- ความกว้างของร่องแบร็กเกต.....	20
- กระบวนการผลิต.....	21
- การออกแบบแบร็กเกต.....	22
ลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน.....	24
- ระยะห่างระหว่างแบร็กเกต.....	24
- ระดับของร่องแบร็กเกตกับฟันข้างเคียง.....	24
- มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต.....	25
- แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน.....	26
ปัจจัยภายในช่องปาก.....	28
- น้ำลาย.....	28
- คราบต่างๆ.....	29
- การสึกกร่อน.....	29
- การทำงานของอวัยวะต่างๆในช่องปาก.....	29
ความรู้เกี่ยวกับแรงเสียดทานและการนำไปใช้ในทางคลินิก.....	29
3. ระเบียบวิธีวิจัย	
ประชากร.....	31
กลุ่มตัวอย่าง.....	31
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	31
การรวบรวมข้อมูล.....	38
ตัวแปรของการวิจัย.....	38
วิธีการทดลอง.....	38
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	43
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	73

สารบัญ (ต่อ)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 82



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) ของแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม.....	43
ตารางที่ 2	ตารางแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.).....	45
ตารางที่ 3	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 องศา.....	50
ตารางที่ 4	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 1 องศา.....	51
ตารางที่ 5	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 2 องศา.....	51
ตารางที่ 6	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 3 องศา.....	52
ตารางที่ 7	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 4 องศา.....	52
ตารางที่ 8	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

	จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แบรกเกตเป็น 6 องศา.....	53
ตารางที่ 9	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แบรกเกตเป็น 8 องศา.....	53
ตารางที่ 10	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แบรกเกตเป็น 10 องศา.....	54
ตารางที่ 11	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว เมื่อมุมกระทำ ระหว่างลวดและร่องแบรกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา	55
ตารางที่ 12	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้ว เมื่อมุมกระทำ ระหว่างลวดและร่องแบรกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา.....	55
ตารางที่ 13	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.016 นิ้ว ² เมื่อมุม กระทำระหว่างลวดและร่องแบรกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา.....	56
ตารางที่ 14	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและ จลน์ระหว่างแบรกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ² เมื่อมุม กระทำระหว่างลวดและร่องแบรกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา	56
ตารางที่ 15	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทิศทางของค่าเฉลี่ยแรง เสียดทานสถิต.....	57
ตารางที่ 16	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทิศทางของค่าเฉลี่ยแรง เสียดทานจลน์.....	57
ตารางที่ 17	แสดงค่า R square ของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต.....	58
ตารางที่ 18	แสดงค่า R square ของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์.....	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 19	แสดงการทดสอบความเป็นปกติของการแจกแจงปริมาณแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ที่วัดได้ (normality test) ด้วย Kolmogorov-Smirnov.....	74
ตารางที่ 20	แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ในลวดทั้ง 4 ขนาด.....	76
ตารางที่ 21	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม.....	76
ตารางที่ 22	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.018 นิ้ว ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม.....	77
ตารางที่ 23	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016x0.016 นิ้ว ² ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม.....	77
ตารางที่ 24	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว ² ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม.....	78
ตารางที่ 25	แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ในมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม.....	78
ตารางที่ 26	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 0 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	79
ตารางที่ 27	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 1 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	79
ตารางที่ 28	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 2 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 29	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต 3 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	80
ตารางที่ 30	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต 4 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	80
ตารางที่ 31	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต 6 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	80
ตารางที่ 32	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต 8 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	81
ตารางที่ 33	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต 10 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด	81

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1	รูปแสดงการเกิดแรงเสียดทาน.....	7
รูปที่ 2	รูปแสดงกลไกการเกิดแรงเสียดทานเมื่อขยายผิวสัมผัสให้เห็นความขรุขระของพื้นผิว สังเกตเห็นว่าผิวสัมผัสจะมีลักษณะเป็นปุ่มเล็กๆมากมาย ซึ่งเป็นพื้นที่จริงที่สัมผัสกันของวัตถุ.....	9
รูปที่ 3	แสดงลักษณะแรงที่เกิดขึ้นระหว่างลวดและร่องแบรคเกตในมุมมองด้านหน้าและมุมมองด้านข้างทั้งในกรณีที่ไม่มี การชนกันของแบรคเกตและลวด (passive configuration) และมีการชนกันของลวดและร่องแบรคเกต (active configuration). 10	10
รูปที่ 4	รูปแสดงผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการที่พื้นหน้ายื่นยาวออกมา ซึ่งเป็นผลจากการล้มเอียงของฟันซี่ในระหว่างการเคลื่อนฟันไปบนลวดโค้งที่อ่อน.....	16
รูปที่ 5	แสดงลักษณะการมีจุดรองรับที่ต่างกันของลวด (ก) แสดงลักษณะที่จุดรองรับเคลื่อนได้ทำให้ลวดตรงกลางมีความแข็งตึงน้อยกว่าและลวดเกิดการโค้งงอได้ง่ายกว่า (ข) แสดงลักษณะที่มีจุดรองรับคงที่ ลวดตรงกลางจะมีความแข็งตึงมากกว่าและเกิดการโค้งงอได้น้อยกว่า.....	17
รูปที่ 6	แสดงการมัดวงแหวนยาง (ก) มัดรูปตัวโอ (ข) มัดรูปเลขแปด.....	18
รูปที่ 7	แสดงภาพมุมวิกฤต (critical angle, θ_c).....	20
รูปที่ 8	แสดงแบรคเกตชนิดมาตรฐานและแบรคเกตชนิดต่างๆที่ออกแบบเพื่อลดแรงเสียดทาน (ก) แบรคเกตชนิดมาตรฐาน (ข) VersaT (ค) Shoulder และ (ง) Synergy.....	22
รูปที่ 9	รูปแสดงแบรคเกตแบบมัดด้วยตัวเอง (self ligating brackets) (ก) ชนิดคลิปหนีบ และ (ข) ชนิดแผ่นเลื่อน.....	23
รูปที่ 10	แสดงการเกิดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตจะเกิดแรงปกติกดที่มุมทั้งสองด้านของร่องแบรคเกต (F_b) ซึ่งถ้าแบรคเกตมีการบิดหมุนไปมากก็จะทำให้แรงกดนี้มีปริมาณมากด้วย.....	25
รูปที่ 11	แสดงตำแหน่งของศูนย์กลางความต้านทานของฟัน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของรากฟันหรือกระดูกที่อยู่รอบรากฟันเปลี่ยนไป.....	27
รูปที่ 12	รูปแสดงยางพอลิเอเธนสี่เทา แมริวไฮลเดอร์ และเอ็กพลอเรียร์.....	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

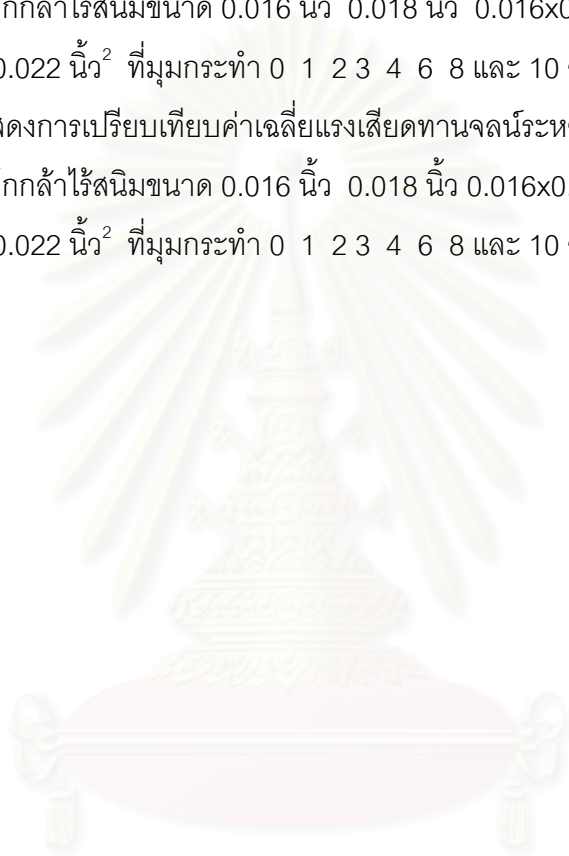
รูปที่ 13	รูปแสดงเครื่องมือสำหรับยึดแบรคเกตเพื่อให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งพลาสติกแข็งเท่ากันทุกครั้ง.....	33
รูปที่ 14	แสดงแท่งพลาสติกแข็งหลักจากติดแบรคเกตแล้ว และพร้อมที่จะทำการทดลอง.....	33
รูปที่ 15	แสดงเครื่องมือสำหรับตั้งมุมการเอียงของร่องแบรคเกตให้เอียงในขนาดที่ต้องการ โดยจะมีองศาละ 1 อัน.....	34
รูปที่ 16	แสดงลักษณะการใช้เครื่องมือในการตั้งมุมการเอียงของร่องแบรคเกต.....	34
รูปที่ 17	แสดงเครื่องมือสำหรับยึดแท่งพลาสติกแข็งให้อยู่กับที่และอยู่ในมุมที่ต้องการ ขณะทำการทดลอง.....	35
รูปที่ 18	แสดงเครื่องมือสำหรับจับยึดลวดติดกับครอสเสดของเครื่องยูนิเวอร์ซัลเทสติง มะซีนให้อยู่ตรงในแนวตั้ง.....	35
รูปที่ 19	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของเครื่องมือขณะทำการทดลองดึงลวด.....	36
รูปที่ 20	แสดงลักษณะเครื่องยูนิเวอร์ซัลเทสติงมะซีน.....	37
รูปที่ 21	แสดงตุ้มน้ำหนักขนาด 5 นิวตัน.....	37
รูปที่ 22	แสดงลวดที่จะทำการทดลองที่ตัดให้ได้ความยาว 27.5 มิลลิเมตรและขีดตามที่ต้องการแล้ว.....	39
รูปที่ 23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ลวดเคลื่อนไป.....	41
รูปที่ 24	แผนภูมิแท่งแสดงขนาดของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของลวดทั้ง 4 ขนาดที่มุม 0 องศา.....	44
รูปที่ 25	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรคเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ²	46
รูปที่ 26	แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบรคเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ²	47
รูปที่ 27	แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรคเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว ² และ 0.016x0.022 นิ้ว ² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา.....	47

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 28 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบร็กเกต และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา..... 48

รูปที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบร็กเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา..... 48

รูปที่ 30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบร็กเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา..... 49



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการเคลื่อนที่ของวัตถุให้เคลื่อนที่ไปตามลวดจัดพื้น (sliding mechanics) จะต้องมีแรงเสียดทาน (frictional force) เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแบรกกเกตและลวดเสมอ แรงใดๆที่จะทำให้พื้นเคลื่อนที่ได้ นั่น อย่างน้อยจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้ ซึ่งแรงที่มากกว่านี้จะถูกถ่ายทอดต่อไปยังอวัยวะที่รองรับพื้น และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพื้นต่อไป โดยแรงนี้ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายต่ออวัยวะปริทันต์

แรงเสียดทานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากสำหรับการจัดพื้น ทั้งในการเคลื่อนที่เชิงยาวเพื่อเปิดช่องว่างที่ถอนพื้นในกลวิธีการเลื่อนไถล (sliding mechanics) และในการเรียงพื้นให้เรียบ ซึ่งลวดต้องมีการเคลื่อนผ่านแบรกกเกตไป

แรงเสียดทานเป็นแรงที่ต้านไม่ให้พื้นผิวหนึ่งเคลื่อนผ่านไปบนอีกพื้นผิวหนึ่ง และมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัตถุเคลื่อนที่หรือเริ่มที่จะเคลื่อนที่ไปบนอีกวัตถุหนึ่ง โดยที่แรงเสียดทานนี้ ได้มีผู้ที่ทำการศึกษา มาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 17 และ 18 คือ Amontons และ Coulomb (Nanda และคณะ, 1997) กล่าวถึงกฎของแรงเสียดทาน เรียกว่า กฎของ Coulomb คือ แรงเสียดทาน (frictional force, f) เป็นผลของแรงที่พื้นผิวหนึ่งกดบนอีกพื้นผิวหนึ่ง โดยมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งหรือทั้งสองพื้นผิว (normal force, N) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (coefficient of friction, μ) ซึ่งเป็นค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์กับลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ($f = \mu N$) และแรงเสียดทานไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสและความเร็วที่วัตถุทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านกัน

วัตถุหนึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ

- (1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (coefficient of static friction) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงที่จำเป็นในการทำให้วัตถุที่หยุดนิ่งเริ่มมีการเคลื่อนที่
- (2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (coefficient of kinetic friction) ซึ่งแสดงถึงแรงที่จะทำให้วัตถุที่เคลื่อนที่อยู่นั้น สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้

ซึ่งโดยปกติค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตจะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ แต่มีบางการศึกษาที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตเมื่อมีการชนกันของลวดเกิดขึ้น (Kusy และคณะ, 1991; Michelberger และคณะ, 2000) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทาน (Vaughan และคณะ, 1995) เช่น วัสดุที่ใช้ผลิตเป็นลวดและแบร็กเกต ขนาดของช่องว่างระหว่างลวดและแบร็กเกต ความแข็งของลวด มุมที่ลวดกระทำต่อร่องแบร็กเกต วิธีการมัดลวดให้อยู่ในแบร็กเกต และปัจจัยภายนอกที่อาจจะมีผลทำให้แรงเสียดทานลดหรือเพิ่มขึ้น เช่น น้ำลาย คราบจุลินทรีย์ เป็นต้น

เนื่องจากปัจจุบันลวดและแบร็กเกตชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดยังคงเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะมีราคาถูก และมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดี ซึ่งมีผลการศึกษามากมายที่แสดงให้เห็นว่าผิวสัมผัสระหว่างลวดและแบร็กเกตที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดค่าแรงเสียดทานต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับลวดและแบร็กเกตชนิดอื่นๆ (Vaughan และคณะ, 1995; Tselepis และคณะ, 1994; Kusy และคณะ, 1991; Michelberger และคณะ, 2000; DeFranco และคณะ, 1995)

จากหลายการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของลวดจะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น (Vaughan และคณะ, 1995; Downing และคณะ, 1994) ลวดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดที่มีหน้าตัดเป็นรูปกลม (Vaughan และคณะ, 1995; Michelberger และคณะ, 2000) และเมื่อมุมที่ลวดกระทำต่อร่องแบร็กเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย (Tselepis และคณะ, 1994; DeFranco และคณะ, 1995; Dickson และคณะ, 1991) แต่มีบางการศึกษาที่พบว่า ลวดที่มีหน้าตัดรูปเหลี่ยมจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดที่มีหน้าตัดกลมก็ต่อเมื่อมุมที่ลวดและแบร็กเกตกระทำกันเป็นศูนย์องศา (Frank และ Nikolai, 1980) ซึ่งในความเป็นจริง เมื่อฟันเคลื่อนที่ไป แนวแกนฟันก็เปลี่ยนแปลงไปด้วยทำให้มุมที่ลวดกระทำต่อร่องแบร็กเกตเปลี่ยนแปลงไป แรงที่มุมของแบร็กเกตกดลงบนลวดเพิ่มมากขึ้น และมีผลให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากในลวดที่มีหน้าตัดกลม จุดที่ลวดและแบร็กเกตสัมผัสกันจะเป็นจุดเล็กๆ ทำให้ปริมาณแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวสัมผัสมีมาก ดังในการศึกษาของ Frank และ Nikolai (1980) ที่พบว่าลวดขนาด 0.020 นิ้ว ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดขนาด 0.017×0.025 นิ้ว² เนื่องจากมุมของแบร็กเกตฝังตัวลงไปในเนื้อของลวดกลม และทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นได้ แต่ในลวดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม บริเวณที่แบร็กเกตสัมผัสกับลวดจะเป็นบริเวณที่กว้างกว่า ทำให้แรงกดเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิวสัมผัสลดลงทำให้มุมของแบร็กเกตไม่ฝังจมลงไปในเนื้อลวด และมีผลให้แรงเสียดทานลดลง และยังพบว่าเมื่อความกว้างของแบร็กเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ลวดที่มีขนาดต่างกัน ก็จะทำให้มีความแข็งตึง (stiffness) ของลวดต่างกัน ซึ่ง มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยลวดที่มีขนาดใหญ่จะมีความแข็งตึงมาก ทำให้ลวด ไม่เกิดการโค้งงอเมื่อพื้นเคลื่อนที่ไปบนลวด ซึ่งการโค้งงอนี้จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวด และแบรคเกตมาก ดังนั้นจึงควรใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ลวดที่มีความแข็งตึงพอที่จะต้าน ไม่ให้เกิดการโค้งงอของลวด แต่ลวดที่มีขนาดใหญ่ไม่เพียงแต่จะทำให้ความแข็งตึงของลวด เพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรคเกตลดลงด้วย ซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทาน มากขึ้น จึงควรใช้ลวดที่มีขนาดเล็กกว่าร่องแบรคเกต เพื่อให้มีช่องว่างพอให้แบรคเกตเคลื่อนผ่าน ไปบนลวดได้ แต่ต้องมีความแข็งตึงมากเพียงพอที่จะรักษารูปร่างของขากรรไกรที่ต้องการไว้และ ไม่ทำให้เกิดการบิดงอของลวด ซึ่ง Nanda และคณะ (1997) แนะนำให้ใช้ลวดกลมขนาด 0.016 นิ้ว ในร่องแบรคเกตขนาด 0.018×0.025 นิ้ว² และใช้ลวดขนาด 0.018 นิ้ว ในร่องแบรคเกตขนาด 0.022×0.028 นิ้ว² ในการเคลื่อนฟัน

จากการศึกษาของ Tselepis และคณะ (1994) พบว่าเมื่อมุมที่ลวดกระทำกับแบรคเกต เพิ่มขึ้น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรที่จะปรับระดับให้ร่องแบรคเกต อยู่ในแนวเดียวกันก่อนที่จะเริ่มมีการเคลื่อนฟันไปบนลวด เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด แต่ ในความเป็นจริงเมื่อมีการให้แรงที่ฟัน ฟันจะเคลื่อนแบบล้มเอียง (tipping) ก่อนที่แบรคเกตจะเริ่ม เลื่อนไกลไปตามลวด ทำให้เกิดมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต ดังนั้นแรงเสียดทานที่ เกิดขึ้นเมื่อมีมุมกระทำนี้จึงมีความสำคัญต่อการเคลื่อนฟันมากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง ที่ลวดและร่องแบรคเกตกระทำมุมเป็นศูนย์องศาต่อกัน

และเนื่องจากลวดที่ใช้ในระหว่างที่มีการเคลื่อนฟันมักจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของร่อง แบรคเกต ทำให้มีช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรคเกต ดังนั้นในลวดที่มีขนาดเล็ก การเคลื่อน ไกลฟันไปตามเส้นลวดอาจจะไม่ต้องมีการปรับระดับฟันเพื่อให้ร่องแบรคเกตอยู่ในแนวเดียวกัน เป็นศูนย์กลางพอดีเสมอไป แม้ว่าอาจจะมีมุมที่กระทำต่อกันได้บ้าง แต่ไม่มีผลทำให้แรงเสียด ทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการที่ไม่ต้องมีการเรียงฟันให้มีระดับของร่องแบรคเกตอยู่ในแนวเดียวกัน เป็น การลดเวลาและจำนวนลวดที่ต้องใช้ในการจัดระดับของฟัน ทำให้ลดเวลาในการจัดฟันลง (Kusy และ Whitley, 1999) แต่หากระดับของร่องแบรคเกตต่างกันมาก ๆ แล้วยังคงใช้ลวดโค้งขนาดเล็ก ก็ จะทำให้มีการบิดงอของลวดมาก ซึ่งกลับจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมาก ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดคือ ต้องจัดระดับให้ร่องแบรคเกตอยู่ในแนวใกล้เคียงกันมากที่สุดก่อนที่จะเริ่มเคลื่อนฟัน

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงศึกษาถึงขนาดและรูปร่างของลวดที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันไป ตามลวดที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรคเกตน้อยที่สุด เพื่อเป็นประโยชน์ต่อทันตแพทย์

ในการเลือกใช้ลวดในการจัดฟันที่มีขนาดและรูปร่างหน้าตัดเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพในการเคลื่อนฟันโดยวิธีการเคลื่อนไกลไปบนลวดมากที่สุด และยังคงศึกษาถึงมุมที่ลวดกระทำต่อร่องแบรคเกตในขนาดที่สามารถเคลื่อนฟันไปได้ โดยที่ไม่มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เพื่อสามารถเป็นเกณฑ์พิจารณาว่าในระหว่างการเคลื่อนฟัน การลัดเอียงของฟันเพียงใดไม่มีผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่เกิดผลเสียอื่นที่ไม่ต้องการกับฟันข้างเคียง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงขนาดของแรงเสียดทานระหว่างแบรคเกตและลวดที่มีขนาดต่างกัน ขณะที่มีมุมระหว่างลวดและร่องแบรคเกตเป็นศูนย์องศา
2. เพื่อศึกษาถึงขนาดของแรงเสียดทานเมื่อลวดและร่องแบรคเกตกระทำมุมต่างๆกัน
3. เพื่อศึกษาถึงขนาดของแรงเสียดทานเมื่อขนาดของลวดเปลี่ยนไป
4. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแรงเสียดทานเมื่อขนาดของลวดเปลี่ยนไป
5. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแรงเสียดทานเมื่อมุมที่ลวดกระทำกับร่องแบรคเกตเปลี่ยนไป

สมมุติฐานการวิจัย

1. มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานในลวดที่มีขนาดต่างกันเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตเท่ากัน
2. มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานเมื่อลวดและร่องแบรคเกตกระทำมุมต่างกัน ขณะที่ขนาดลวดเท่ากัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการศึกษาช่วยในการเลือกใช้ลวดที่มีขนาดและรูปร่างหน้าตัดที่เหมาะสมในการที่จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรคเกตน้อยที่สุด ขณะเคลื่อนฟันในทางคลินิก
2. เพื่อใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาว่าในระหว่างการเคลื่อนฟัน การลัดเอียงของฟันเพียงใดที่ไม่มีผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่เกิดผลเสียอื่นที่ไม่ต้องการ

กับพื้นที่ข้างเคียง ทำให้ลดความจำเป็นในการจัดระดับร่องแบริกเกตให้ทำมุมศูนย์ องศาพอดีกับลวดโค้ง

3. เพื่อนำผลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาค่าแรงเสียดทานจากแบริกเกตชนิดมาตรฐานและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
2. เป็นการศึกษาในสภาวะแห่งที่อุณหภูมิห้อง
3. มุมระหว่างลวดและร่องแบริกเกตที่ทำการศึกษาอยู่ที่ 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8 และ 10 องศา
4. ลวดที่ทำการศึกษาเป็นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมกลมขนาด 0.016 นิ้ว และ 0.018 นิ้ว และลวดเหลี่ยมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว²
5. แบริกเกตที่ใช้ในการทดลองเป็นแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับพื้นเรียบขนาด 0.018×0.025 นิ้ว² ชนิดมาตรฐานที่มีมุมต่างๆเป็นศูนย์องศา

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้มีขนาดและส่วนประกอบตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งนำมาจากบริษัทผู้ผลิตเพียงบริษัทเดียว
2. แบริกเกตที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบริกเกตพื้นเรียบชนิดมาตรฐาน มีขนาดร่องแบริกเกต 0.018×0.025 นิ้ว² ซึ่งมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันหมดตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต
3. ยางโพลีเอทเธนที่ใช้สำหรับมัดลวดกับแบริกเกตเป็นยางรุ่นเดียวกันจากบริษัทผู้ผลิตเดียวกัน
4. ค่าแรงเสียดทานได้จากการวัดโดยเครื่องยูนิเวอร์แซลเทสติงแมชชีน (Lloyd Universal Testing Machine, Model LR 10 K) โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก (load cell) 5 นิวตัน และทำการทดลองดึงด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที การแปลผลแรงเสียดทานสถิติทำได้โดยประเมินจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงกับระยะทางที่ลวดไถลไป เมื่อเส้นกราฟที่เกิดจากแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของเส้นกราฟจุดแรกก่อนที่จะมีการลดลงหรือคงที่ของเส้นกราฟ ที่จุดสูงสุดจุดนี้แรงที่อ่านได้คือค่าแรง

เสียดทานสถิต จากนั้นบันทึกขนาดแรงที่อ่านได้ที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรไว้ เพื่อที่จะทำการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะได้เป็นค่าแรงเสียดทานจลน์ต่อไป โดยหน่วยที่วัดได้จากเครื่องเป็นนิวตัน ทำการแปลงหน่วยจากนิวตันเป็นกรัม (1,000 กรัมเท่ากับ 9.81 นิวตัน)

5. ในการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ที่ไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยทางชีวภาพ (Biological response) เช่น น้ำลาย คราบจุลินทรีย์ เป็นต้น

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. กลุ่มตัวอย่างนำมาจากบริษัทผู้ผลิตเพียงบริษัทเดียวและเป็นการศึกษาในแบบจำลอง ในสภาวะแห่งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่เป็นไปตามสภาวะจริงในช่องปาก ดังนั้นการนำไปใช้ในทางคลินิกอาจจะไม่เป็นไปตามผลของการทดลองนี้ทั้งหมดได้ เนื่องจากสภาวะในช่องปากมีปัจจัยอื่นอีกมากมายที่มีผลต่อค่าแรงเสียดทานนี้
2. การทดลองเป็นการศึกษาเมื่อมุมระหว่างลวดและแบร็กเกตมีค่าตามที่กำหนด ซึ่งความเป็นจริงแล้ว เมื่อฟันมีการเคลื่อนที่ไป มุมที่ลวดและแบร็กเกตกระทำต่อกันจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

คำจำกัดความ

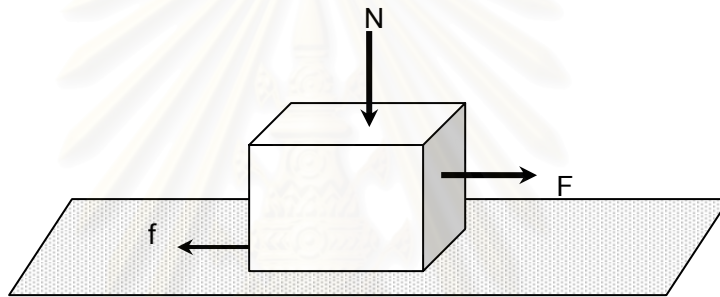
1. แรงเสียดทาน หมายถึง แรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์
2. แรงเสียดทานสถิต คือ แรงสูงสุดที่ทำให้ลวดเริ่มเคลื่อนที่ผ่านแบร็กเกต กำหนดจากแรงสูงสุดค่าแรงที่ลวดเริ่มเคลื่อนผ่านแบร็กเกตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ลวดเคลื่อนที่ไป
3. แรงเสียดทานจลน์ คือ ค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ลวดเคลื่อนที่ในระยะทางระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตร

บทที่ 2

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

กฎของความเสียดทาน

เมื่อวัตถุสองชิ้นสัมผัสกันและถูกกดด้วยแรงกระทำอันหนึ่ง (normal force, N) การเคลื่อนไหวหรือความพยายามที่จะเคลื่อนไหวของวัตถุแต่ละชิ้นเมื่อเทียบกับอีกชิ้นหนึ่งในทิศทางขนานกับผิวสัมผัสจะถูกต่อต้าน การต่อต้านนี้คือ ความเสียดทาน (friction) และแรงที่ต่อต้านนี้เป็นแรงในแนวสัมผัสกับผิวของวัตถุทั้งสอง เรียกว่า แรงเสียดทาน (frictional force) (รูปที่ 1) (ก่อเกียรติ บุญชูกุล และ เมธี หมั่นทำกร, 2541)



รูปที่ 1 รูปแสดงการเกิดแรงเสียดทาน

ความเสียดทานแบ่งได้เป็นหลายชนิด (สมศักดิ์ คำปลิว, 2527) ได้แก่

1. ความเสียดทานแบบแห้ง (dry friction) เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของของแข็งกับของแข็งซึ่งไม่ได้มีการหล่อลื่น ในขณะที่ผิวสัมผัสทั้งสองไถลหรือพยายามที่จะไถลผ่านกัน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางสวนกันกับทิศทางเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกแรงเสียดทานชนิดนี้ว่า แรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ (Coulomb friction) ซึ่งได้จากการทดลองของ Coulomb ในปี ค.ศ. 1781 กล่าวว่าแรงเสียดทานเป็นผลของแรงที่พื้นผิวหนึ่งกดบนอีกพื้นผิวหนึ่ง ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งหรือทั้งสองพื้นผิว (normal force, N) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (coefficient of friction, μ) ซึ่งเป็นค่าคงที่และมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวของวัตถุ ($f = \mu N$ คือสูตรของแรงเสียดทาน), แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสและไม่ขึ้นกับความเร็วที่วัตถุทั้งสองเคลื่อนผ่านกัน (Nanda และคณะ, 1997)

2. ความเสียดทานของของไหล (fluid friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นย่อยๆ ของของไหล เช่น ของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งหากมีการใช้สารหล่อลื่น เช่น น้ำมัน น้ำ หรือน้ำลาย ในทางทันตกรรม แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงเสียดทานของของไหล
3. ความเสียดทานในการกลิ้ง (rolling friction) คือความต้านทานต่อการกลิ้งของวัตถุรูปวงกลม เช่น ล้อรถ
4. ความเสียดทานภายใน (internal friction) พบในของแข็งทุกชนิดที่รับแรงกลับไปกลับมาแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำให้เกิดความเสียดทานภายใน และเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน

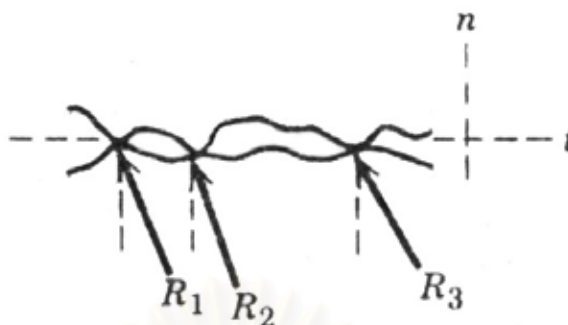
วัตถุหนึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(coefficient of friction, μ)เกิดขึ้น 2 ชนิด คือ

- (1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (coefficient of static friction) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงที่ทำให้วัตถุที่หยุดนิ่งเริ่มมีการเคลื่อนที่
- (2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (coefficient of kinetic friction) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงที่ทำให้วัตถุที่เคลื่อนที่อยู่ สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์และหนึ่งและเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะความหยาบของพื้นผิวที่สัมผัสกัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ต้องมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตเสมอ

เมื่อวัตถุเคลื่อนด้วยความเร็วสูงมากถึงค่าหนึ่งจะได้รับผลจากการหล่อลื่นของก๊าซที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ค่าแรงเสียดทานจลน์ลดลงมาก ดังนั้นค่าแรงเสียดทานจลน์ขึ้นอยู่กับสภาพของผิวสัมผัสและความเร็วที่ไหลผ่านกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาที่ผิวสัมผัสของวัตถุ ของแข็งต่างๆไม่ว่าจะมีผิวเรียบเพียงใดก็ตาม หากนำมาขยายขึ้นจะเห็นได้ว่ายังคงมีลักษณะขรุขระอยู่

เมื่อวัตถุเริ่มที่จะไหลผ่านกัน ยอดตะปุ่มตะป่ำที่โผล่ออกมาจากแต่ละผิวจะเสียบเข้าไปในร่องของผิวตรงข้ามได้ไม่ลึกเหมือนขณะหยุดนิ่ง ทำให้แรงเสียดทานสถิตมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์ หลังจากไหลแล้วแรงเสียดทานจะคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง หากแรงที่กระทำให้วัตถุมีการเคลื่อนที่ ยังคงเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของวัตถุเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานจึงจะลดลง เนื่องจากเมื่อวัตถุไหลที่ความเร็วต่ำ รอยขรุขระจะตักไม่ถึงกันหลุมและเกี่ยวกันอย่างหมิ่นๆจึงทำให้เคลื่อนผ่านกันได้ง่าย แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นรอยขรุขระจะสัมผัสกันได้เฉพาะยอดจึงทำให้แรงเสียดทานลดลงอีกครั้ง



รูปที่ 2 รูปแสดงกลไกการเกิดแรงเสียดทานเมื่อขยายผิวสัมผัสให้เห็นความขรุขระของพื้นผิว สังเกตเห็นว่าผิวสัมผัสจะมีลักษณะเป็นปุ่มเล็กๆมากมาย ซึ่งเป็นพื้นที่จริงที่สัมผัสกันของวัตถุ

แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับพื้นที่จริงหรือพื้นที่ที่เห็นว่าสัมผัสกัน (รูปที่ 2) เพราะส่วนที่สัมผัสกันจริงคือส่วนที่เป็นยอดนูนเล็กๆของวัตถุนั้น ซึ่งไม่เท่ากับพื้นที่ผิวทั้งหมดของวัตถุ

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานแบบแห้งมีมากมาย เช่น ชนิดของวัสดุ, ความหยาบความละเอียดของผิววัตถุ, แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล, ความแนบสนิทของผิวสัมผัส, แรงยึดเหนี่ยวระหว่างจุดสัมผัส, แผ่นฟิล์มบางๆของออกไซด์, น้ำมัน, ฝุ่นละออง เป็นต้น

กฎของแรงเสียดทาน (McLean and Nelsen, 1962) คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นกับค่าแรงกด (normal force) โดยแปรตามกัน
2. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัส
3. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต
4. ที่ความเร็วต่ำแรงเสียดทานไม่ขึ้นกับความเร็ว แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นไปแรงเสียดทานจะลดลง
5. แรงเสียดทานสถิตจะไม่มากไปกว่าแรงที่ทำให้วัตถุคงอยู่ในตำแหน่งนั้นในภาวะสมดุล

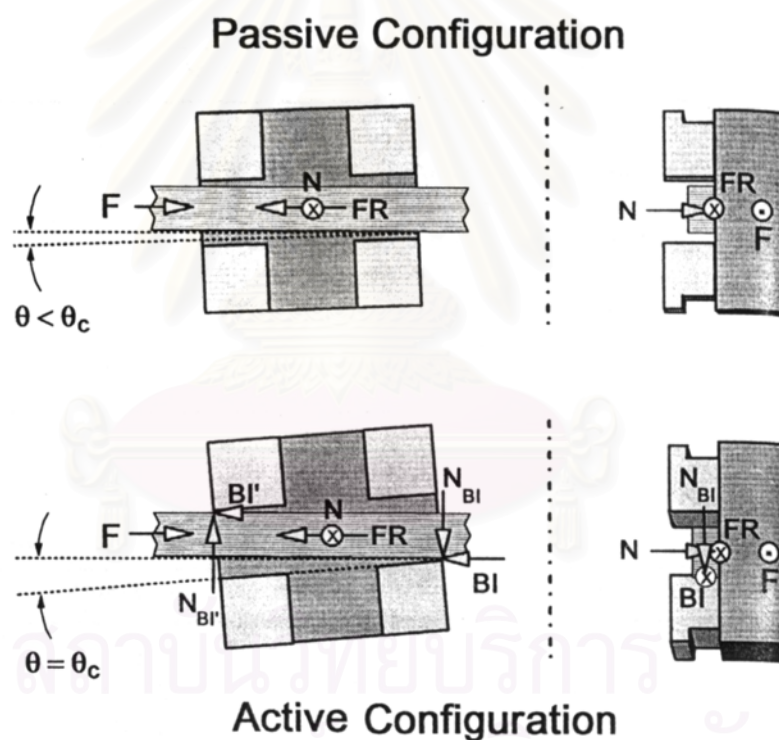
แรงเสียดทานกับงานทันตกรรมจัดฟัน

การเคลื่อนฟันในทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อปิดช่องว่างที่ถอนฟันทำได้ด้วยกลวิธี 2 อย่าง (Nanda และคณะ, 1997) คือ

1. กลวิธีแบบใช้ลูป (loop mechanics) สามารถปิดช่องว่างได้โดยการใส่ลูป (loop) ชนิดต่างๆ ซึ่งทำขึ้นมา อาจจะเป็นแบบลวดโค้งทั้งหมด (full arch wire) หรือเป็นส่วนๆ (section) วิธีการนี้สามารถเคลื่อนฟันได้โดยการปรับลูป ซึ่งทำให้มีอัตราส่วนระหว่างโหลดกับดีเฟลกชัน

- ต่ำ (load-deflection rate) และสามารถกำหนดสัดส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงได้ (moment-force ratio)
2. กลวิธีการเลื่อนไถล (sliding mechanics) เป็นการปิดช่องว่างโดยการเคลื่อนพื้นและแบร็กเกตไปตามลวด เช่น การเคลื่อนพื้นเขี้ยวเพื่อแทนที่ตำแหน่งพินกรามน้อยที่ถูกถอนไป หรือเคลื่อนลวดผ่านร่องของแบร็กเกตและท่อ (tubes) เช่น การดึงพินตัดทั้งหมดเพื่อปิดช่องว่างหน้าพื้นเขี้ยว

ปัจจัยหลักที่ทำให้ทั้งสองกลวิธีมีความแตกต่างกันคือความเสียดทาน เนื่องจากกลวิธีแบบใช้ลูปไม่ได้รับผลจากความเสียดทานจึงเรียกได้ว่าเป็นวิธีการปราศจากความเสียดทาน (friction-free หรือ frictionless technique) ในขณะที่กลวิธีการเลื่อนไถลได้รับผลของความเสียดทานในการเคลื่อนพื้น ดังนั้นจึงอาจเรียกว่ากลวิธีแห่งความเสียดทาน (friction mechanics)



รูปที่ 3 แสดงลักษณะแรงที่เกิดขึ้นระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตในมุมมองด้านหน้าและมุมมองด้านข้าง ทั้งในกรณีที่ไม่มีารชนกันของแบร็กเกตและลวด (passive configuration) และมีการชนกันของลวดและร่องแบร็กเกต (active configuration)

ลักษณะแรงที่เกิดขึ้นระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตในการเคลื่อนพื้นแบบเลื่อนไถลจะเหมือนกับการพิจารณาแรงเสียดทานโดยทั่วไป คือจะมีแรงเกิดขึ้นสองแรง ได้แก่ แรงเสียดทานซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ และแรงปกติซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวลวดและ/

หรือร่องแบรกกเกต โดยต้องพิจารณาทั้งมุมมองจากด้านหน้า มุมมองจากด้านข้าง และมุมมองจากด้านบดเคี้ยว รวมทั้งต้องพิจารณาทั้งในขณะไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกต (passive configuration) และเมื่อมีมุมกระทำ (active configuration) ดังรูปที่ 3

ปัจจัยที่มีผลต่อระดับแรงเสียดทานระหว่างแบรกกเกตและลวด

เนื่องจากมีปัจจัยมากมายที่มีผลต่อค่าแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรกกเกต ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งพอที่จะสรุปปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานได้ดังต่อไปนี้ (ปรับปรุงจาก Nanda และคณะ, 1997; Vaughan และคณะ, 1995)

1. ลวดโค้ง (arch wire)

- 1.1 ชนิดของลวด คือวัสดุที่ใช้ทำเป็นลวดโค้ง ซึ่งในปัจจุบันมีลวดหลายชนิดที่ใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน เช่น ลวดนิกเกิลไททาเนียม ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าไททาเนียม ลวดพลาสติก เป็นต้น ลวดแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ต่างกัน
- 1.2 ขนาดและรูปร่างหน้าตัดของลวด การใช้ลวดแต่ละขนาดก็เพื่อวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน เช่น ลวดขนาดเล็กมักจะอ่อนทำให้เกิดแรงกระทำต่อฟันน้อยและมีการเสียรูปร่างอย่างถาวรน้อย (permanent deformation) ดังนั้นจึงมักจะใช้ในการเรียงฟันในระยะแรกที่ต้องการให้ฟันเรียงตัวเรียบและมีระดับใกล้เคียงกัน ส่วนลวดที่มีขนาดใหญ่จะแข็งจึงมักใช้ในระยะเวลาหลังของการจัดฟัน เพื่อคงลักษณะรูปร่างของฟันในขากรรไกรให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และลวดที่มีหน้าตัดเป็นเหลี่ยมจะใช้ในการปรับตำแหน่งการบิดเอียงของฟัน (inclination) ทั้งขนาดและรูปร่างหน้าตัดของลวดต่างมีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป
- 1.3 ลักษณะพื้นผิว ลวดชนิดเดียวกันอาจจะมีลักษณะพื้นผิวต่างกัน เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตต่างกัน องค์ประกอบต่างกัน เป็นต้น ลวดที่มีพื้นผิวที่หยาบกว่ามักจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรกกเกตมากกว่าด้วย
- 1.4 ค่าความแข็งตึงของลวด (stiffness) ลวดที่มีค่าความแข็งตึงต่ำ เมื่อเคลื่อนแบรกกเกตจะทำให้ลวดมีการโค้งงอและทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น แต่บางการศึกษา (Frank และ Nikolai, 1980) พบว่าลวดที่มีค่าความแข็งตึงสูงมากๆ เช่น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อร่องแบรกกเกตกระทำมุมกับลวดจะทำให้เกิดแรงปกติ (normal force) กดที่มุมด้านตรงกันข้าม

ของร่องแบริกเกตในปริมาณมากกว่าลวดที่มีค่าความแข็งดิ่งต่ำ เช่น ลวดนิกเกิลไททาเนียม ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบริกเกตมากกว่า

2. การมัดลวดโค้งติดกับแบริกเกต

2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้มัด สิ่งที่ใช้ในการมัดลวดโค้งให้อยู่ในร่องแบริกเกต เช่น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม วงแหวนยาง เป็นต้น วัสดุต่างก็ทำให้เกิดแรงเสียดทานต่างกัน

2.2 วิธีในการมัด การมัดด้วยวิธีที่ต่างกันย่อมทำให้เกิดแรงปกติในปริมาณที่ต่างกันด้วย ถ้าหากมัดแน่นก็จะทำให้เกิดแรงปกติมาก เช่น การใช้แบริกเกตแบบมัดได้ด้วยตัวเอง (self ligating bracket) จะทำให้เกิดแรงปกติน้อยกว่าการมัดด้วยวงแหวนยาง แต่หากมัดวงแหวนยางเป็นรูปตัวโอ (figure O) ก็จะทำให้เกิดแรงปกติน้อยกว่าการมัดเป็นรูปเลขแปด (figure 8)

3. แบริกเกต

3.1 ชนิดของแบริกเกต แบริกเกตที่ทำด้วยวัสดุต่างกันย่อมทำให้แบริกเกตมีคุณสมบัติทางกายภาพต่างกัน และมีลักษณะพื้นผิวที่ต่างกันด้วย เช่น แบริกเกตเซรามิกมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบกว่าแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบริกเกตมากกว่า

3.2 ความกว้างของร่องแบริกเกต แบริกเกตที่มีความกว้างมากจะมีโอกาสเกิดการชนกันของลวดและร่องแบริกเกตได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น

3.3 กระบวนการผลิต เช่น แบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหล่อ (sintering) จะทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบริกเกตแบบธรรมดา (conventional) (Vaughan และคณะ, 1995)

3.4 การออกแบบแบริกเกต เช่น แบริกเกตแบบเดี่ยว (single) หรือแบบแฝด (twin) หรือแบบที่ออกแบบมาให้ลดค่าแรงเสียดทาน เช่น มีมุมโค้งมน มีปุ่มค้ำ (boss) ช่วยลดแรงกดจากลวดหรือวงแหวนยางที่มัด แบริกเกตแบบมัดด้วยตัวเอง (self-ligating bracket) แบริกเกตที่มีการปรับมุมต่างๆให้ก่อน (preadjusted brackets) ซึ่งมีการปรับความหนาของฐาน (first order bend, in-out bend) มุมการเอียงของร่องแบริกเกต (second order bend, angulation) และมุมการบิดของร่องแบริกเกต (third order bend, torque)

4. ลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน

4.1 ระยะห่างระหว่างแบริกเกต เมื่อมีระยะห่างระหว่างแบริกเกตมากจะทำให้ลวดบริเวณนั้นมีค่าความแข็งดิ่งลดลง ซึ่งมีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

4.2 ระดับของร่องแบริกเกตกับฟันข้างเคียง ถ้าหากมีระดับของร่องแบริกเกตต่างกันมากก็จะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากด้วย

- 4.3 มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตทั้งในทิศทางใกล้กลางไกลกลางและใกล้ล้นใกล้ริมฝีปาก (second และ third order deflection) เมื่อมีการเคลื่อนฟันไปตามลวด ฟันจะมีการล้มเอียงและทำให้เกิดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตขึ้น
- 4.4 แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน ตำแหน่งที่ให้แรงและวิธีในการเคลื่อนฟัน เช่น การใช้ยางวง (elastic) หรือโซ่ยาง (elastomeric chain) การใช้สปริง (coil spring) เป็นต้น มีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
5. ปัจจัยภายในช่องปาก
- 5.1 น้ำลาย
- 5.2 คราบต่างๆ ได้แก่ คราบจุลินทรีย์ (plaque) แผ่นฟิล์มน้ำลาย (acquired pellicle) หินน้ำลาย (calculus) เมื่อมีคราบต่างๆเกาะที่ผิวลวดหรือมีการสึกกร่อนของผิวลวด ทำให้พื้นผิวของลวดมีความหยาบเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นด้วย
- 5.3 การสึกกร่อน (corrosion)
- 5.4 การทำงานของอวัยวะต่างๆในช่องปาก เช่น ลิ้น กล้ามเนื้อบดเคี้ยว แรงกดสบฟัน (occlusal force)

ผลของลวดต่อค่าแรงเสียดทาน

ชนิดของลวด

มีผู้ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับแรงเสียดทานที่เกิดจากลวดชนิดต่างๆมากมายพบว่าลวดที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดเป็นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนลวดที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุดคือลวดเบต้าไททาเนียม (Garner และคณะ, 1986; Kusy และคณะ, 1988; Tidy, 1989; Drescher และคณะ, 1989; Kapila และคณะ, 1990; Pratten และคณะ, 1990; Angolkar และคณะ, 1990; Kusy และคณะ, 1991; Ireland และคณะ, 1991; Omana และคณะ, 1992; Vaughan และคณะ, 1995; Michelberger และคณะ, 2000) แต่จากการศึกษาของ Frank และ Nikolai (1980) พบว่าเมื่อไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกต ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจะก่อให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดนิกเกิลไททาเนียม แต่เมื่อลวดและร่องแบรคเกตกระทำมุมต่อกันกลับพบว่าลวดนิกเกิลไททาเนียมมีแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นเดียวกับการศึกษาของ Peterson และคณะ (1982) เนื่องจากลวดนิกเกิลไททาเนียมมีความแข็งตึงต่ำ เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตจึงทำให้เกิดแรงกดลงบนลวดน้อยทำให้สามารถดึงผ่านไปได้ ในขณะที่

ที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงสูงเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตจะเกิดการชนกันของลวดและมุมแบรกกเกต ทำให้เกิดแรงกดบนลวดมาก ซึ่งมีผลให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

ส่วนการศึกษาของ Prososki และคณะ (1991) พบว่าลวดโครบอลท์โครเมียมทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และจากการศึกษาของ Dickson และคณะ (1994) ที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานในลวดอ่อนที่ใช้สำหรับการจัดระดับแบรกกเกต พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเกลียว (coaxial stainless steel) ขนาด 0.0155 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด รองลงมาคือลวดเส้นใยแก้ว (fiber optic glass, Optiflex) นิกเกิลไททาเนียม (Titanol) และ ลวดเหล็กกล้าชนิดเคลือบอีพอกซี (Epoxy-coated steel) และพบว่าชนิดของลวดมีผลต่อค่าแรงเสียดทานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปัจจุบันได้มีผู้พยายามคิดค้นลวดชนิดต่างๆที่หวังว่าจะทำให้เกิดแรงเสียดทานลดน้อยลง เช่น ลวดพลาสติก ลวดไอออนอิมพลานท์ (ion implantation) ลวดคอมโพสิต (composite wire) ลวดเส้นใยแก้ว ลวดที่เคลือบด้วยสารต่างๆ (coated wire) เช่น อีพอกซี เทฟลอน (teflon) เป็นต้น ซึ่งลวดต่างๆเหล่านี้ยังคงต้องมีการศึกษาค้นคว้าต่อไปถึงคุณสมบัติของลวด

ขนาดของลวด

มีหลายการศึกษาที่พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดลวดแล้วมีผลให้แรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรกกเกตเพิ่มขึ้นด้วย (Andreasen และ Quevedo, 1970; Echols, 1975; Riley และคณะ, 1979; Frank และ Nikolai, 1980; Garner และคณะ, 1986; Kapila และคณะ, 1990; Peterson และคณะ, 1982; Berger, 1990; Angolkar และคณะ, 1990; Bednar และคณะ, 1991; Ireland และคณะ, 1991; Tanne และคณะ, 1991; Vaughan และคณะ, 1995; Willems และคณะ, 2001)

จากการศึกษาของ Michelberger และคณะ (2000) พบว่าลวดที่มีรูปร่างหน้าตัดเหลี่ยมจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดที่มีหน้าตัดกลม แต่จากการศึกษาของ Frank และ Nikolai (1980) พบว่าเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกต ลวดกลมขนาด 0.020 นิ้วกลับทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหลี่ยมขนาด 0.017×0.025 นิ้ว² ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกต ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเสียดทานคือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างลวดและแบรกกเกต จึงทำให้ลวดเหลี่ยมซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าลวดกลมเกิดแรงเสียดทานมากกว่า แต่เมื่อมีมุมกระทำเกิดขึ้น ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาคือขอบมุมของแบรกกเกตที่ลวดสัมผัส ซึ่งในลวดกลมขอบของแบรกกเกตสามารถที่จะฝังลงไปในพื้นที่ของลวดทำให้เกิดแรง

เสียดทานมาก แต่ในลวดเหล็กจะมี การกระจายของแรงบนพื้นที่สัมผัสที่มากกว่า ทำให้มีแรงกด ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่น้อยกว่าจึงเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่น้อยกว่า

ลักษณะพื้นผิว

Kusy และคณะ (1988) ทำการศึกษาโดยใช้แสงสะท้อน (specular reflectance studies) เพื่อเปรียบเทียบความหยาบของพื้นผิวลวดชนิดต่างๆ ได้ผลเรียงจากพื้นผิวเรียบที่สุดไปหยาบที่สุดคือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโคบอลท์โครเมียม ลวดเบต้าไททาเนียม และลวดนิกเกิลไททาเนียม จากการศึกษาของ Kusy และ Whitley (1990) เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบของพื้นผิวและลักษณะความเสียดทานของลวดชนิดต่างๆ พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีพื้นผิวที่เรียบที่สุดและทำให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุดด้วย แต่สำหรับลวดนิกเกิลไททาเนียม และลวดเบต้าไททาเนียมกลับไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างความหยาบของพื้นผิวและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เพราะว่าลวดเบต้าไททาเนียมทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุดแต่ไม่ได้มีพื้นผิวที่หยาบที่สุด เนื่องจากในสภาวะแห้ง ลวดเบต้าไททาเนียมจะเกิดจุดเชื่อมต่อขนาดเล็ก (microwelds) กับแบร็กเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้มีความเสียดทานเพิ่มขึ้น ดังนั้น Kusy และ Whitley (1990) จึงสรุปว่าความหยาบของพื้นผิวไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะความเสียดทานในกลวิธีการเคลื่อนแบบเลื่อนไถลได้

ความแข็งดึงของลวด

ตามหลักทางกลศาสตร์ ลวดทางทันตกรรมจัดฟันมีลักษณะเป็นคานที่มีความยืดหยุ่น (elastic beam) ซึ่งมีจุดรองรับ (supports) ที่ปลายด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน เมื่อมีการให้แรงบนคานที่มีความยืดหยุ่นนี้จะทำให้มีการโค้งของคาน ซึ่งสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ถ้าอยู่ภายในระยะจำกัดความยืดหยุ่นของลวด (elastic limit)

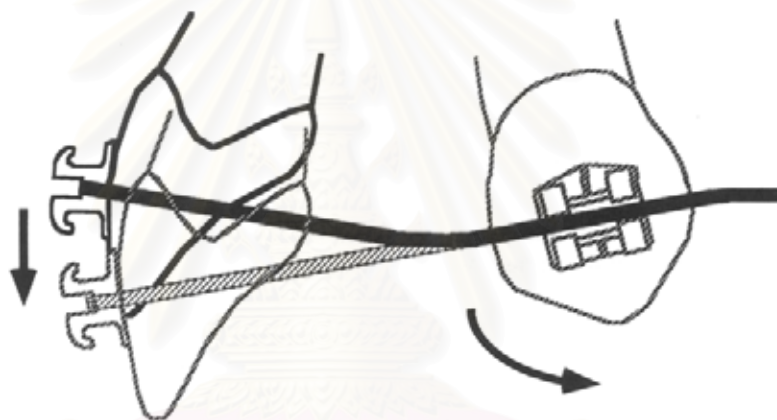
ความแข็งดึงของลวดสามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่ง (force-deflection curve) โดยความแข็งดึงจะมีความสัมพันธ์กับความชันของเส้นกราฟ ลวดที่มีค่าความแข็งดึงสูงกว่าจะมีการคืนกลับ (springiness) และระยะโก่ง (deflection) น้อยกว่าเมื่อมีการให้แรง

คุณสมบัติของลวดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และความยาวของลวด (L) โดยมีความสัมพันธ์คือ

เมื่อความยาวของลวดคงที่ ค่าความแข็งตึง (stiffness) $\propto d^4$ ค่าความแข็งแรง (strength) $\propto d^3$ ระยะทางที่ลวดสามารถโค้งงอไปโดยไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (range) $\propto 1/d$ และค่าการคืนกลับ (springiness) $\propto 1/d^4$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดคงที่ ค่าความแข็งตึง $\propto 1/L^3$ ค่าความแข็งแรง $\propto 1/L$ ระยะโค้งงอ $\propto L^2$ และค่าการคืนกลับ $\propto L^3$

ตัวอย่างเช่น ถ้าหากเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นสองเท่าจะทำให้ค่าความแข็งตึงเพิ่มขึ้น 16 เท่า ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 8 เท่า ระยะโค้งงอลดลงครึ่งหนึ่ง และค่าการคืนกลับลดลง 16 เท่า หากความยาวของลวดเพิ่มขึ้นสองเท่า จะทำให้มีค่าความแข็งตึงลดลง 8 เท่า ค่าความแข็งแรงลดลงครึ่งหนึ่ง ระยะโค้งงอเพิ่มขึ้น 4 เท่า และค่าการคืนกลับเพิ่มขึ้น 8 เท่า

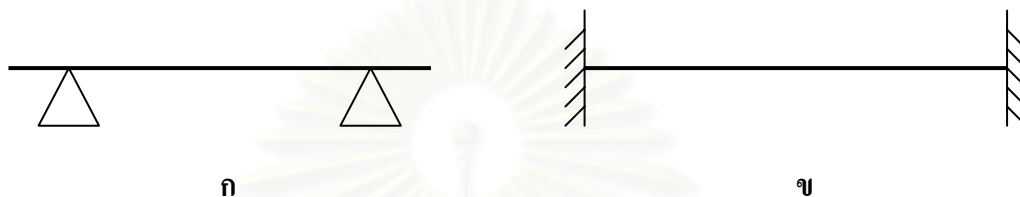


รูปที่ 4 รูปแสดงผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการที่ทำให้พื้นหน้ายื่นยาวออกมา ซึ่งเป็นผลจากการล้มเอียงของพื้นเขียวในระหว่างการเคลื่อนพื้นไปบนลวดโค้งที่อ่อน

ในกรณีที่มีการถอนพื้นกรามน้อยแล้วต้องเคลื่อนพื้นเขียวไปแทนที่ทำให้มีระยะห่างระหว่างแถบภาคเพิ่มขึ้น การใช้ลวดในทางทันตกรรมจัดฟันที่อ่อนเกินไปจะมีผลทำให้ลวดมีการโค้งงอไม่สามารถรักษารูปร่างของขากรรไกรที่ต้องการไว้ได้ และยังทำให้พื้นหน้ายื่นยาวออกมา (extrude) เนื่องจากพื้นเขียวจะมีการล้มเอียงในขณะที่เคลื่อนพื้นเขียวดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อชดเชยค่าความแข็งตึงที่ลดลงเนื่องจากการมีระยะห่างระหว่างแถบภาคเพิ่มขึ้น แต่ก็มีผลทำให้ค่าความเสียดทานเพิ่มขึ้นและเพิ่มโอกาสการเกิดการชนกัน (binding) ของลวดและแบรคเกต

นอกจากนี้จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการมีจุดรองรับของลวดต่างกัน มีผลให้ค่าความแข็งตึงต่างกันด้วย การมีจุดรองรับที่แข็งแรงทั้งสองปลายทำให้ค่าความแข็งตึงเพิ่มขึ้น 4 เท่า

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความแข็งตั้งให้ลวดในตำแหน่งที่ต้องการเคลื่อนพื่นซี่ียวสามารถทำได้ โดยการมัดลวดบริเวณพื่นกรามน้อยและหน้าต่อพื่นซี่ียวให้แน่น และยังเป็นการเพิ่มค่าแรงเสียดทานบริเวณนั้นเป็นการเสริมหลักยึดด้วย ซึ่งค่าความแข็งตั้งของลวดมีผลต่อค่าแรงเสียดทานของลวดด้วย (Frank และ Nikolai, 1980)



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการมีจุดรองรับที่ต่างกันของลวด (ก) แสดงลักษณะที่จุดรองรับเคลื่อนได้ทำให้ลวดตรงกลางมีความแข็งตั้งน้อยกว่าและลวดเกิดการโค้งงอได้ง่ายกว่า (ข) แสดงลักษณะที่มีจุดรองรับคงที่ ลวดตรงกลางจะมีความแข็งตั้งมากกว่าและเกิดการโค้งงอได้น้อยกว่า

แต่จากการศึกษาของ Articolo และ Kusy (1999) พบว่าลวดที่มีความแข็งตั้งมาก เช่น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีการชนกันของลวดและแบรกกเกตจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดที่มีค่าความแข็งตั้งต่ำกว่า เช่น ลวดนิกเกิลไททาเนียม

Thorstenson และ Kusy (2002) ได้ทำการศึกษาในแบรกกเกตชนิดมัดด้วยตัวเองเพื่อเปรียบเทียบแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในลวดขนาดต่างๆเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกต พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีค่าความแข็งตั้งมากกว่าทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นมากที่สุดซึ่งมากกว่าลวดนิกเกิลไททาเนียมขนาดเท่ากันที่มีค่าความแข็งตั้งน้อยกว่า

การเลือกขนาดลวดควรใช้ลวดที่มีความแข็งตั้งมากเพียงพอที่จะรักษาการเรียงตัวของพื่นในขากรรไกรไว้ได้ แต่ต้องมีช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตมากพอที่ให้พื่นมีการบิดตัวได้บ้างเนื่องจากเมื่อให้แรงที่พื่น พื่นจะล้มนเอียงไป ส่วนการชนกันของลวดและร่องแบรกกเกตจะเกิดมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่ใช้ดึงพื่น หากให้แรงมากพื่นก็มีการล้มนเอียงได้มาก ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาคือคุณภาพของการเคลื่อนพื่น คือต้องมีการเคลื่อนของพื่นส่วนที่ต้องการไปเคลื่อนไปในทิศทางและลักษณะที่ต้องการ และพื่นส่วนที่ไม่ต้องการให้เคลื่อนก็ไม่ควรที่เคลื่อนหรือเคลื่อนน้อยที่สุด

ผลของการมัดลวดโค้งติดกับแบร็กเกต

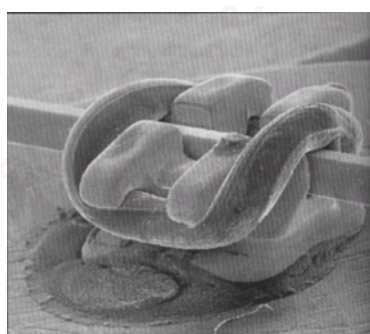
ชนิดของวัสดุที่ใช้มัด

วัสดุที่ใช้ในการมัดมีอยู่หลายชนิด เช่น วงแหวนยาง ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม หรือลวดที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุที่ช่วยลดค่าแรงเสียดทานได้ เช่น เทฟรอน (DeFranco และคณะ, 1994) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือวงแหวนยางและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

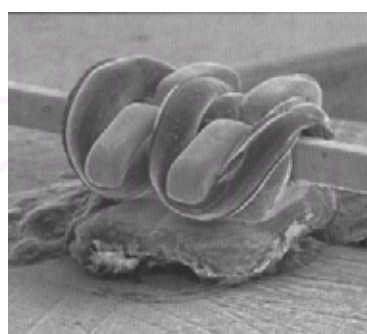
จากการศึกษาส่วนมาก (Rock และ Wilson, 1989; Berger, 1990; Bednar และคณะ, 1991; Voudouris, 1997) พบว่าการใช้วงแหวนยางในการมัดจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม แต่การศึกษาของ Edwards และคณะ (1995) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของค่าแรงเสียดทานระหว่างยางที่มัดเป็นรูปตัวโอ (O) แบบปกติกับการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิม แต่วงแหวนยางได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายในช่องปาก การคลายตัวของแรงเค้น (stress relaxation) เมื่อเวลาผ่านไป และคุณสมบัติที่แตกต่างกันของยางในแต่ละบริษัทผู้ผลิต ในขณะที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากหรือน้อยได้ตามการมัดว่ามัดแน่นหรือหลวมซึ่งขึ้นกับวิธีการมัดและความต้องการของผู้มัด

วิธีการมัด

เนื่องจากการมัดลวดมีผลต่อค่าแรงปกติที่กดลงบนลวดและร่องแบร็กเกตดังรูปที่ 6 ดังนั้นวิธีการมัดที่ทำให้เกิดค่าแรงปกติมากที่สุดก็ทำให้ค่าแรงเสียดทานมากที่สุด จากการศึกษาของ Edward และคณะ (1995) พบว่าการมัดด้วยยางที่พันเป็นรูปเลข 8 จะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด



ก



ข

รูปที่ 6 แสดงการมัดวงแหวนยาง (ก) มัดรูปตัวโอ (ข) มัดรูปเลขแปด

มีผู้ที่คิดค้นแบร็กเกตที่มีลายฉลุ (boss) เพื่อช่วยลดแรงกดของวงแหวนยางหรือลวดที่ใช้มัด ซึ่งช่วยลดค่าแรงปกติในทิศทางใกล้ริมฝีปากใกล้ลิ้นได้ จากการศึกษาของ Thorstenson และ Kusy (2003) พบว่าแบร็กเกตชนิดนี้ช่วยลดแรงเสียดทานเมื่อไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตได้ แต่เมื่อมีมุมกระทำเกิดขึ้นแบร็กเกตที่ออกแบบมาชนิดนี้จะไม่ช่วยลดแรงเสียดทานหรือการใช้แบร็กเกตที่มัดได้ด้วยตัวเอง (self-ligating bracket) ซึ่งเป็นการลดแรงกดบนลวดโค้งที่เกิดจากการมัด ทำให้ค่าแรงเสียดทานลดลง (Thorstenson และ Kusy, 2001)

แบร็กเกต

ชนิดของแบร็กเกต

ในปัจจุบันมีการผลิตแบร็กเกตจากวัสดุหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความต้องการของผู้ใช้ เช่น ในผู้ป่วยที่แพ้เหล็กอาจใช้แบร็กเกตไททานเนียม ผู้ที่ต้องการความสวยงามอาจใช้แบร็กเกตเซรามิกหรือพลาสติก แต่แบร็กเกตที่เป็นที่นิยมใช้ยังคงเป็นแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทำให้เกิดแรงเสียดทานต่ำ มีความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกกร่อนสูง เป็นต้น

มีการศึกษามากมายที่ศึกษาเปรียบเทียบการเกิดแรงเสียดทานระหว่างแบร็กเกตแต่ละชนิดซึ่งให้ข้อสรุปที่แตกต่างกันออกไป เช่น จากการศึกษาของ Michelberger และคณะ (2000) พบว่าแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบร็กเกตไททานเนียม แต่จากการศึกษาของ Kusy และ O'Grandy (2000) พบว่าเมื่อไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกต แรงเสียดทานที่เกิดจากแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและแบร็กเกตไททานเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน

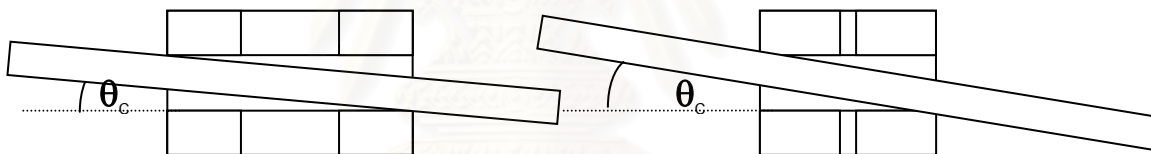
ส่วนการศึกษาของ Bazakidou และคณะ (1997) พบว่าแบร็กเกตที่มีขนาดร่อง 0.018 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ แบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม แบร็กเกตเซรามิก ชนิดพอลิคริสตัลไลน์ (polycrystalline) แบร็กเกตพลาสติกที่เสริมร่องด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม และแบร็กเกตพลาสติก ส่วนแบร็กเกตที่มีขนาดร่อง 0.022 นิ้วเรียงลำดับขนาดแรงเสียดทานจากมากไปน้อยได้ดังนี้ แบร็กเกตเซรามิกชนิดพอลิคริสตัลไลน์ แบร็กเกตเซรามิกชนิดมอนอคริสตัลไลน์ (monocrystalline) แบร็กเกตพลาสติก แบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม และแบร็กเกตพลาสติกที่เสริมร่องด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม แต่จากการศึกษาของ Downing และคณะ (1994) กลับพบว่าแบร็กเกตเซรามิกชนิดพอลิคริสตัลไลน์ทำให้เกิดแรงเสียดทานเท่ากับแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม และจากการศึกษาของ Tselepis และคณะ (1994) ก็พบว่าแบร็กเกตพอลิคาร์บอนเนตทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม จากการศึกษาของ Riley และคณะ (1979) พบว่าการใช้

ลดในการมัดแบรกกेटพลาสติกแน่นเกินไป อาจทำให้แบรกกेटมีการเสียรูปโดยบีบเข้าไปในร่องแบรกกेटเล็กน้อยซึ่งทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

แต่จากการศึกษาส่วนมากแล้วพบว่าแบรกกेटเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบรกกेटเซรามิกและแบรกกेटพลาสติก (Pratten และคณะ, 1990; Riley และคณะ, 1979; Kusy และ Whitley, 1990; Kusy และคณะ, 1991; Tanne และคณะ, 1991; Omana และคณะ, 1992; Tselepis และคณะ, 1994)

ความกว้างของร่องแบรกกेट

มีบางการศึกษาที่พบว่าความกว้างของร่องแบรกกेटไม่มีผลต่อค่าแรงเสียดทาน (Peterson และคณะ, 1982; Andreasen และ Quevedo, 1970) ในขณะที่การศึกษาส่วนมากพบว่าแรงเสียดทานจะมากขึ้นเมื่อแบรกกेटกว้างขึ้นและน้อยลงเมื่อแบรกกेटแคบลง (Frank และ Nikolai, 1980; Tidy, 1989; Drescher และคณะ, 1989; Kapila และคณะ, 1990; Bednar และคณะ, 1991; Omana และคณะ, 1992)



รูปที่ 7 แสดงภาพมุมวิกฤต (critical angle, θ_c)

การที่แบรกกेटกว้างทำให้เกิดแรงเสียดทานมากอาจเนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน คือ เมื่อแบรกกेटกว้างขึ้นทำให้มุมวิกฤต (critical angle) แคบลง ซึ่งมุมวิกฤตคือมุมแรกที่ลวดเอียงไปแล้วเริ่มเกิดการชนกันกับร่องแบรกกेटได้ (รูปที่ 7) ดังนั้นเมื่อแบรกกेटที่กว้างเอียงทำมุมเท่ากับแบรกกेटที่แคบกว่าก็จะเกิดการชนกันของลวดก่อน ซึ่งทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น (Kang และคณะ, 2003) แต่ในลักษณะนี้ ฟันที่ใช้แบรกกेटที่แคบกว่าจะมีการลัดเอียงไปมากกว่าทำให้ฟันไม่เคลื่อนแบบบอดีลี และอาจเกิดการบิดหมุนของฟันได้มากกว่า ซึ่งอาจจะแก้ไขได้โดยการออกแบบแบรกกेटที่มีการชดเชยมุมที่แบรกกेटอาจบิดไปให้มากกว่ามุมปกติที่ควรเป็น (Matasa, 1996) อีกเหตุผลหนึ่งที่น่าจะทำให้แบรกกेटที่กว้างเกิดแรงเสียดทานมากกว่าแบรกกेटที่แคบคือ เมื่อมีการมัดด้วยวงแหวนยางซึ่งมีขนาดเท่ากัน วงแหวนยางต้องถูกยืดออกมากกว่าในแบรกกेटที่กว้างเพื่อให้สามารถมัดได้รอบ ดังนั้นแรงปกติที่วงแหวนยางกดลงบนลวดและร่องแบรกกेटต้องมากขึ้นด้วย ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความกว้างของแบรกกेटยังมีผลต่อ

ระยะห่างระหว่างแบรกกเกตซึ่งมีผลทางอ้อมต่อค่าแรงเสียดทาน เนื่องจากแบรกกเกตที่กว้างจะทำให้มีระยะห่างระหว่างแบรกกเกตลดลง มีผลให้ลวดโค้งบริเวณนั้นมีค่าความแข็งดึงเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลต่อค่าแรงเสียดทาน

กระบวนการผลิตแบรกกเกต

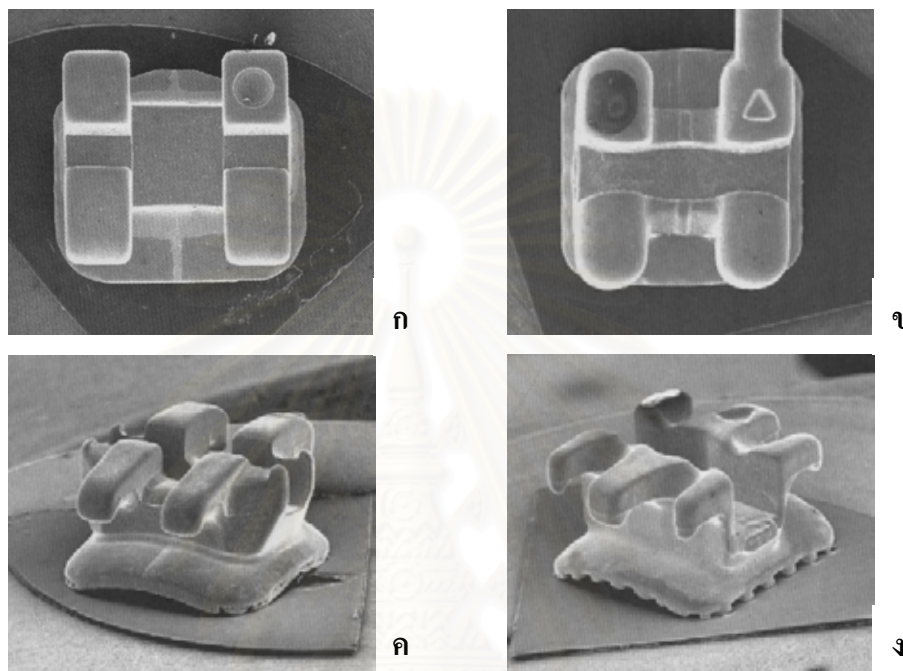
แบรกกเกตที่มีกระบวนการผลิตต่างกัน ย่อมทำให้คุณสมบัติกายภาพต่างกัน ทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นต่างกัน เช่น แบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอริง (sintering) และชนิดหล่อแบบ (casting) หรือแบรกกเกตเซรามิกชนิดมอนอคริสตัลไลน์และชนิดพอลิคริสตัลไลน์

แบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอริงผลิตโดยการบีบอัดอนุภาคเล็กๆของโลหะด้วยแบบพิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดันที่สูงและหลอมเชื่อมอนุภาคเหล่านี้เข้าด้วยกัน ทำให้แบรกกเกตที่ได้มีรูปร่างตามแบบพิมพ์ มีผิวเรียบและมีมุมโค้งมน ส่วนแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดหล่อแบบจะเป็นกรรมวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมโดยการตัดและกลึงก้อนโลหะให้ได้รูปร่างแบรกกเกตตามที่ต้องการ ทำให้แบรกกเกตที่ได้มีขนาดใหญ่ ผิวหยาบและขอบมุมต่างๆแหลมคม จากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบขนาดของแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอริงและชนิดหล่อแบบของ Vaughan และคณะ (1995) พบว่าแบรกกเกตชนิดซินเทอริงทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าชนิดหล่อแบบร้อยละ 40-45

แบรกกเกตเซรามิกชนิดมอนอคริสตัลไลน์เป็นแบรกกเกตที่มีผลึกขนาดใหญ่ขนาดเดียวซึ่งผลิตโดยการหลอมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) ที่มีความบริสุทธิ์มากเข้าด้วยกันด้วยอุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ จะได้เซรามิกในรูปแท่งหรือก้อน จากนั้นนำมากลึงให้เป็นรูปร่างแบรกกเกตด้วยเครื่องตัดกากเพชร (diamond cutting) เลเซอร์ (Nd:YAG lasers) หรือเครื่องตัดอัลตราโซนิก (ultrasonic cutting) แล้วจึงเผาอีกครั้งเพื่อกำจัดเศษต่างๆบนผิวและลดความเครียดจากการตัด ส่วนแบรกกเกตเซรามิกชนิดพอลิคริสตัลไลน์ซึ่งมีผลึกขนาดเล็กหลายขนาดผลิตโดยการรวมผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยแบบพิมพ์ที่เป็นรูปแบรกกเกตที่ต้องการ จากนั้นจึงนำไปเผาด้วยความร้อนสูงเพื่อเชื่อมผงเข้าด้วยกัน แล้วจึงนำมาตัดให้ได้รูปร่างแบรกกเกตในขนาดที่ต้องการด้วยเครื่องตัดกากเพชร จากนั้นจึงเผาอีกครั้งเช่นเดียวกับชนิดมอนอคริสตัลไลน์ (Brantley และ Eliades, 2001) จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าแบรกกเกตชนิดมอนอคริสตัลไลน์มีพื้นผิวที่เรียบกว่าชนิดพอลิคริสตัลไลน์ Articulo และ Kusy (1999) พบว่าแบรกกเกตชนิดพอลิคริสตัลไลน์ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าชนิดมอนอคริสตัลไลน์เมื่อไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกต แต่เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตพบว่าแบรกกเกตชนิดมอนอคริสตัลไลน์กลับมีแรงเสียดทานมากกว่าชนิดพอลิคริสตัลไลน์

การออกแบบแบร็กเกต

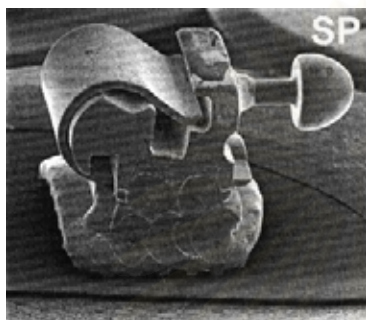
ปัจจุบันมีแบร็กเกตที่มีรูปร่างแตกต่างกันมากมาย แต่ละแบบที่ต่างก็เพื่อให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นต่างกัน เช่น ทำให้แรงเสียดทานลดลง ทำให้ไม่ต้องตัดลวดในการจัดฟันมาก ทำให้สะดวกในการมัดลวด เป็นต้น



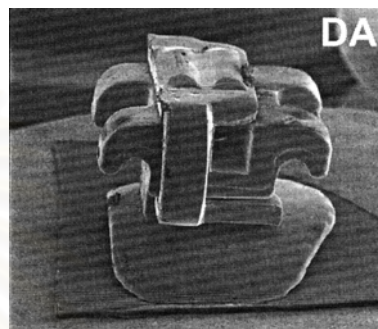
รูปที่ 8 แสดงแบร็กเกตชนิดมาตรฐานและแบร็กเกตชนิดต่างๆที่ออกแบบเพื่อลดแรงเสียดทาน (ก) แบร็กเกตชนิดมาตรฐาน (ข) VersaT (ค) Shoulder และ (ง) Synergy

แบร็กเกตที่ออกแบบมาเพื่อลดแรงเสียดทาน ได้แก่ เวอร์ซาที (VersaT) และซินเนอร์จี (Synergy) ของบริษัทร็อคกี้เมาเทน (Rocky Mountain Orthodontics) และโชเดอร์ (Shoulder) ของบริษัทจีเอซี (GAC) ซึ่งแต่ละแบบก็มีหลักการที่ต่างกัน เช่น แบร็กเกตแบบเวอร์ซาทีจะมีการออกแบบให้ผนังร่องแบร็กเกตเป็นมุมที่โค้งมนและมีพื้นของร่องแบร็กเกตขนานเพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับลวด แบร็กเกตแบบโชเดอร์จะมีปุ่มค้ำเล็กๆที่ด้านบนของปีก (wings) ของแบร็กเกตเพื่อยก ลวดหรือยางที่มัดให้ห่างออกจากลวด เป็นการลดแรงปกติที่กดลงบนลวด และแบร็กเกตแบบซินเนอร์จีจะมีปีกสามคู่ เมื่อต้องการลดแรงเสียดทานจะมัดลวดหรือยางที่ปีกอันกลางดังนั้นจึงคล้าย แบร็กเกตชนิดโชเดอร์ที่มีปุ่มค้ำเพื่อยก ลวดหรือยางที่มัดเอาไว้ นอกจากนี้แบร็กเกตแบบซินเนอร์จียังเหมือนแบบเวอร์ซาทีตรงที่มีผนังร่องแบร็กเกตที่โค้งมนและมีพื้นร่องแบร็กเกตขนานด้วย

จากการศึกษาของ Thorstenson และ Kusy (2003) พบว่าในขณะที่ไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกด แปรงเกดชนิดโซเดอร์และซินเนอร์จีจะมีแรงเสียดทานน้อยกว่า แปรงเกดปกติเนื่องจากมีปุ่มค้ำที่ช่วยลดแรงกดจากยางหรือลวดมัด ซึ่งการใช้แปรงเกดปกติแต่มีมัดแบบหลวมก็ช่วยลดแรงกดนี้เช่นเดียวกัน แต่เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกดกลับพบว่าแปรงเกดที่ออกแบบมาเพื่อลดแรงเสียดทานทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าแปรงเกดปกติ



ก



ข

รูปที่ 9 รูปแสดงแปรงเกดแบบมัดด้วยตัวเอง (self ligating brackets) (ก) ชนิดคลิปหนีบ และ (ข) ชนิดแผ่นเลื่อน

แปรงเกดแบบมัดด้วยตัวเองมี 2 ชนิดตามวิธีการปิดฝา คือ แบบคลิปหนีบ (active clip) และแบบแผ่นเลื่อน (passive slide) จากการศึกษาค้นคว้าของ Thorstenson และ Kusy (2001) พบว่า แปรงเกดแบบมัดด้วยตัวเองแบบแผ่นเลื่อนทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแปรงเกดปกติทั้งในขณะที่มีและไม่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกด เนื่องจากเป็นการลดแรงปกติที่เกิดจากการมัดลวด หลังจากนั้นในปี 2002 Thorstenson และ Kusy ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแรงเสียดทานระหว่างแบบคลิปหนีบและแบบแผ่นเลื่อน พบว่าแปรงเกดแบบแผ่นเลื่อนทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบบคลิปหนีบ แต่เนื่องจากไม่มีแรงกดให้ลวดแนบอยู่ในร่องแปรงเกดจึงทำให้สูญเสียการควบคุมฟันไป

แปรงเกดที่มีการปรับมุมต่างๆมาไว้ (preadjusted brackets) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการออกแบบเพื่อลดความจำเป็นในการตัดลวด บางครั้งการมีมุมต่างๆมาไว้ก็ยังมีผลต่อค่าแรงเสียดทาน เพราะอาจทำให้เกิดการชนกันของลวดและร่องแปรงเกดในหลายทิศทางทำให้ความเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังอาจมีผลข้างเคียงอื่นที่ไม่ต้องการ เช่น แปรงเกดสำหรับฟันซี่งอมีมุมให้รากฟันเอียงไปทางไกลกลางอาจทำให้ฟันหน้ายื่นยาวออกมามากขึ้นถ้าลวดโค้งที่ใช้มีความแข็งตั้งไม่

เพียงพอดังรูปที่ 4 นอกจากนี้เมื่อมีการจัดระดับร่องแบริกเกตให้ตรงกันในฟันมีการซ้อนเก แบริกเกตที่มีการปรับมุมต่างๆมาจะทำให้เกิดการยื่นไปด้านหน้า (flaring) ของฟันตัดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ในการจัดฟัน

แบริกเกตแบบเดี่ยว (single brackets) หรือแบบแฝด (twin brackets) ก็มีผลต่อความกว้างของแบริกเกต ซึ่งมีผลต่อความเสียดทานดังที่กล่าวมาแล้ว

ลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน

ระยะห่างระหว่างแบริกเกต

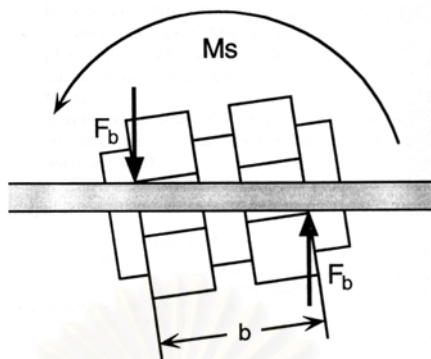
ระยะห่างระหว่างแบริกเกตมีผลต่อความแข็งตึงของลวด กล่าวคือเมื่อมีระยะห่างระหว่างแบริกเกตมาก ลวดบริเวณนั้นจะมีค่าความแข็งตึงน้อย แต่เมื่อมีระยะห่างน้อย ค่าความแข็งตึงจะเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งตึงของลวดมีผลต่อความเสียดทานดังที่อธิบายมาแล้ว แต่จากการศึกษาของ Frank และ Nikolai (1980) กลับพบว่าระยะห่างระหว่างแบริกเกตไม่มีผลต่อค่าแรงเสียดทาน

ระดับของร่องแบริกเกต

เมื่อร่องแบริกเกตมีระดับต่างกันมากทำให้ความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการทำให้มีการชนกันของลวดและร่องแบริกเกตเหมือนกับการมีมุมกระทำระหว่างร่องแบริกเกตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดของแรงปกติที่กดลงบนลวด ดังนั้นแรงเสียดทานที่เกิดจึงเพิ่มขึ้นด้วย และจากการศึกษาของ Meling และ Odegaard (1998) พบว่าการทำให้เกิดมุมการเอียง (second order deflection) ระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเกิดขึ้น เช่น การดัดลวด หรือการมีระดับร่องแบริกเกตที่แตกต่างกัน มีผลต่อมุมการบิด (torque angle) ของลวดและร่องแบริกเกต ซึ่งค่ามุมการบิดนี้มีผลต่อขนาดแรงเสียดทานด้วย

มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกต

จากการศึกษาส่วนมากพบว่าเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างลวดและแบริกเกตเพิ่มขึ้นในลวดทุกชนิด (Andreasen and Quevedo, 1970; Frank and Nikolai, 1980; Peterson et al, 1982; Tidy, 1989; Bednar et al, 1991; Tselepis et al, 1994; Dickson และคณะ, 1994; Articolo และ Kusy, 1999; Thorstenson และ Kusy, 2002)



รูปที่ 10 แสดงการเกิดมูมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตจะเกิดแรงปฏิกิริยาที่มูมทั้งสองด้านของร่องแบรคเกต (F_b) ซึ่งถ้าแบรคเกตมีการบิดหมุนไปมากก็จะทำให้แรงกดนี้มีปริมาณมากด้วย

จากการศึกษาของ Frank และ Nikolai พบว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมูมกระทำเพิ่มขึ้นแต่เป็นในลักษณะไม่เป็นเส้นตรง แต่จากการศึกษาของ Ogata (1994) พบว่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ทั้งนี้การทดลองของทั้งคู่มีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ โดยปกติการทดลองเพื่อที่จะค่าแรงเสียดทานที่เกิดจะทำการวัดค่าที่ได้จากแบรคเกตหนึ่งตัวและลวดหนึ่งเส้นกระทำต่อกัน แต่ในความเป็นจริงในช่องปากจะมีแบรคเกตหลายตัวที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับซึ่งกันและกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ (Nanda และคณะ, 1997) ซึ่งการทดลองของ Frank และ Nikolai จะทำการทดลองในแบรคเกตเดียว แต่การทดลองของ Ogata (1994) เป็นการทดลองในแบรคเกตที่อยู่เป็นชุด

แต่ลวดแต่ละชนิดเมื่อมูมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรคเกตเพิ่มขึ้นก็จะมีอัตราการเพิ่มของแรงเสียดทานไม่เท่ากันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความแข็งตึงของลวด ความกว้างของแบรคเกตและร่องแบรคเกต ช่องว่างระหว่างร่องแบรคเกตและลวด ค่ามุมวิกฤตของแบรคเกตและลวด เป็นต้น

จากการศึกษาของ Articolo และ Kusy (1999) พบว่าเมื่อมีมูมกระทำระหว่างร่องแบรคเกตและลวดน้อย ลวดและแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด รองลงมาคือ นิกเกิลไททาเนียม และเบต้าไททาเนียมตามลำดับ แต่เมื่อมูมกระทำเพิ่มมากขึ้นกลับพบว่าลวดนิกเกิลไททาเนียมทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด รองลงมาคือเบต้าไททาเนียม และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Peterson และคณะ

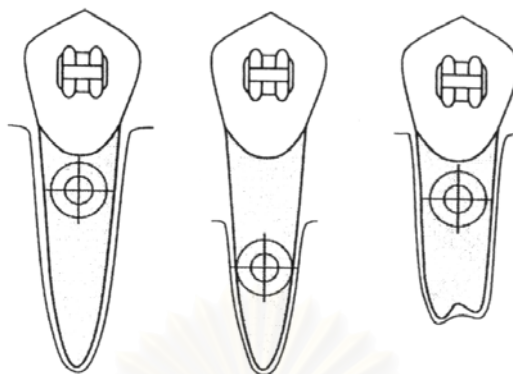
(1982) ที่พบว่าเมื่อมีมุมกระทำเกิดขึ้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่า ลวดนิกเกิลไททาเนียม

จากการศึกษาของ Kang และคณะ (2003) พบว่าค่ามุมวิกฤตซึ่งมีผลต่อขนาดแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับความกว้างของแบริกเกต มุมในการบิด (torque angle) และขนาดของลวด โดยที่ค่ามุมวิกฤตจะลดลงเมื่อความกว้างของแบริกเกต มุมในการบิด และขนาดของลวดเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของมุมวิกฤตไม่ขึ้นกับความสูงของร่องแบริกเกต ซึ่งขนาดของมุมวิกฤตนี้มีผลต่อขนาดแรงเสียดทาน กล่าวคือแบริกเกตที่มีมุมวิกฤตมากย่อมมีผลให้แรงเสียดทานเกิดขึ้นน้อยกว่าแบริกเกตที่มีมุมวิกฤตน้อยกว่า (Thorstenson และ Kusy, 2002) ซึ่ง Kusy และ Whitley (1999) สรุปว่าอาจจะไม่จำเป็นต้องปรับระดับร่องแบริกเกตให้ได้ระดับเดียวกันจนกระทั่งมุมทุกมุมเป็น 0 องศา เนื่องจากการมีค่ามุมวิกฤต ทำให้แบริกเกตสามารถเอียงไปได้บ้างเล็กน้อยแต่ไม่มีผลให้เกิดการชนกันของลวดและร่องแบริกเกตและไม่ทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการทดลองในลักษณะใด หรือจะมีความแตกต่างกันอย่างไร ผลที่ได้เหมือนกันก็คือเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานที่วัดได้เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในการจัดฟันเพื่อที่จะให้ได้หลักยึดสูงสุด (maximum anchorage) มีความจำเป็นที่จะต้องจัดระดับให้ร่องแบริกเกตอยู่ในระดับเดียวกันและมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตที่ลวดจะเคลื่อนผ่านเป็นศูนย์เพื่อที่ให้มีความต้านน้อยที่สุดเมื่อทำการเคลื่อนฟันเลื่อนไกลไปตามลวดโค้ง

แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน

การพิจารณาเกี่ยวกับตำแหน่งที่ให้แรงในการเคลื่อนฟันโดยเทียบกับตำแหน่งศูนย์กลางความต้านทาน (center of resistance) ของฟันมีผลต่อลักษณะการเคลื่อนของฟัน ซึ่งตำแหน่งศูนย์กลางความต้านทานนี้จะขึ้นกับความยาว รูปร่าง และจำนวนของรากฟัน และระดับของกระดูกครอบรากฟัน (ดังรูป 11) ซึ่งการที่จะระบุตำแหน่งที่แน่นอนของศูนย์กลางความต้านทานของฟันนั้นทำได้ยาก แต่จากการศึกษาต่างๆ (Tanne และคณะ, 1988; Tanne และคณะ, 1991; Tanne และคณะ, 1987; Vanden Bulcke และคณะ, 1987; Vanden Bulcke และคณะ, 1986) ประมาณได้ว่าตำแหน่งศูนย์กลางความต้านทานของฟันรากเดี่ยวที่มีกระดูกครอบรากฟันเป็นปกติอยู่ที่ระยะประมาณ 1 ใน 3 หรือ 1 ใน 4 ของรากฟันนับจากรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟัน (cementoenamel junction)



รูปที่ 11 แสดงตำแหน่งของศูนย์กลางความต้านทานของฟัน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของรากฟันหรือกระดูกที่อยู่รอบรากฟันเปลี่ยนไป

หากตำแหน่งที่ให้แรงในการเคลื่อนฟันอยู่ไกลจากศูนย์กลางความต้านทานของฟันจะทำให้ฟันมีการเคลื่อนที่แบบล้มเอียง (tipping) แต่ถ้าให้แรงใกล้ศูนย์กลางความต้านทานของฟันจะทำให้ฟันเคลื่อนที่แบบบอดิลี (bodily) ซึ่งการที่ฟันเคลื่อนที่แบบบอดิลีจะทำให้ไม่เกิดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต แต่ถ้าฟันเคลื่อนที่แบบล้มเอียงจะทำให้เกิดการชนกันของลวดและแบร็กเกตส่งผลให้เกิดความเสียหายระหว่างลวดและแบร็กเกตเพิ่มมากขึ้น (Fortin, 1971; Riley และคณะ, 1979) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดแรงเสียหายจึงควรที่จะให้แรงในตำแหน่งที่อยู่ใกล้ศูนย์กลางความต้านทานของฟันขึ้นนั้นมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับวิธีในการให้แรง โดยปกติในกลวิธีการเลื่อนไกลสามารถเคลื่อนฟันได้หลายวิธี เช่น การใช้ยางวง ไช่ยาง ขดสปริง เป็นต้น ซึ่งแต่ละอย่างมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป เช่น การใช้ยางวงหรือไช่ยางจะไม่มีผลทำให้แรงเสียหายเพิ่มกว่าปกติสามารถทำความสะอาดได้ง่าย แต่แรงที่ได้จากไช่ยางจะลดลงประมาณร้อยละ 50 ใน 24 ชั่วโมงแรก (Bishara and Andreasen, 1970; Hershey and Reynolds, 1975) และจะมีการติดสีจากอาหารได้ ส่วนยางวงแรงที่ได้จะตกเช่นกันแต่น้อยกว่าไช่ยาง แต่มีข้อเสียคือต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ป่วยที่จะต้องใส่ยาง

การใช้ขดสปริงให้ผลดีในด้านที่ทำให้เกิดแรงกระทำกับฟันได้นานและต่อเนื่อง โดยเฉพาะขดสปริงนิกเกิลไททาเนียม แต่ทั้งนี้ขนาดของแรงที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสปริง ขนาดลวดที่ทำเป็นสปริง ขนาดช่องของวงสปริง มุมการเอียงของวงสปริงแต่ละวง ความยาวของสปริง และความยาวของสปริงที่ให้แรง (activation) ซึ่งสปริงที่ให้แรงมากจะมีขนาดลวดใหญ่และมีช่องวง

สปริงเล็ก แต่การที่มีช่องวงสปริงเล็กจะส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ดังนั้นสปริงที่เหมาะสมในทางทันตกรรมจัดฟันจึงควรมีขนาดลวดเล็กและมีช่องวงสปริงกว้างเพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อฟันน้อยและทำให้แรงเสียดทานระหว่างสปริงและลวดโค้งน้อยด้วย (Web และคณะ, 1978; Chaconas และคณะ, 1984)

ขนาดของแรงที่ทำให้มีความสำคัญต่อลักษณะการเคลื่อนของฟัน คือเมื่อให้แรงมาก ฟันจะมีการล้มเอียงมาก ซึ่งส่งผลให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นควรที่จะให้แรงเบาๆแต่สม่ำเสมอ เพื่อให้ฟันเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องและมีการล้มเอียงไม่มาก

ปัจจัยภายในช่องปาก

น้ำลาย

การศึกษาเกี่ยวกับผลของน้ำลายที่มีต่อค่าแรงเสียดทานแตกต่างกันในแต่ละการศึกษา บางการศึกษาพบว่าน้ำลายมีผลช่วยลดแรงเสียดทานในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (Baker และคณะ, 1987; Tselepis และคณะ, 1994) แต่มีหลายการศึกษาที่พบว่าน้ำลายทำให้ค่าแรงเสียดทานในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น (Kusy และคณะ, 1991; Pratten และคณะ, 1990; Stannard และคณะ, 1986) แต่ในลวดไททานเนียมกลับพบว่าน้ำลายช่วยลดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ถึงร้อยละ 50 (Kusy และคณะ, 1991; Saunders และ Kusy, 1994)

น้ำลายมีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ดังนั้นในผู้ป่วยที่มีปัจจัยที่ทำให้มีการหลั่งน้ำลายผิดปกติ เช่น ผู้ป่วยที่อายุมาก มีประวัติว่ามีน้ำลายน้อย (Xerostomia) ได้รับการฉายรังสี ผู้ป่วยที่ใช้ยากดประสาท เป็นต้น หากมีการเคลื่อนฟันในผู้ป่วยเหล่านี้ต้องพิจารณาให้แรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันด้วย

คราบต่างๆในช่องปาก

การที่ลวดอยู่ในช่องปากอาจทำให้มีคราบจุลินทรีย์ หินน้ำลาย หรือแผ่นฟิล์มน้ำลายมาเกาะ ซึ่งคราบต่างๆเหล่านี้มีผลให้ผิวลวดเกิดความหยาบเพิ่มมากขึ้นและอาจทำให้แรงเสียดทานระหว่างลวดและร่องแบรคเกตเพิ่มขึ้นได้

การสึกกร่อน

ลวดที่อยู่ในช่องปากอาจได้รับผลกระทบจากสิ่งต่างๆมากมาย เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การสัมผัสกับกรด เป็นต้น ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้อาจมีผลทำให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวของ

ลวด ทำให้พื้นผิวมีความหยาบเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างลวดและแบร็กเกตเพิ่มขึ้นด้วย ดังการทดลองของ Lee และ Chang (2001) ที่ได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติทางกายภาพและแรงเสียดทานของลวดนิกเกิลไททาเนียมที่ผ่านการแช่ในน้ำลายเทียมและลวดที่ผ่านการแช่ในน้ำลายเทียมและการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องอบไอน้ำความดันสูง (autoclaves) พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ของลวดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบว่าลวดมีพื้นผิวที่หยาบมากขึ้นและมีแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

การทำงานของอวัยวะต่างๆในช่องปาก

อวัยวะต่างๆในช่องปาก เช่น การทำงานของลิ้น กล้ามเนื้อรอบช่องปาก แรงจากการบดเคี้ยว ซึ่งจากการศึกษาของ Braun และคณะ (1999) พบว่าในขณะที่มีการเคลื่อนไหวแบร็กเกตไกลไปบนลวด หากมีแรงภายนอกมากระทำจะมีผลให้ค่าแรงเสียดทานที่วัดได้ลดลงเหลือ 0 ซึ่งในช่องปาก แรงที่จะมากระทำนี้อาจจะเกิดจากลิ้น กระพุ้งแก้ม การเคลื่อนไหวของฟันขณะบดเคี้ยว หรือแม้แต่แรงจากอาหารที่กระทบถูกแบร็กเกตและลวด ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะจำลองลักษณะภายในช่องปากเพื่อที่จะทดลองให้ได้เหมือนในสภาวะจริงนั้น

ความรู้เกี่ยวกับแรงเสียดทานกับการนำไปใช้ในทางคลินิก

ความเข้าใจเกี่ยวกับขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีความสำคัญสำหรับทันตแพทย์จัดฟันที่ใช้กลวิธีการเลื่อนไกลในขั้นตอนการรักษา แม้ว่าลวดและแบร็กเกตจะมีความสัมพันธ์ที่ดีมาก ก็ยังคงมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นอยู่ ดังนั้นการให้แรงเพื่อเริ่มเคลื่อนฟันควรที่จะเพิ่มแรงสำหรับเอาชนะค่าแรงเสียดทานนี้อย่างน้อย 40 กรัม แต่ถ้ามีระดับของแบร็กเกตและลวดที่ไม่ดีแรงเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้นมากทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้น้อยหรือไม่เคลื่อนที่เลย นอกจากนี้การที่มีการชนกันของลวดบริเวณฟันหน้าหรือฟันเขี้ยว อาจส่งผลให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า หมุดปักเต็นท์ (tent-pegging effect) (Nanda และคณะ, 1997) คือฟันหน้าจะมีการล้มเอียงจนเกิดการชนกันของลวดและร่องแบร็กเกต แรงเสียดทานระหว่างลวดและแบร็กเกตบริเวณนี้จึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งทำให้แรงที่ให้เพื่อเคลื่อนฟันหน้าหรือฟันเขี้ยวกลับกลายเป็นแรงที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนฟันหลังซึ่งควรที่จะเป็นหลักยึด จึงมีผลให้เกิดการสูญเสียหลักยึด

การที่จะลดแรงเสียดทานอาจจะทำได้โดยการเลือกใช้แบร็กเกตชนิดใหม่ที่มีออกแบบเพื่อลดแรงกดในการมัด หรือเลือกใช้แบร็กเกตชนิดซินเทอริงซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าชนิด

หล่อแบบถึงร้อยละ 40 ส่วนเซรามิกหรือพลาสติกแบรกเกตก็ต้องรู้ว่าแบรกเกตเหล่านี้ทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการเคลื่อนฟันเขียวที่ใช้เซรามิกแบรกเกตจึงต้องมีการเตรียมหลักยึดให้ดีเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียหลักยึด

การเลือกขนาดและรูปร่างของลวดก็ควรเลือกให้เหมาะกับระยะของการรักษา ถ้าหากเป็นระยะที่ต้องมีการจัดระดับฟันก็ควรใช้ลวดที่มีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นสูง เพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อฟันและมีการเสียรูปอย่างถาวรของลวดน้อย ถ้าต้องการเคลื่อนฟันไปตามลวดโค้งก็ควรเลือกลวดที่มีขนาดไม่ใหญ่เกินไปให้มีช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรกเกต ทำให้แรงเสียดทานเกิดขึ้นน้อย แต่ลวดที่ใช้ต้องไม่เล็กและอ่อนจนไม่สามารถรักษาการเรียงตัวของฟันบนขากรรไกรเอาไว้

ชนิดของลวดก็มีความสัมพันธ์ต่อขนาดของแรงเสียดทานที่เกิด ลวดแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่ดีต่างกันเหมาะต่อการรักษาในแต่ละระยะ เช่น ลวดเบต้าไททาเนียม ลวดนิกเกิลไททาเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีคือทำให้เกิดแรงกระทำต่อฟันน้อยและสม่ำเสมอแต่ก็ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและร่องแบรกเกตมาก รวมทั้งมีค่าความแข็งตึงต่ำมากไม่สามารถรักษาการเรียงตัวของฟันบนขากรรไกรไว้ได้ ดังนั้นจึงควรเลือกลวดให้เหมาะสมกับความต้องการที่จะใช้ ถ้าหากต้องการเคลื่อนฟันไปตามลวดโค้งก็ไม่ควรที่จะเลือกใช้ลวดเหล่านี้ แต่ถ้าต้องการลวดที่มีความยืดหยุ่นดีทำให้เกิดแรงกระทำต่อฟันน้อยก็ควรเลือกลวดเหล่านี้ไปใช้

การจัดระดับฟันในขากรรไกรให้ได้ระดับที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญที่จะลดแรงเสียดทานที่จะเกิดในระหว่างการเคลื่อนฟัน การมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกเกตเพียงเล็กน้อยก็อาจส่งผลให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญได้

การเคลื่อนฟันในผู้ป่วยแต่ละรายต้องมีการพิจารณาปัจจัยต่างๆให้ดี ทั้งปัจจัยทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือและแรงที่ใช้ และปัจจัยทางชีวภาพ ได้แก่ ลักษณะฟัน อวัยวะปริทันต์ น้ำลาย เป็นต้น เพื่อให้สามารถเลือกใช้เครื่องมือและวิธีการที่ทำให้เกิดผลการรักษาที่เหมาะสมต่อผู้ป่วยมากที่สุดและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการรักษา

ในการเคลื่อนฟันเพื่อการจัดฟัน นอกจากจะต้องคำนึงถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นแล้ว สิ่งสำคัญที่สุดที่ต้องตระหนักถึงคือ คุณภาพในการเคลื่อนฟัน การเคลื่อนฟันที่มีคุณภาพนั้น ฟันจะต้องถูกเคลื่อนไปในทิศทางและลักษณะที่ต้องการ ไม่มีการบิดหมุนหรือล้มเอียง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ประชากร

แบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาตรฐานขนาด 0.018×0.025 นิ้ว² ที่มีมุมต่างๆเป็นศูนย์ องศา ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ หน้าตัดกลมขนาด 0.016 นิ้ว และ 0.018 นิ้ว และลวดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว²

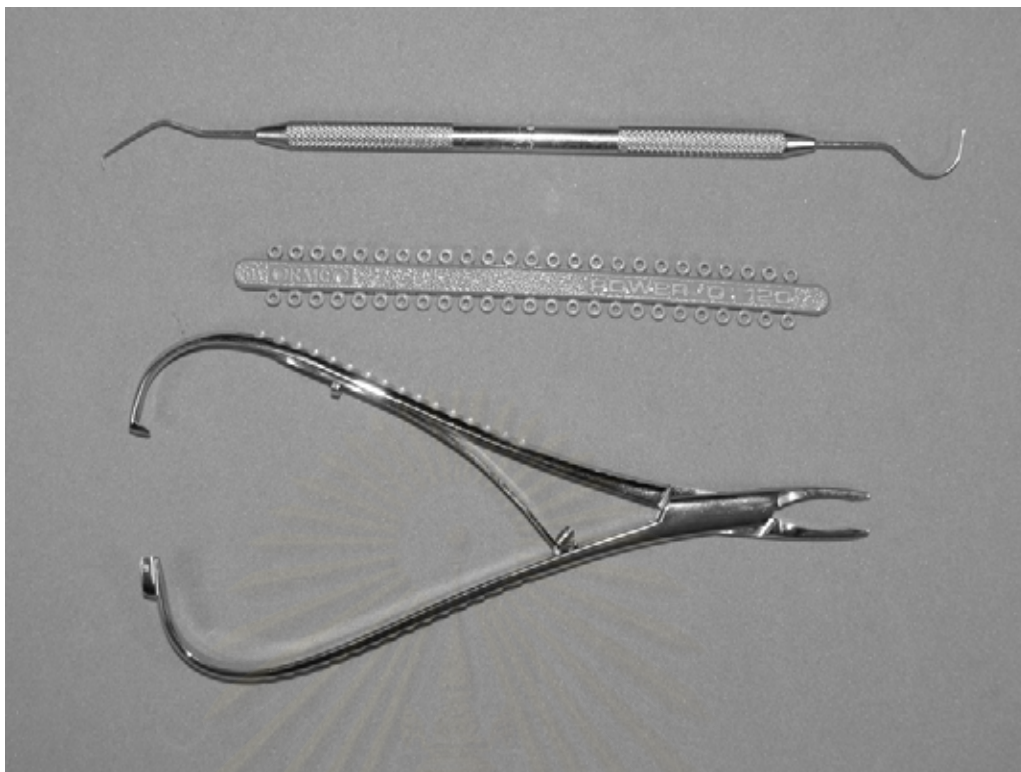
กลุ่มตัวอย่าง

คัดเลือกแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาตรฐานขนาด 0.018×0.025 นิ้ว² ที่มีมุมต่างๆเป็นศูนย์องศาจำนวน 120 ตัว และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหน้าตัดกลมขนาด 0.016 นิ้ว และ 0.018 นิ้ว และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว² อย่างละ 240 เส้น แต่ละเส้นยาว 27.5 มิลลิเมตร

การเลือกกลุ่มตัวอย่างที่เป็นลวดและแบรกกเกต กระทำการคัดเลือกโดยวิธีการสุ่ม

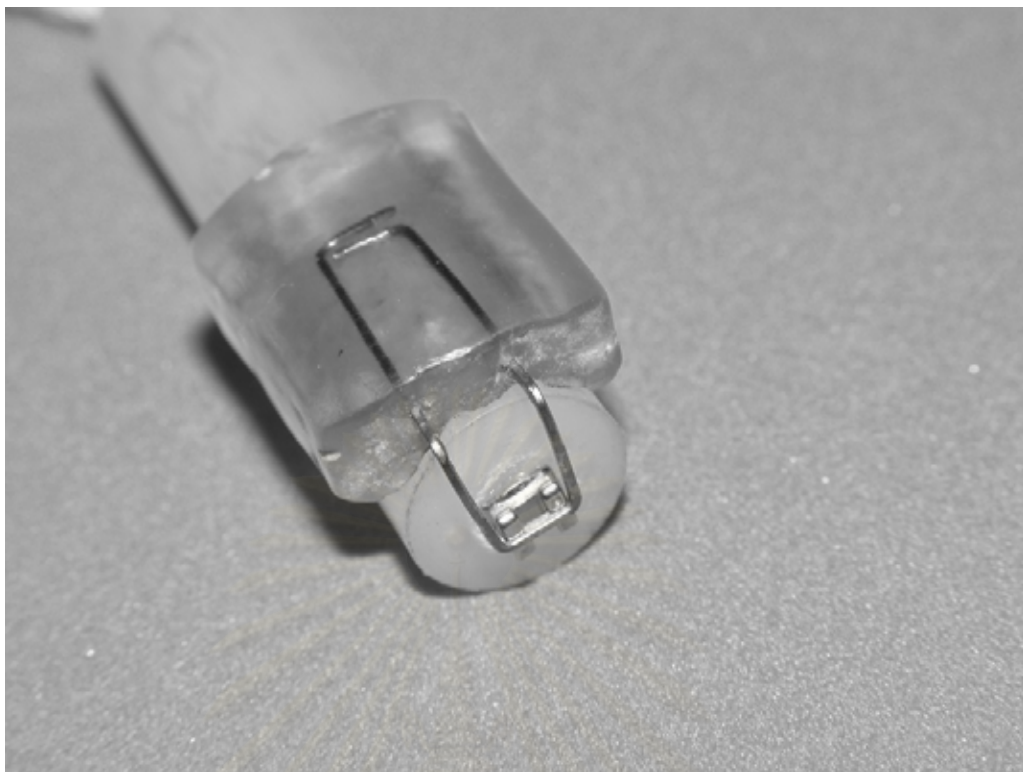
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ ลวดหน้าตัดกลมขนาด 0.016 นิ้ว กับ 0.018 นิ้ว และลวดหน้าตัดเหลี่ยมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² กับ 0.016×0.022 นิ้ว² อย่างละ 240 เส้น แต่ละเส้นยาว 27.5 มิลลิเมตร
2. แบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาตรฐานสำหรับพื้นเขี้ยวบนขนาด 0.018×0.025 นิ้ว² ที่มีมุมต่างๆเป็น 0 องศา จำนวน 120 ตัว
3. ยางโฟลียูเรเทนสีเทา ใช้สำหรับมัดลวดเข้ากับแบรกกเกต จำนวน 960 วง
4. แมทธิวโฮลเดอร์ (Mathieu holder) สำหรับมัดยางเข้ากับแบรกกเกต
5. เอ็กซ์พลอเรอร์ (explorer) สำหรับถอดวงแหวนยางออกจากแบรกกเกต

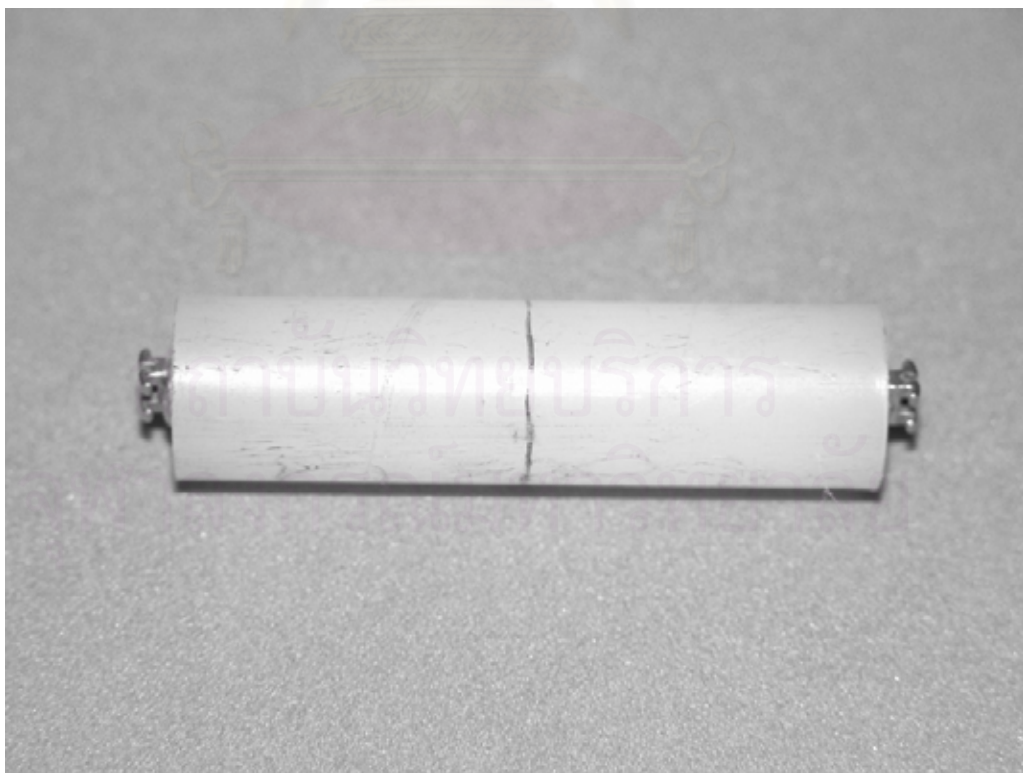


รูปที่ 12 รูปแสดงยางโพลียูเรเทนสีเทา แมทริวไฮลเดออร์ และเอ็กพลอเรอร์

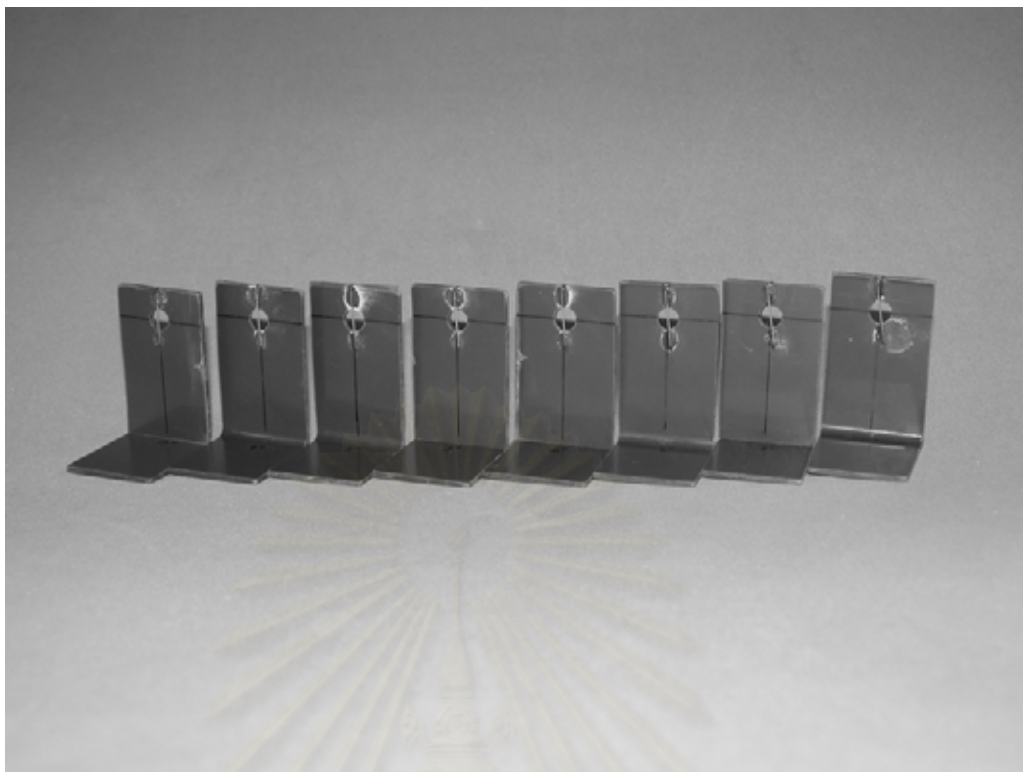
6. เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 สำหรับเช็ดทำความสะอาดและแบรกก่อก่อนทำการทดลอง
7. แท่งพลาสติกแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาวแท่งละ 40 มิลลิเมตร จำนวน 60 แท่ง สำหรับยึดแบรกก่อก
8. กาวไซยาโนอะคริเลต สำหรับยึดแบรกก่อกติดกับแท่งพลาสติกแข็ง
9. เครื่องมือสำหรับยึดแบรกก่อกเพื่อให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งพลาสติกแข็งเท่ากันทุกครั้ง
10. เครื่องมือสำหรับยึดแท่งพลาสติกแข็งให้อยู่กับที่และอยู่ในมุมที่ต้องการขณะทำการทดลอง
11. เครื่องมือสำหรับตั้งมุมของร่องแบรกก่อกให้อยู่ในขนาดที่ต้องการ คือ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา
12. เครื่องมือสำหรับจับยึดลวดติดกับครอบสเอดของเครื่องยูนิเวอร์ซัลเทสติงมะชีนให้อยู่ตรงในแนวตั้ง



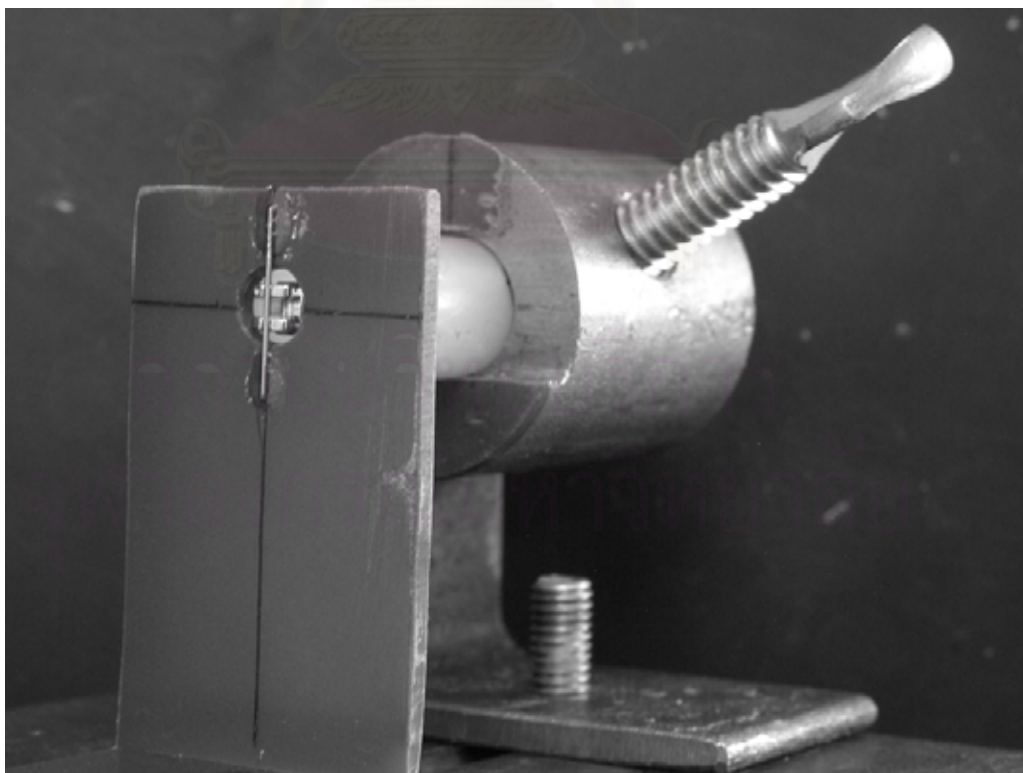
รูปที่ 13 รูปแสดงเครื่องมือสำหรับยึดแบรคเกตเพื่อให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแห่งพลาสติก
แข็งเท่ากันทุกครั้ง



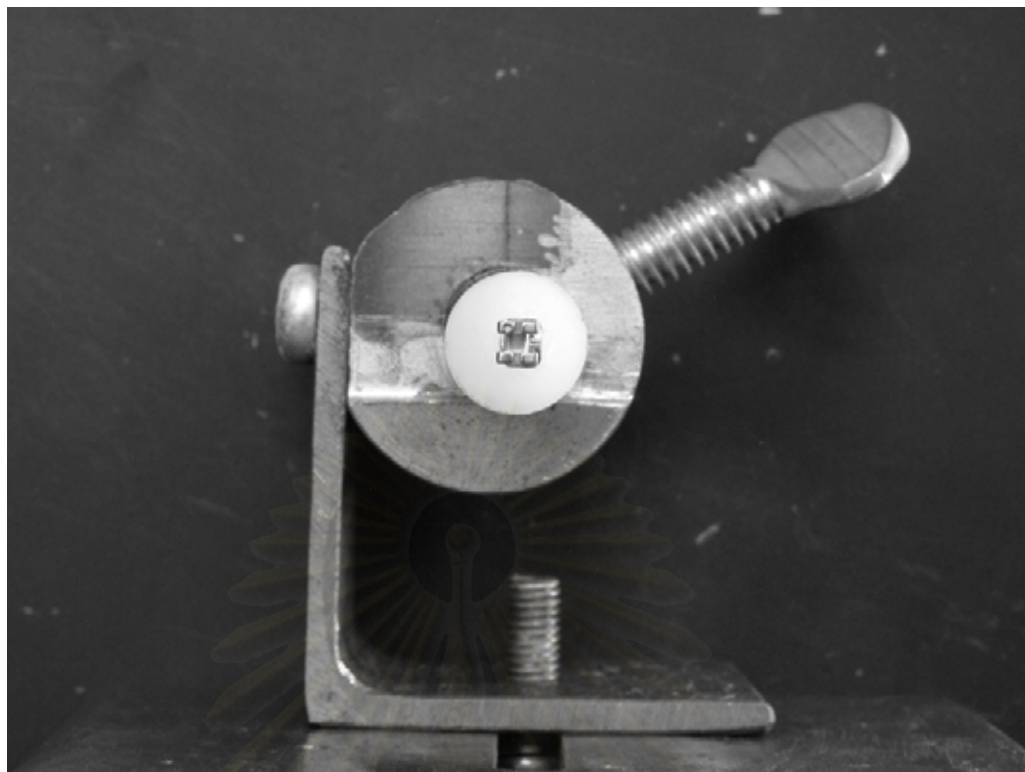
รูปที่ 14 แสดงแห่งพลาสติกแข็งหลักจาดติดแบรคเกตแล้ว และพร้อมที่จะทำการทดลอง



รูปที่ 15 แสดงเครื่องมือสำหรับตั้งมุมการเอียงของร่องแบรคเกตให้เอียงในขนาดที่ต้องการ โดยจะมือองศาละ 1 อัน



รูปที่ 16 แสดงลักษณะการใช้เครื่องมือในการตั้งมุมการเอียงของร่องแบรคเกต



รูปที่ 17 แสดงเครื่องมือสำหรับยึดแท่งพลาสติกแข็งให้อยู่กับที่และอยู่ในมุมที่ต้องการ
ขณะทำการทดลอง



รูปที่ 18 แสดงเครื่องมือสำหรับจับ
ยึดลวดติดกับครอสเสดของเครื่องยูนิ
เวอร์เซิลทดสอบตั้งมะชินให้อยู่ตรงใน
แนวตั้ง



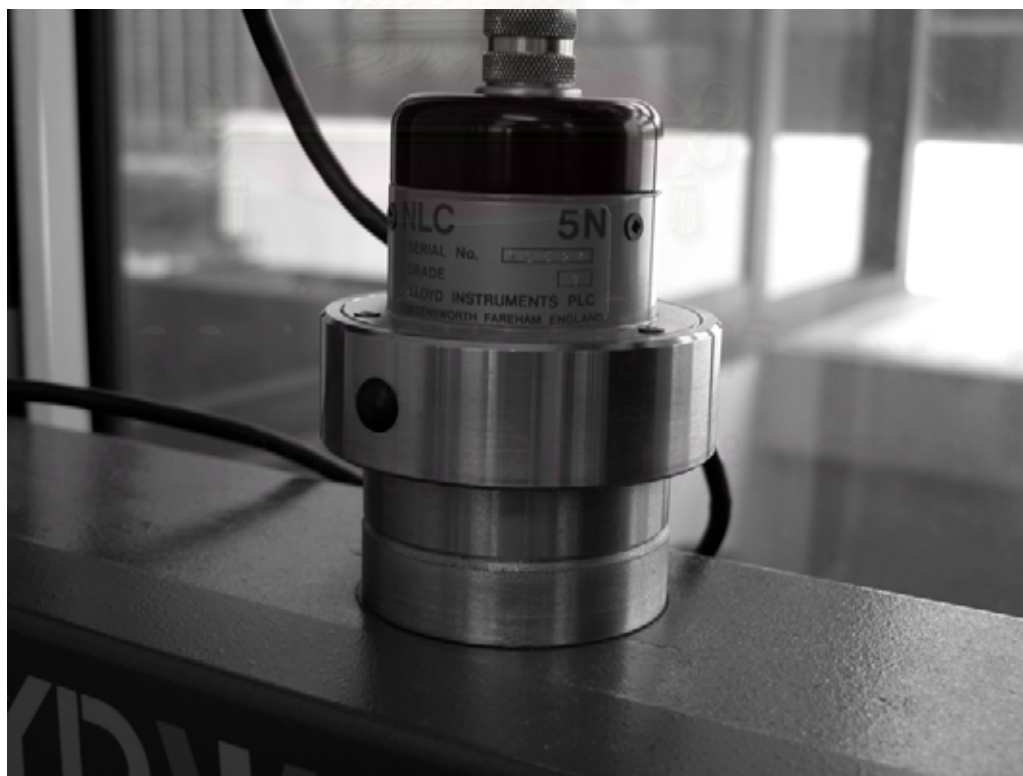
รูปที่ 19 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของเครื่องมือขณะทำการทดลองดึงลวด

13. ยูนิเวอร์ซัลเทสติงมะชีน เป็นเครื่องมือสำหรับวัดแรงที่ใช้ในการดึงลวดผ่านไปตามร่องแบรกกเกต ส่วนประกอบของเครื่องมือมีดังนี้

- ฟิกส์เฮด (fixed head) คือ ส่วนของเครื่องมือที่อยู่กับที่ ในการทดลองนี้จะทำหน้าที่ยึดเครื่องมือยึดแท่งพลาสติกแข็งและแบรกกเกตที่มีการตั้งมุมการเอียงไว้แล้ว
- ครอสเฮด (cross head) คือ ส่วนของเครื่องมือซึ่งเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงและเชื่อมต่อกับจอแสดงผล ทำให้สามารถอ่านค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ ในการทดลองนี้จะทำหน้าที่ยึดเครื่องมือยึดลวด โดยตั้งค่าให้ครอสเฮดเคลื่อนด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จะได้ระยะทาง 2 มิลลิเมตร
- ตู้น้ำหนัก (load cell) ขนาด 5 นิวตัน



รูปที่ 20 แสดงลักษณะเครื่อง
ยูนิเวอร์ซัลเทสติงมะชีน



รูปที่ 21 แสดงตุ้มน้ำหนักขนาด 5 นิวตัน

การรวบรวมข้อมูล

หาค่าแรงเสียดทานสถิต และค่าแรงเสียดทานที่วัดได้เมื่อลวดเคลื่อนที่ไป 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องลวดยูนีเวอร์แซลเทสติงมะชีน (Lloyd Universal Testing Machine, Model LR 10 K) เพื่อกำหนดหาค่าแรงเสียดทานจลน์ต่อไป

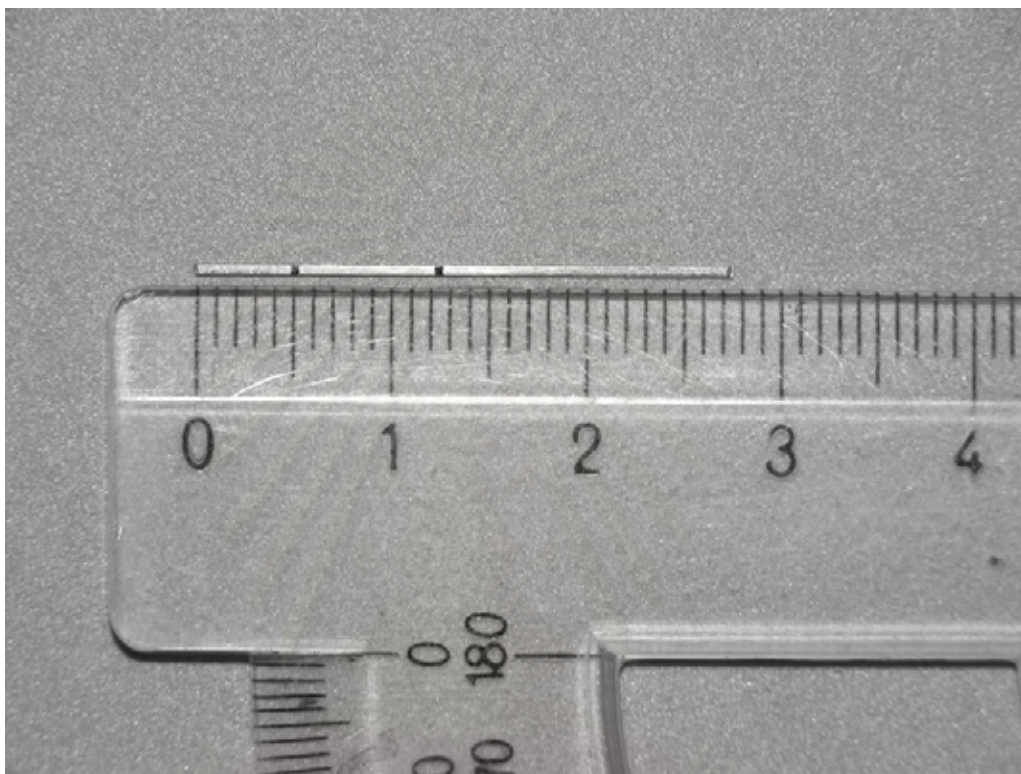
ตัวแปรของการวิจัย

1. ตัวแปรอิสระ ได้แก่
 - 1) ขนาดของลวดที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ขนาด
 - 2) มุมที่ลวดกระทำต่อร่องแบรกกेट คือ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา
2. ตัวแปรตาม ได้แก่
 - 1) ค่าแรงเสียดทานสถิต
 - 2) ค่าแรงเสียดทานจลน์

วิธีการทดลอง

1. คัดเลือกแบรกกेट ลวด และยางโพลีเอทเธนดังกล่าวข้างต้น โดยวิธีการแบบสุ่ม
2. นำแบรกกेट 120 ตัวมายึดติดกับแท่งพลาสติกแข็งทั้งด้านหัวและท้ายด้วยกาวไซยาโนอะครีเลต โดยใช้เครื่องมือสำหรับยึดแบรกกेटเป็นตัวช่วยให้ได้ตำแหน่งในการติดเหมือนเดิมทุกครั้ง แล้วทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้กาวแข็งเต็มที่ แล้วขีดเส้นกึ่งกลางที่แท่งพลาสติกเพื่อให้ยึดแท่งพลาสติกได้เหมือนเดิมทุกครั้ง (ดังรูปที่ 14)
3. แบ่งแบรกกेटที่ยึดแล้วเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 30 ตัว สำหรับลวดทั้ง 4 ขนาด ด้วยวิธีการแบบสุ่ม
4. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่เลือกมาทั้งหมด 960 เส้น 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ขนาดละ 240 เส้น โดยลวดแต่ละเส้นยาว 27.5 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นระยะประมาณจากกึ่งกลางของแบรกกेटของฟันตัดข้างบนแท้ถึงกึ่งกลางของแบรกกेटของฟันกรามน้อยซี่ที่ 2 (ประมาณจากขนาดฟันในการวิจัยของ วิชระ

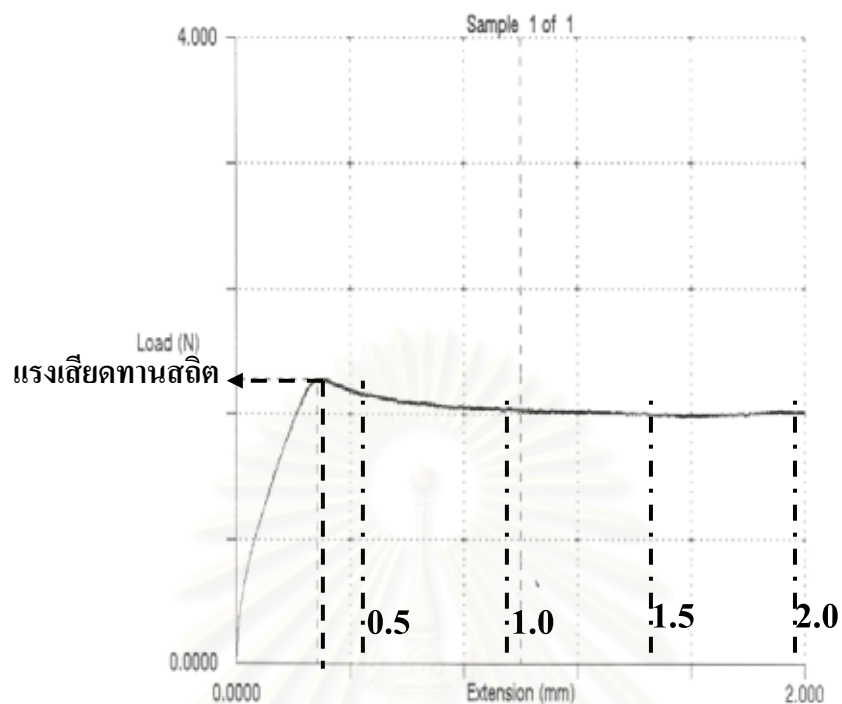
เพชรคุปต์ และปิยารัตน์ อภิวัดมนกุล, 2542) ซึ่งจำลองการถอนฟันกรามน้อยซี่ที่ 1 และต้องทำการเคลื่อนฟันเขี้ยวแท่นเพื่อเปิดช่องว่างนั้น รวมกับ 5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นระยะที่จะทำการจับลวดด้วยเครื่องมือยึดลวดที่จะยึดติดกับครอสเฮด ลวดแต่ละเส้นจะขีดด้วยปากกาเขียนแก้วที่ระยะ 5 มิลลิเมตร เพื่อเป็นตำแหน่งยึดลวด และ 12.5 มิลลิเมตร เพื่อเป็นตำแหน่งยึดแบรคเกต ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางฟันเขี้ยวแท่น



รูปที่ 22 แสดงลวดที่จะทำการทดลองที่ตัดให้ได้ความยาว 27.5 มิลลิเมตรและขีดตามที่ต้องการแล้ว

5. ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวด 4 ขนาดดังกล่าวที่มีมุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา โดย
 - 5.1 วัดแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว
 - 5.1.1 ยึดเครื่องมือจับยึดแท่งพลาสติกแข็งติดกับส่วนฟิกซ์เสดโดยตั้งให้อยู่ในแนวตรงกับส่วนแกนของครอสเฮด

- 5.1.2 ใส่แท่งพลาสติกที่ติดแบร็กเกตแล้วในเครื่องมือยึดแท่งพลาสติก และใช้เครื่องมือตั้งมุมให้ร่องแบร็กเกตทำมุมกับแนวตั้ง 0 องศา แล้วยึดให้แน่น เช็ดทำความสะอาดแบร็กเกตด้วยเอทิลแอลกอฮอล์
- 5.1.3 ยึดลวดที่เครื่องยึดลวดซึ่งอยู่ติดกับครอสเฮดที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตรที่ขีดเอาไว้ เลื่อนครอสเฮดลงมาให้ตำแหน่ง 12.5 มิลลิเมตรอยู่ที่กลางแบร็กเกต เช็ดทำความสะอาดลวดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ แล้วยึดลวดติดกับแบร็กเกตด้วยวงแหวนยาง โดยใช้แมทริวโฮลเดอร์
- 5.1.4 ทดสอบแรงดึงโดยให้ครอสเฮดเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที
- 5.1.5 ทำการวัดและบันทึกค่าแรงเสียดทาน โดยดูจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงกับระยะทางที่ลวดไถลไป เมื่อเส้นกราฟที่เกิดจากแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของเส้นกราฟจุดแรกก่อนที่จะมีการลดลงหรือคงที่ของเส้นกราฟที่จุดสูงสุดจุดนี้แรงที่อ่านได้คือค่าแรงเสียดทานสถิต จากนั้นบันทึกขนาดแรงที่อ่านได้ที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรไว้ เพื่อที่จะทำการหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้เป็นค่าแรงเสียดทานจลน์ต่อไป (ดังรูปที่ 23) โดยหน่วยที่วัดได้จากเครื่องจะเป็นนิวตัน ทำการแปลงหน่วยจากนิวตันเป็นกรัมโดยคูณด้วย 1,000 และหารด้วย 9.81 (เนื่องจาก 1,000 กรัมเท่ากับ 9.81 นิวตัน)
- 5.1.6 จากนั้นใช้เอ็กซ์พลอเรอร์แกะวงแหวนยางออก แล้วตั้งมุมใหม่ด้วยเครื่องตั้งมุมที่ 1 องศาในแบร็กเกตตัวเดิม เช็ดทำความสะอาดแบร็กเกตด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และเปลี่ยนลวดเส้นใหม่ ทำซ้ำข้อ 5.1.3 ถึง 5.1.5 เปลี่ยนมุมการเอียงของแบร็กเกตที่ 2 3 4 6 8 และ 10 องศาตามลำดับ แล้วจึงเปลี่ยนแบร็กเกตใหม่
- 5.1.7 ทำซ้ำ 5.1.2 ถึง 5.1.6 จนครบ 30 ครั้ง



รูปที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ลวดเคลื่อนไป

- 5.2 ทำการวัดและบันทึกค่าแรงเสียดทานสถิต และแรงที่อ่านได้ที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้ว ตามวิธีการเหมือนข้อ 5.1
- 5.3 ทำการวัดและบันทึกค่าแรงเสียดทานสถิต และแรงที่อ่านได้ที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² ตามวิธีการเหมือนข้อ 5.1
- 5.4 ทำการวัดและบันทึกค่าแรงเสียดทานสถิต และแรงที่อ่านได้ที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ตามวิธีการเหมือนข้อ 5.1
6. ศึกษาเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 4 ขนาด เมื่อมีมุมกระทำต่างๆ ทั้ง 8 มุมดังกล่าว

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 4 ขนาด ที่มุมกระทำทั้ง 8 มุม โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และถ้าผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างกัน ต้องทำการทดสอบก่อนว่าแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ จึงสามารถกำหนดวิธีการทดสอบความแตกต่างของแต่ละคู่ได้ ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (SPSS 11.0 for Windows)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

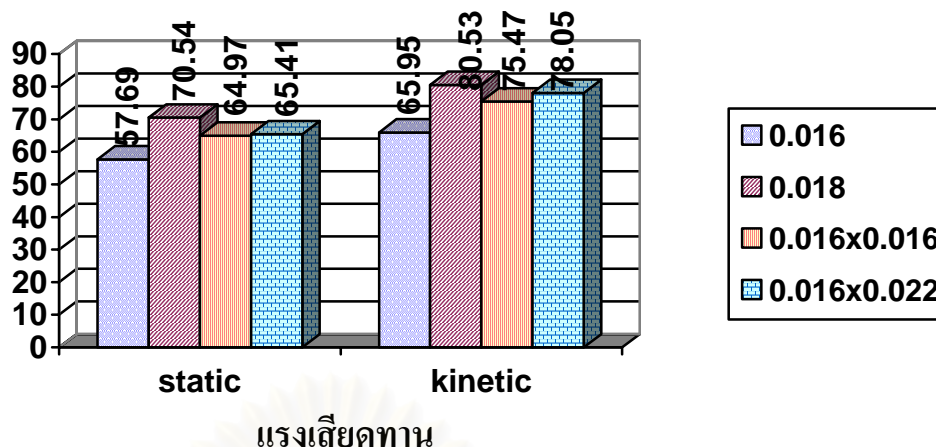
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ในการศึกษาขนาดของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเป็น 0 องศา ได้หาค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variance, C.V.) ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์เมื่อลวดไถลผ่านร่องแบริกเกตด้วยความเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อ N = 30 ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 24

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (C.V.) ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเป็น 0 องศา

ขนาดลวด	มุมกระทำ (องศา)	แรงเสียดทานสถิต (กรัม)			แรงเสียดทานจลน์ (กรัม)		
		ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V. (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V. (ร้อยละ)
0.016 นิ้ว	0	57.69	6.79	11.77	65.95	8.28	12.55
0.018 นิ้ว	0	70.54	10.63	15.07	80.53	9.73	12.08
0.016x0.016 นิ้ว ²	0	64.97	9.78	15.05	75.47	10.65	14.11
0.016x0.022 นิ้ว ²	0	65.41	8.08	12.35	78.05	6.96	8.92

ผลการวิจัยพบว่า แรงเสียดทานทั้งสองประเภทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลวดมีขนาดใหญ่ขึ้น ลวดกลมขนาด 0.018 นิ้ว มีแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว²



รูปที่ 24 แผนภูมิแท่งแสดงขนาดของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของลวดทั้ง 4 ขนาดที่มุม 0 องศา

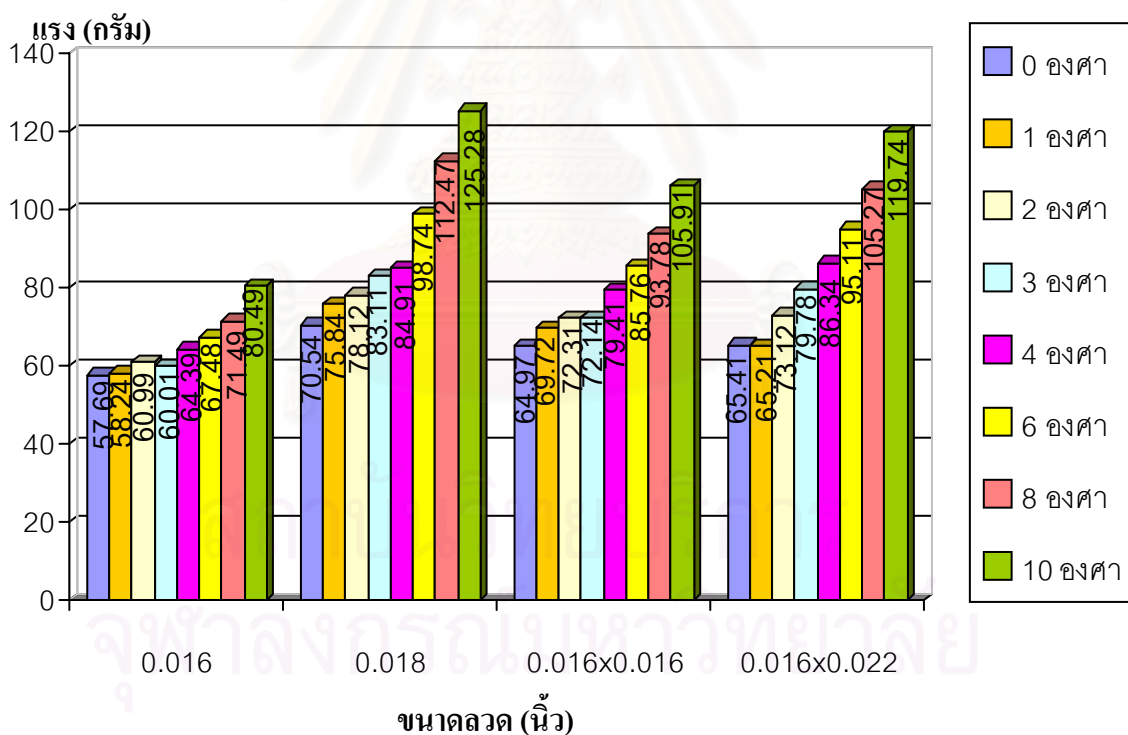
- ในการศึกษาขนาดของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ได้หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ เมื่อลวดไถลผ่านร่องแบร็กเกตด้วยความเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 และรูปที่ 25 ถึง 30

ผลการวิจัยพบว่า แรงเสียดทานทั้งสองประเภทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยลวดกลมขนาด 0.018 นิ้ว มีค่าแรงเสียดทานสถิตสูงสุดในทุกค่ามุม และมีค่าแรงเสียดทานจลน์สูงสุดที่มุม 0 ถึง 2 องศา เมื่อมุม 3 ถึง 10 องศา พบว่าลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว² มีค่าแรงเสียดทานจลน์สูงสุด

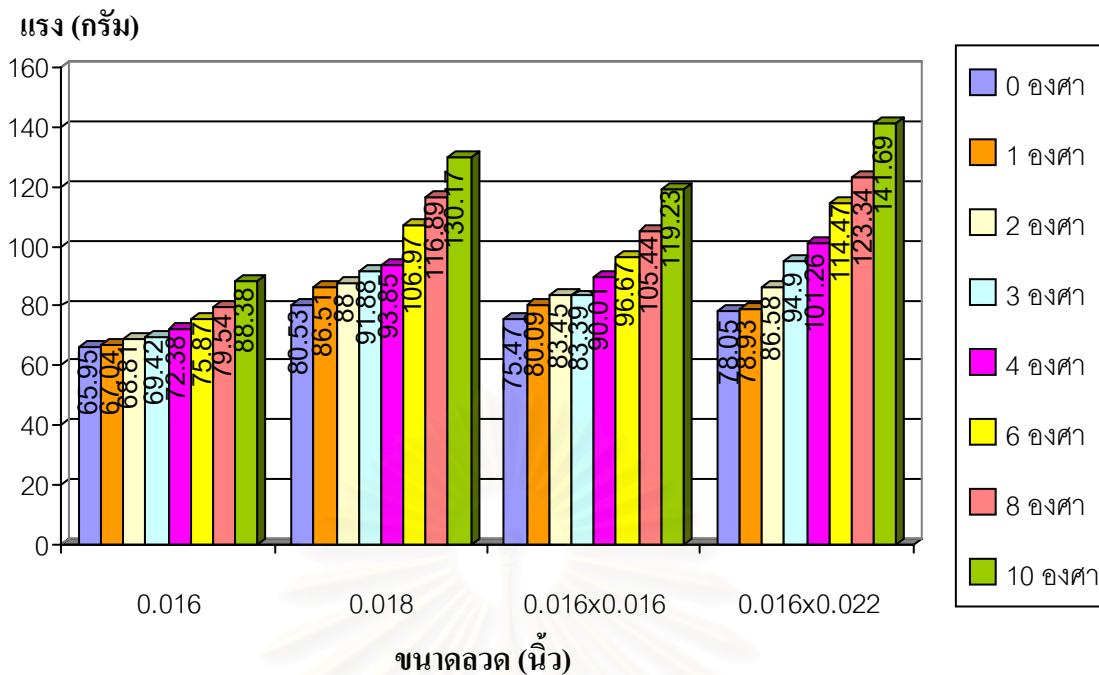
ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.)

ขนาดลวด	มุมกระทำ (องศา)	แรงเสียดทานสถิต			แรงเสียดทานจลน์		
		ค่าเฉลี่ย (กรัม)	S.D.	C.V. (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)	S.D.	C.V. (ร้อยละ)
0.016 นิ้ว	0	57.69	6.79	11.77	65.95	8.28	12.55
	1	58.24	6.18	10.61	67.04	6.16	9.19
	2	60.99	7.19	11.79	68.81	7.13	10.36
	3	60.01	8.40	13.99	69.42	8.99	12.95
	4	64.39	8.46	13.14	72.38	8.19	11.32
	6	67.48	8.68	12.86	75.87	8.79	11.59
	8	71.49	8.64	12.09	79.54	8.54	10.74
	10	80.49	11.53	14.32	88.38	10.92	12.36
	0.018 นิ้ว	0	70.54	10.63	15.07	80.53	9.73
1		75.84	11.63	15.33	86.51	12.04	13.92
2		78.12	13.39	17.14	88.00	13.01	14.78
3		83.11	12.49	15.03	91.88	12.85	13.99
4		84.91	11.65	13.72	93.85	11.46	12.21
6		98.74	13.19	13.36	106.97	13.56	12.68
8		112.47	15.72	13.98	116.89	13.23	11.32
10		125.28	21.39	17.07	130.17	19.79	15.20
0.016x0.016 นิ้ว ²		0	64.97	9.78	15.05	75.47	10.65
	1	69.72	9.77	14.01	80.09	10.53	13.15
	2	72.31	10.64	14.71	83.45	13.34	15.99
	3	72.14	9.23	12.79	83.39	9.00	10.79
	4	79.41	9.75	12.28	90.01	10.09	11.21
	6	85.76	14.45	16.85	96.67	13.71	14.18
	8	93.78	19.91	21.23	105.44	17.07	16.19
	10	105.91	14.48	13.67	119.23	16.02	13.44

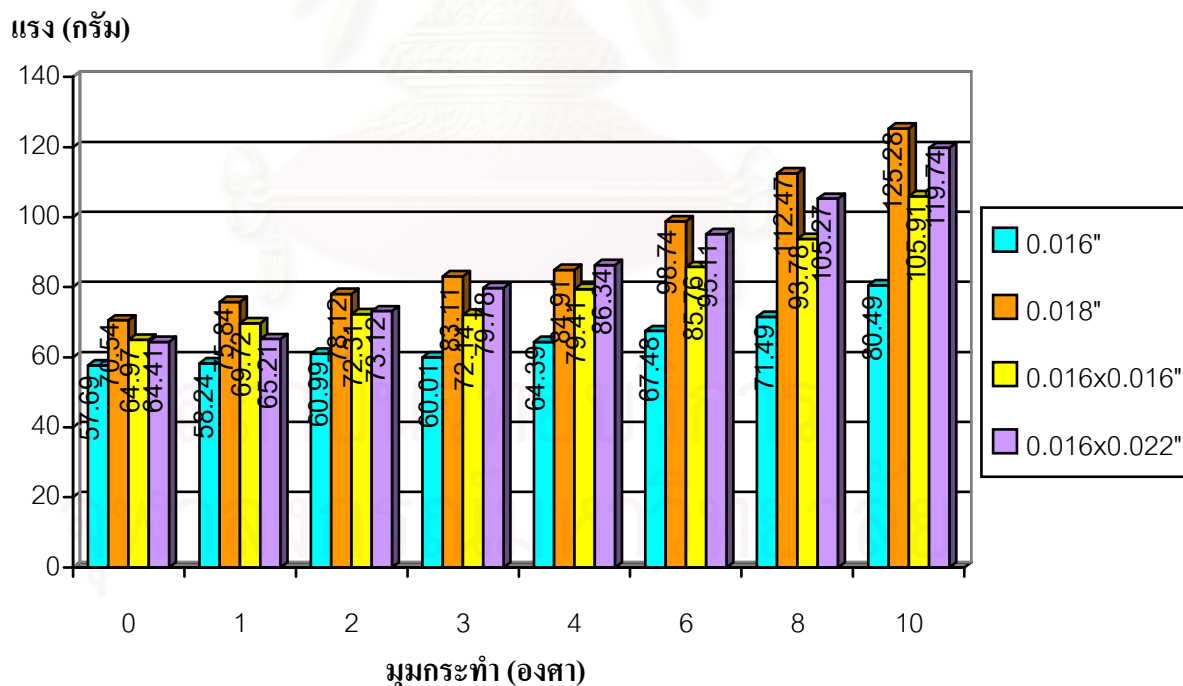
ขนาดลวด	มุมกระทำ (องศา)	แรงเสียดทานสถิต (กรัม)			แรงเสียดทานจลน์ (กรัม)		
		ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V. (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V. (ร้อยละ)
0.016x0.022 นิ้ว ²	0	65.41	8.08	12.35	78.05	6.96	8.92
	1	65.21	6.33	9.71	78.93	7.21	9.13
	2	73.12	10.33	14.13	86.58	10.61	12.25
	3	79.78	11.33	14.20	94.90	12.03	12.68
	4	86.34	14.24	16.49	101.26	16.14	15.94
	6	95.11	14.03	14.75	114.47	14.92	13.03
	8	105.27	14.49	13.76	123.34	15.07	12.22
	10	119.74	13.31	11.12	141.69	15.72	11.09



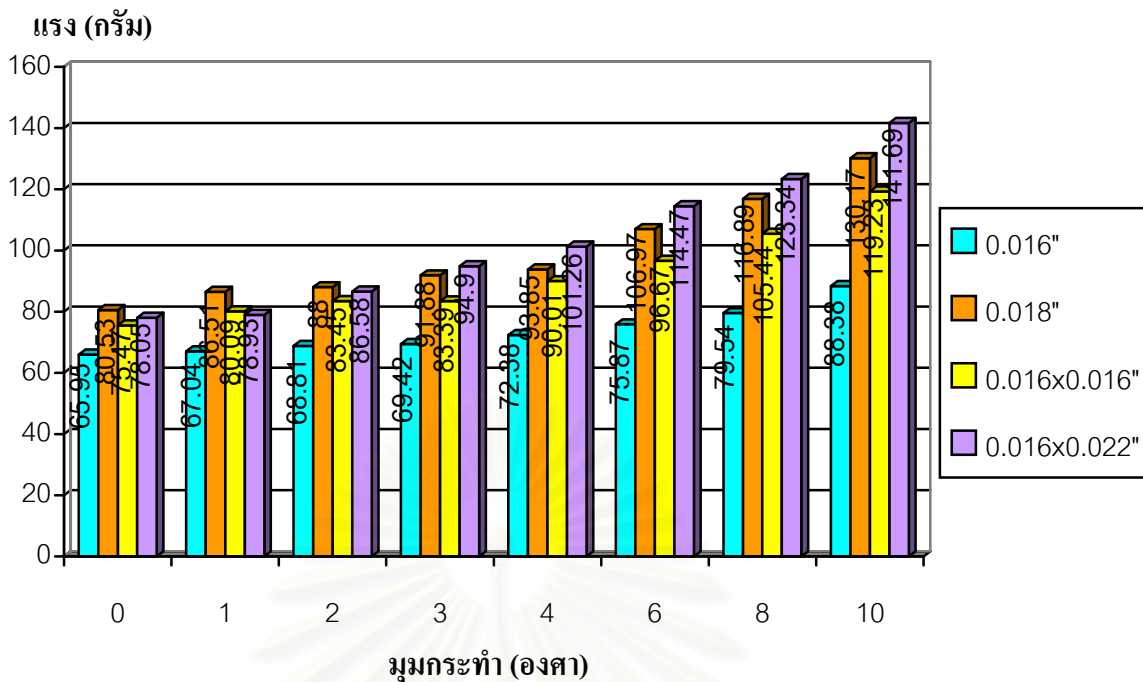
รูปที่ 25 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแปรงและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว²



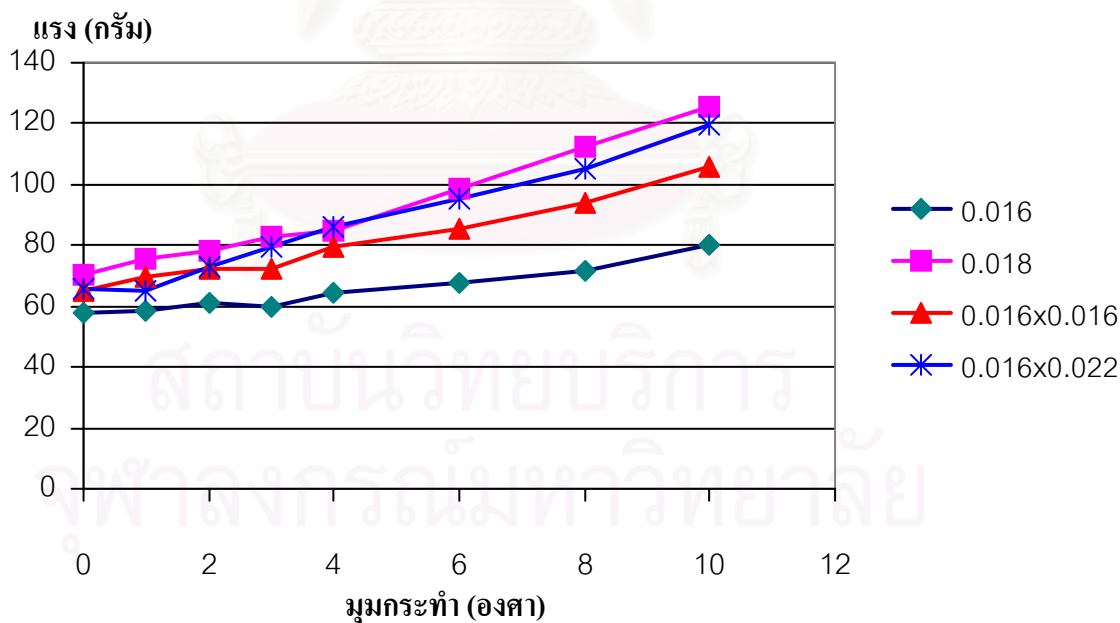
รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบร็กเกต และหลอดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ในหลอดขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว²



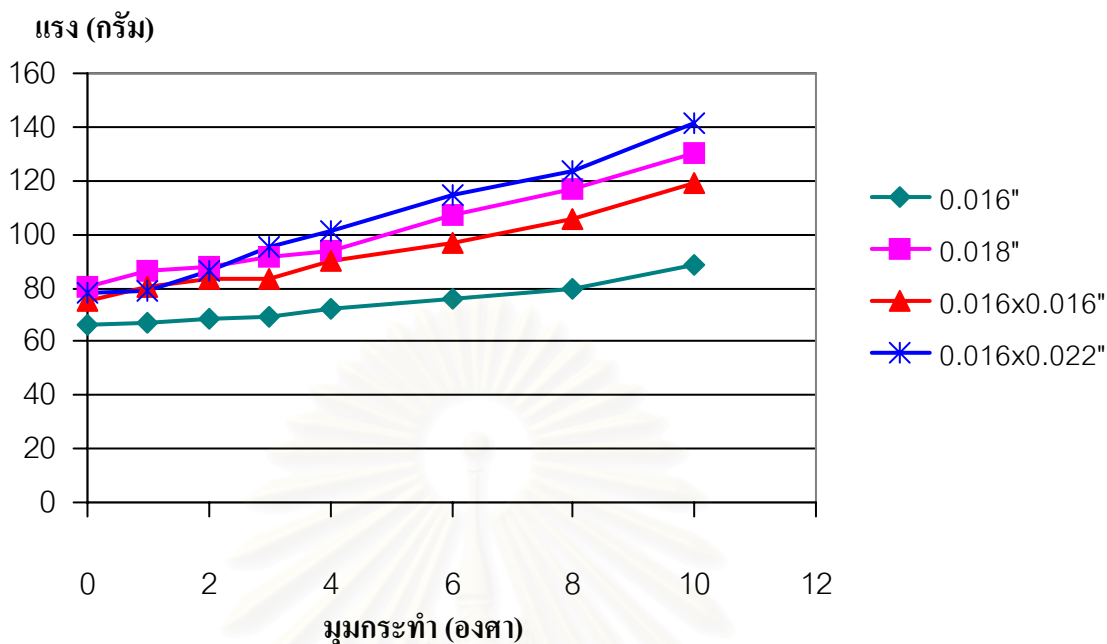
รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบร็กเกต และหลอดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา



รูปที่ 28 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา



รูปที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา



รูปที่ 30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบริกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา

3. จากสมมุติฐานการวิจัยที่กล่าวว่ามี ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานในลวดที่มีขนาดต่างกันเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเท่ากัน ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทาน โดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่ามีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 3 ถึง 10) จึงทำการทดสอบต่อด้วยสถิติ Tukey's honestly-significant-difference test (Tukey HSD) ในกรณีที่ความแปรปรวนมีค่าเท่ากัน ในกรณีที่ความแปรปรวนไม่เท่ากันจะทำการทดสอบทางสถิติ Tamhane's T2 ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

3.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของแบริกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างแบริกเกตเท่ากัน พบว่าลวด 0.016 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานสถิตน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และลวด 0.018 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานสถิตมากที่สุด แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

- 3.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ของแบร็กเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างแบร็กเกตเท่ากัน พบว่าลวดขนาด 0.016 นิ้วยังคงทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนลวดที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานจลน์มากที่สุด เมื่อมุมกระทำตั้งแต่ 0 ถึง 2 องศา คือลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้ว แต่เมื่อมุมกระทำมากขึ้น คือ 3 ถึง 10 องศา พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบร็กเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตเป็น 0 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.001)

0 องศา Static (Tukey HSD)

0 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	*	**
0.018 นิ้ว	***		NS	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	NS		NS
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	NS	

0 องศา Dynamic (Tukey HSD)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 1 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

1 องศา Static (Tamhane's T2)

1 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		NS	***
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	NS		NS
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	*	NS	

1 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 2 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

2 องศา Static (Tamhane's T2)

2 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		NS	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	NS		NS
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	NS	

2 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 3 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

3 องศา Static (Tukey HSD)

3 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		***	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	*		*
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	***	

3 องศา Dynamic (Tukey HSD)

ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 4 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

4 องศา Static (Tukey HSD)

4 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		NS	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	NS		NS
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	*	

4 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรเกตเป็น 6 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

6 องศา Static (Tukey HSD)

6 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		***	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	*		*
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	***	

6 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 9 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบรเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรเกตเป็น 8 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

8 องศา Static (Tamhane's T2)

8 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		***	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	*		NS
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	***	

8 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 10 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและจลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016x0.016 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 10 องศา (NS ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทาง สถิติ 0.001)

10 องศา Static (Tamhane's T2)

10 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016 นิ้ว		***	***	***
0.018 นิ้ว	***		***	NS
0.016x0.016 นิ้ว ²	***	NS		**
0.016x0.022 นิ้ว ²	***	NS	***	

10 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

4. จากสมมุติฐานการวิจัยที่ว่ามีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานเมื่อลวดและร่องแบรกกเกตทำมุมต่างกัน ขณะที่ขนาดลวดเท่ากันผลการวิจัยยอมรับสมมุติฐานนี้เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทาน ใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่ามีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 11 ถึง 14) โดยสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

4.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อลวดมีขนาดเท่ากัน แต่มีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตต่างกัน 8 มุม คือ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา พบว่าในลวดทุกขนาดเมื่อมุมกระทำเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในลวดขนาดเล็กกว่าจะมีช่วงมุมที่แบรกกเกตสามารถเอียงไปได้โดยไม่ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกว้างกว่าในลวดที่มีขนาดใหญ่

ตารางที่ 11 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแปรงเกดและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว เมื่อมุมกระทำระหว่างลวด และร่องแปรงเกดเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา (NS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.001)

0.016 นิ้ว Static (Tukey HSD)

0.016	0	1	2	3	4	6	8	10
0		NS	NS	NS	*	***	***	***
1	NS		NS	NS	NS	***	***	***
2	NS	NS		NS	NS	NS	***	***
3	NS	NS	NS		NS	*	***	***
4	NS	NS	NS	NS		NS	*	***
6	***	**	*	NS	NS		NS	***
8	***	***	***	***	*	NS		***
10	***	***	***	***	***	***	**	

0.016 นิ้ว Dynamic (Tukey HSD)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานและ
จลน์ระหว่างแบรกกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้ว เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและ
ร่องแบรกกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา (NS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ
เชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มี
ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.001)

0.018 นิ้ว Static (Tamhane's T2)

0.018	0	1	2	3	4	6	8	10
0		NS	NS	**	***	***	***	***
1	NS		NS	NS	NS	***	***	***
2	NS	NS		NS	NS	***	***	***
3	**	NS	NS		NS	***	***	***
4	***	NS	NS	NS		**	***	***
6	***	***	***	***	**		*	***
8	***	***	***	***	***	NS		NS
10	***	***	***	***	***	***	NS	

0.018 นิ้ว Dynamic (Tamhane's T2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 13 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแปรงเกดและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.016 นิ้ว² เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกดเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา (NS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.001)

0.016x0.016 นิ้ว² Static (Tamhane's T2)

0.016X0.016	0	1	2	3	4	6	8	10
0		NS	NS	NS	***	***	***	***
1	NS		NS	NS	**	***	***	***
2	NS	NS		NS	NS	**	***	***
3	NS	NS	NS		NS	**	***	***
4	***	*	NS	NS		NS	*	***
6	***	***	**	***	NS		NS	***
8	***	***	***	***	**	NS		NS
10	***	***	***	***	***	***	.056	

0.016x0.016 นิ้ว² Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 14 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต และจลน์ระหว่างแบริกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว² เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตเป็น 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา (NS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 *** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.001)

0.016x0.022 นิ้ว² Static (Tamhane's T2)

0.016x0.022	0	1	2	3	4	6	8	10
0		NS	NS	***	***	***	***	***
1	NS		*	***	***	***	***	***
2	*	NS		NS	**	***	***	***
3	***	***	NS		NS	***	***	***
4	***	***	**	NS		NS	***	***
6	***	***	***	***	*		NS	***
8	***	***	***	***	***	NS		**
10	***	***	***	***	***	***	***	

0.016x0.022 นิ้ว² Dynamic (Tamhane's T2)

5. จากการใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทิศทาง (two-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าทั้งขนาดของลวด ขนาดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกต และปฏิสัมพันธ์ระหว่างขนาดลวดและมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตมีผลทำให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 15 และ

ตารางที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทิศทางของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: STATIC

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	303005.993 ^a	31	9774.387	68.208	.000
Intercept	6258746.814	1	6258746.814	43674.72	.000
WIRE	91898.709	3	30632.903	213.762	.000
DEGREE	189927.789	7	27132.541	189.336	.000
WIRE * DEGREE	21179.495	21	1008.547	7.038	.000
Error	132985.801	928	143.304		
Total	6694738.609	960			
Corrected Total	435991.794	959			

a. R Squared = .695 (Adjusted R Squared = .685)

ตารางที่ 16 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทิศทางของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: DYNAMIC

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	347797.743 ^a	31	11219.282	76.933	.000
Intercept	8077332.857	1	8077332.857	55388.06	.000
WIRE	121592.047	3	40530.682	277.928	.000
DEGREE	199990.460	7	28570.066	195.911	.000
WIRE * DEGREE	26215.237	21	1248.345	8.560	.000
Error	135331.772	928	145.832		
Total	8560462.372	960			
Corrected Total	483129.515	959			

a. R Squared = .720 (Adjusted R Squared = .711)

เมื่อขนาดลวดและขนาดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตมีปฏิสัมพันธ์กัน จึงได้ทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (linear regression) เพื่อที่จะใช้ในการทำนายแรงเสียดทาน ผลการวิจัยพบว่าขนาดลวดและขนาดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตสามารถใช้ทำนายค่าแรงเสียดทานสถิตได้ความแม่นยำเพียงร้อยละ 50.8 และทำนายค่าแรงเสียดทานจลน์ได้ความแม่นยำเพียงร้อยละ 56.5 ดังตารางที่ 17 และ 18

ตารางที่ 17 แสดงค่า R square ของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.712 ^a	.508	.507	14.97806	.741

a. Predictors: (Constant), DEGREE, WIRE

b. Dependent Variable: STATIC

ตารางที่ 18 แสดงค่า R square ของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.752 ^a	.565	.564	14.81990	.850

a. Predictors: (Constant), DEGREE, WIRE

b. Dependent Variable: DYNAMIC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานขนาดร่องแบริกเกต 0.018×0.025 นิ้ว² และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ขนาด คือ 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว² เมื่อมุมกระทำระหว่างร่องแบริกเกตและลวดเท่ากัน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ในลวดแต่ละขนาดเมื่อมุมกระทำระหว่างร่องแบริกเกตและลวดเปลี่ยนไป 8 มุม คือ 0 1 2 3 4 6 8 และ 10 องศา ในการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานทั้งสองชนิดทดสอบโดยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และทดสอบความแตกต่างของแต่ละคู่ด้วย Tukey HSD และ Tamhane's T2

สรุปผลการวิจัย

1. แรงเสียดทานสถิตของแบริกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตคงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดลวด พบว่าที่มุม 0 องศา แรงเสียดทานสถิตของลวดขนาด 0.016 นิ้ว 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว² ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกต พบว่าลวด 0.016 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ 0.016×0.016 นิ้ว² 0.016×0.022 นิ้ว² และลวดขนาด 0.018 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด
2. แรงเสียดทานจลน์ของแบริกเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตคงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดลวด พบว่าที่มุม 0 องศา ลวดขนาด 0.016 นิ้ว และ 0.016×0.016 นิ้ว² ไม่ทำให้เกิดความแรงเสียดทานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อมุมกระทำเพิ่มขึ้น พบว่าลวดขนาด 0.016 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานจลน์น้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และลวดขนาด 0.018 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุดเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบริกเกตน้อย (0

ถึง 3 องศา) แต่เมื่อมุมกระทำมากขึ้น (4 ถึง 10 องศา) พบว่าลวดขนาด 0.016×0.022 นิ้ว² ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด

3. ในลวดที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีช่วงองศาที่แบรกก่ดสามารถเอียงไปได้โดยที่ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าแรงเสียดทานสถิตและจลน์กว้างกว่าหรือเรียกว่ามีมุมวิกฤตมากกว่า (critical angle) คือ ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว มีมุมวิกฤตที่ 4 องศา ลวดขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² มีมุมวิกฤตที่ 3 องศา ส่วนลวดขนาด 0.018 นิ้ว และ 0.016×0.022 นิ้ว² มีมุมวิกฤตที่ 2 องศา
4. เมื่อขนาดลวดคงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกก่ด พบว่าในลวดทุกขนาดเมื่อมีการเพิ่มขนาดมุมกระทำจะมีผลทำให้แรงเสียดทานทั้งแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อภิปรายผลการวิจัย

จากสมมุติฐานการวิจัยข้อแรกทีกล่าวว่่า มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานในลวดที่มีขนาดต่างกันเมื่อมีมุมกระทำคงที่ ผลการวิจัยยอมรับสมมุติฐานนี้

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Angolkar และคณะ, 1990; Frank และ Nikolai, 1980; Garner และคณะ, 1986; Kapila และคณะ, 1990; Peterson และคณะ, 1982; Andreasen และ Quevedo, 1970; Riley และคณะ, 1979; Berger, 1990; Vaughan และคณะ, 1995; Echol, 1975; Bednar และคณะ, 1991; Ireland และคณะ, 1991; Tanne และคณะ, 1991) เมื่อเปรียบเทียบแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากลวดกลมกับลวดเหลี่ยม ผลการวิจัยกลับขัดแย้งกับงานวิจัยบางชิ้นที่พบว่าลวดเหลี่ยมทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดกลม (Kapila และคณะ, 1990; Vaughan และคณะ, 1995; Angolkar และคณะ, 1990) เนื่องจากพบว่าลวดกลมขนาด 0.018 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหลี่ยมขนาด 0.016×0.016 นิ้ว² และ 0.016×0.022 นิ้ว² แต่สอดคล้องกับการศึกษาของ Frank และ Nikolai (1980) ที่ทำการศึกษาในแบรกก่ดขนาด 0.022×0.028 นิ้ว² ซึ่งพบว่าลวดขนาด 0.020 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดขนาด 0.017×0.025 นิ้ว² ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า เมื่อมีการชนกันระหว่างลวดและร่องแบรกก่ด ลวดกลมจะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างลวดและร่องแบรกก่ดน้อยกว่าลวดเหลี่ยม ทำให้เกิดแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากกว่าและอาจเกิดรอยกดลงไปบนเนื้อของลวดได้ ส่งผลให้ต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นในการเริ่มดึงแบรกก่ดให้พ้นออกไปจากรอยกดนี้แล้วจึงไถลไปบนลวดได้ (Frank และ Nikolai,

1980) ทำให้ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตในลวด 0.018 นิ้วมากกว่าลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว² แต่เมื่อแบรคเกตเริ่มเคลื่อนไปแล้ว รอยกดของมุมแบรคเกตลงไปในเรื่องลวดไม่มีผลต่อค่าแรงเสียดทาน แต่พื้นที่ผิวสัมผัสที่ลวดสัมผัสกับร่องแบรคเกตและแรงปกติที่กดลงไปมีผลต่อค่าแรงเสียดทานมากกว่า เนื่องจากลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว² มีพื้นที่สัมผัสกับแบรคเกตมากกว่าลวด 0.018 นิ้ว² ดังนั้นลวด 0.016x0.022 นิ้ว² จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานจลน์มากกว่าในลวดขนาดอื่นที่ทำการวิจัย

เหตุผลที่ลวดขนาดเล็กทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดขนาดใหญ่อาจเป็นเพราะลวดขนาดเล็กมีช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรคเกตมากกว่าจึงทำให้มีแรงปกติที่กดลงบนแบรคเกตน้อยกว่าลวดขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างลวดและร่องแบรคเกตน้อยกว่า นอกจากนี้ การที่งานวิจัยนี้ใช้วงแหวนยางในการมัดลวดอาจจะมีผลต่อแรงเสียดทานได้ เนื่องจากเมื่อมัดลวดที่มีขนาดใหญ่ด้วยวงแหวนยาง ยางจะต้องถูกยืดออกมากกว่าในลวดที่มีขนาดเล็ก เมื่อยางถูกยืดออกมากก็ย่อมทำให้เกิดแรงกดมากกว่ายางที่ถูกยืดออกน้อย ดังนั้นจึงอาจจะมีผลทำให้ในลวดใหญ่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นมากกว่าได้

ส่วนอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ลวดขนาดเล็กเกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดขนาดใหญ่ก็คือเรื่องเกี่ยวกับความแข็งตึงของลวด เนื่องจากลวดขนาดเล็กมีค่าความแข็งตึงน้อยกว่าลวดขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อมีการบิดหมุนแบรคเกตซึ่งมีผลให้ลวดมีการบิดงอด้วย ในลวดที่มีความแข็งตึงมากกว่าจะทำให้เกิดแรงปกติที่กดลงบนแบรคเกตมากกว่าด้วย เมื่อมีแรงปกติมากกว่าทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่า ดังนั้นเมื่อมีการบิดหมุนของแบรคเกตในลวดขนาดเล็กที่มีค่าความแข็งตึงของลวดน้อยกว่าซึ่งทำให้แรงปกติที่กดลงบนลวดน้อยจึงส่งผลให้ลวดขนาดเล็กเกิดแรงเสียดทานน้อยกว่า ส่วนในลวดขนาดใหญ่ที่มีค่าความแข็งตึงของลวดมากกว่าก็ทำให้เกิดแรงปกติในปริมาณที่มากกว่าจึงมีผลให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่า

จากสมมุติฐานการวิจัยข้อที่สองที่กล่าวว่ามี ความแตกต่างของค่าแรงเสียดทานเมื่อลวดและร่องแบรคเกตกระทำมุมที่ต่างกันเมื่อขนาดลวดคงที่ จากผลการวิจัยซึ่งพบว่าในลวดทุกขนาดเมื่อมีการเพิ่มขนาดมุมกระทำจะมีผลทำให้แรงเสียดทานทั้งแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Frank และ Nikolai, 1980; Peterson และคณะ, 1980; Tidy, 1989; Andreasen และ Quevedo, 1970; Bednar และคณะ, 1991, Tselepis และคณะ, 1994) ทั้งนี้เพราะการบิดหมุนของแบรคเกตทำให้เกิดการชนกันของลวดและขอบมุมของร่องแบรคเกต จึงทำให้แรงที่ลวดกดบนแบรคเกตเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากผลการวิจัยยังพบว่าในลวดที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีช่วงองศาที่แบรกกेटสามารถเอียงไปได้โดยที่ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าแรงเสียดทานสถิตและจลน์กว้างกว่าหรือเรียกว่ามีมุมวิกฤตมากกว่า (critical angle) คือ ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว มีมุมวิกฤตที่ 4 องศา ลวดขนาด 0.016x0.016 นิ้ว² มีมุมวิกฤตที่ 3 องศา ส่วนลวดขนาด 0.018 นิ้ว² และ 0.016x0.022 นิ้ว² มีมุมวิกฤตที่ 2 องศา การที่ลวดขนาดเล็กมีค่ามุมวิกฤตมากกว่า เนื่องจากลวดขนาดเล็กมีช่องว่างระหว่างลวดและร่องแบรกกेटมากกว่าลวดขนาดใหญ่ แบรกกेटสามารถหมุนบิดไปได้มากกว่าโดยไม่ชนกับลวด การชนกันนี้ทำให้แรงปกติที่กดลงบนมุมของแบรกกेटและลวดเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานจึงเพิ่มขึ้นด้วย

จากผลการวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าในการกลวิธีการเลื่อนไถลเพื่อที่จะดึงฟันเพื่อปิดหรือเปิดช่องว่างในการจัดฟัน วิธีการที่ดีที่สุดคือต้องจัดความสัมพันธ์ระหว่างร่องแบรกกेटกับลวดให้ไม่มากไปกว่าค่ามุมวิกฤตจึงจะเริ่มเคลื่อนฟันได้ เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งแบรกกेटสามารถถูกบิดไปได้ไม่เกิน 2 องศา แต่ถ้าหากใช้ลวดขนาดเล็กลง เช่น 0.016 นิ้วก็สามารถเคลื่อนฟันได้โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแม้ว่าแบรกกेटจะเอียงมากถึง 4 องศา

นอกจากการจัดความสัมพันธ์ระหว่างร่องแบรกกेटกับลวดแล้ว การเลือกขนาดลวดที่จะใช้ก็มีความสำคัญเช่นกัน พบว่าลวด 0.016 นิ้วทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับแบรกกेटขนาด 0.018x0.025 นิ้ว² ดังนั้นจึงควรที่จะเลือกใช้ในการเคลื่อนฟันแบบกลวิธีการเลื่อนไถล อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาสิ่งอื่นประกอบด้วย เช่น ขนาดของช่องว่างหรือระยะห่างระหว่างแบรกกेटในช่วงที่ต้องมีการเคลื่อนฟัน เนื่องจากการมีระยะห่างระหว่างแบรกกेटมากก็ทำให้ค่าความแข็งดิ่งของลวดลดลง และการเคลื่อนฟันในลวดที่มีค่าความแข็งดิ่งต่ำอาจจะทำให้ลวดมีการโค้งงอและไม่สามารถรักษารูปร่างของขากรรไกรแบบที่ต้องการไว้ได้ และยังสามารถทำให้เกิดข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์อื่นๆอีก เช่น การยื่นยาวของฟันหน้า การล้มเอียงของฟันที่ต้องการเคลื่อน หรือแม้แต่การสูญเสียหลักยึด เป็นต้น ดังนั้นในกรณีนี้ อาจต้องเปลี่ยนไปใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแม้ว่าจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าก็ตาม

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตในทุกกลุ่มทดลอง ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีที่ว่าแรงเสียดทานสถิตจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์เสมอ แต่ก็สอดคล้องกับงานวิจัยบางชิ้นที่มีรูปแบบการทดสอบคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Kusy และคณะ, 1991; Michelberger และคณะ, 2000) กล่าวคือจำลองการดึงลวดให้เคลื่อนผ่านไปตามร่องแบรกกेट ซึ่งการเคลื่อนลวดผ่านร่องแบรกกेटอาจจะเกิดมีการโค้งงอหรือบิดตัวของ

ลวดในขณะตั้ง ซึ่งอาจจะมีผลทำให้ค่าแรงเสียดทานที่วัดได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี หรืออาจเกิดจากการที่ช่วงแหวนยางในการมัดลวด เมื่อลวดเคลื่อนไปอาจทำให้วงแหวนยางมีการยืดออกตาม มีผลให้ต้องใช้แรงในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้แรงเสียดทานจลน์มากกว่าแรงเสียดทานสถิต

ข้อเสนอแนะ

1. การวิจัยนี้เป็นการศึกษาแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ในสภาวะแห้ง ซึ่งไม่เหมือนกับสภาวะจริงในช่องปาก ดังนั้นการนำผลการวิจัยนี้ไปใช้จริงในทางคลินิก อาจจะไม่ได้ผลเป็นไปตามการทดลอง จึงควรที่จะมีการศึกษาต่อไปในสภาวะที่มีน้ำลายเป็นปัจจัยร่วม
2. การวิจัยนี้ศึกษาโดยวัดขนาดแรงเสียดทานทันทีที่ใช้ยางมัดลวดเข้ากับแบร็กเกต ซึ่งตามปกติแล้วในสภาวะช่องปาก วงแหวนยางจะมีการสูญเสียแรงอย่างรวดเร็วใน 24 ชั่วโมงแรก ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรที่จะมัดลวดเข้ากับแบร็กเกตและปล่อยให้อยู่ในสภาวะจำลองของช่องปากอย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้วงแหวนยางมีการสูญเสียแรงก่อนที่จะทำการวัดขนาดแรงเสียดทาน เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความใกล้เคียงกับการนำไปใช้ในทางคลินิกมากที่สุดต่อไป
3. ในการมัดลวดเข้ากับแบร็กเกตด้วยวงแหวนยาง เมื่อลวดมีขนาดใหญ่ขึ้นย่อมทำให้วงแหวนยางถูกยืดออกมากขึ้น ซึ่งอาจจะมีผลให้แรงกดที่เกิดจากวงแหวนยางไม่เท่ากัน ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรจะมีการวัดแรงกดที่เกิดการมัดด้วยวงแหวนยางว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ แล้วถ้าต่างก็ควรที่จะใช้วิธีการอื่นที่สามารถควบคุมแรงกดในการมัดได้เท่ากันทุกครั้ง และควรศึกษาว่าวงแหวนยางมีผลทำให้ค่าแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ เพื่อให้ได้วิธีวิจัยที่มีประสิทธิภาพที่สุด
4. งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยการจำลองการดึงลวดให้เคลื่อนผ่านไปตามร่องแบร็กเกต ซึ่งในความเป็นจริงการเคลื่อนฟันเขี้ยวจะต้องเป็นการเคลื่อนแบร็กเกตไปตามลวดโค้ง แต่ด้วยเครื่องมือที่วิจัยมีข้อจำกัดในการที่จะนำส่วนที่เป็นเครื่องตั้งมุมไปติดกับส่วนครอสเฮด ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปควรที่จะออกแบบเครื่องมือให้มีการจำลองการเคลื่อนให้เหมือนกับในช่องปาก และควรใช้เครื่องมือที่มีความสามารถในการวัดค่าได้ละเอียดมากกว่านี้ในหน่วยที่เป็นกรัมโดยไม่ต้องมีการแปลงหน่วย

5. การวิจัยที่ทำการดึงลวดผ่านไปตามร่องแบรกกเกต และการดึงแบรกกเกตให้เคลื่อนไปบนลวดอาจจะมีหรือไม่มีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่วัดได้ก็เป็นได้ ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาถึงผลของการทำการทดลองที่ต่างกัันดังกล่าวว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่
6. จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น พบว่าขนาดลวดและขนาดมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตไม่สามารถใช้ทำนายขนาดแรงเสียดทานได้แม่นยำเพียงพอ ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรที่จะศึกษาเพิ่มถึงปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อแรงเสียดทาน ซึ่งจะช่วยให้สมการการทำนายแรงเสียดทานมีความสมบูรณ์มากขึ้นและสามารถนำมาใช้ทำนายได้จริงต่อไป
7. เนื่องจากพบว่าเมื่อขนาดของลวดและมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบรกกเกตเปลี่ยนแปลงไปมีผลทำให้ค่าแรงเสียดทานเปลี่ยน ดังนั้นแรงปริมาณน้อยที่สุดที่ให้เพื่อที่จะเคลื่อนฟันในกลวิธีการเลื่อนไกลต้องมากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้
8. ในการเคลื่อนฟันเพื่อการจัดฟัน นอกจากจะต้องคำนึงถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นแล้ว สิ่งสำคัญที่สุดที่ต้องตระหนักถึงคือ คุณภาพในการเคลื่อนฟัน ซึ่งการเคลื่อนฟันที่มีคุณภาพนั้น ฟันจะต้องถูกเคลื่อนไปในทิศทางและลักษณะที่ต้องการ โดยไม่มีการบิดหมุนหรือล้มเอียงของฟัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ก่อเกียรติ บุญชูสกุล และ เมธี หมั่นทำการ. 2541. กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตยศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วัชรระ เพชรคุปต์ และ ปิยารัตน์ อภิวัฒน์กุล. 2542. การทำนายผลความกว้างของฟันเขี้ยว ฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่ง และฟันกรามน้อยซี่ที่สองจากเด็กไทยอายุ 13-15 ปี. วารสารทันตแพทยศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 22: 167-175.
- สมศักดิ์ คำปลิว. 2527. กลศาสตร์วิศวกรรมภาคสถิตยศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: เทพรัตน์การพิมพ์.

ภาษาอังกฤษ

- Andreasen, G. F., and Quevedo, F. R. 1970. Evaluation of frictional forces in the 0.022x0.028 edgewise bracket in vitro. J Biomech 3: 151-160. (cited by Nanda and Ghosh, 1997)
- Angolkar, P. V., et al. 1990. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. Am J Orthod Dentofac Orthop 98: 499-506.
- Articolo, L. C., and Kusy, R. P. 1999. Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances. Am J Orthod Dentofac Orthop 115: 39-51.
- Baker, K. L., et al. 1987. Frictional changes in force values caused by saliva substitution. Am J Orthod Dentofac Orthop 91: 316-320.
- Bazakidou, E., et al. 1997. Evaluation of frictional resistance in esthetic brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 112: 449-506.
- Bednar, J. R., Gruendeman, G. W., and Sandrik, J. L. 1991. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and archwires. Am J Orthod Dentofac Orthop 100: 513-522.
- Berger, J. L. 1990. The influence of the SPEED bracket's self-ligating design on force levels in tooth movement: a comparative in vitro study. Am J Orthod Dentofac Orthop 97: 219-228.

- Bishara, L. E., and Andreasen, G. F. 1970. A comparison of time related forces between plastic Alastiks and latex elastics. Angle Orthod 40: 319-328.
- Brantley, W. A., and Eliades, T. 2001. Orthodontic materials scientific and clinical aspects. Stuttgart: Aprinta.
- Braun, S., et al. 1999. Friction in perspective. Am J Orthod Dentofac Orthop 115: 619-627.
- Chaconas, S. J., Caputo, A. A., and Harvey, K. 1984. Orthodontic force characteristics of open coil springs. Am J Orthod 85: 494-497.
- De Franco, D. J., Spiller, R. E., and von Fraunhofer, J. A. 1994. Frictional resistances using Teflon-coated ligatures with various bracket-archwire combinations. Angle Orthod 65: 63-74.
- Dickson, J. A. S., Jones, S. P., and Davies, E. H. 1994. A comparison of the frictional characteristics of five initial alignment wires and stainless steel brackets at three bracket to wire angulations – an in vitro study. Br J Orthod 21: 15-22.
- Downing, A., McCabe, J., and Gordon, P. 1994. A study of frictional forces between orthodontic brackets and archwires. Br J Orthod 21: 349-357.
- Drescher, D., Bourquel, C., and Schumacher, H. 1989. Frictional forces between bracket and arch wire. Am J Orthod Dentofac Orthop 96: 397-404.
- Edwards, G. D., Davies, D. H., and Jones, S. P. 1995. The ex vivo effect of ligation technique on the static resistance of stainless steel brackets and archwires. Br J Orthod 22: 145-153.
- Echols, P. M. 1975. Elastic ligatures: Binding forces and anchorage taxation. Am J Orthod 67: 219-220.
- Frank, C. A., and Nikolai, R. J. 1980. A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. Am J Orthod 78: 593-609.
- Fortin, J. N., 1971. Translation of premolars in the dog by controlling the moment-to-force ratio on the crown. Am J Orthod 59: 541-551.
- Garner, L. D., Allai, W. W., and Moore, B. K. 1986. A comparison of frictional forces during simulated canine retraction of a continuous edgewise arch wire. Am J Orthod Dentofac Orthop 90: 190-203.

- Hershey, H. G., and Reynolds, W. G. 1975. The plastic module as an orthodontic tooth-moving mechanism. Am J Orthod 67: 554-562.
- Ireland, A. J., Sherriff, M., and McDonald, F. 1991. Effect of bracket and wire composition on frictional forces. Eur J Orthod 13: 322-328.
- Kang, B. S., et al. 2003. Three-dimensional relationship between the critical contact angle and the torque angle. Am J Orthod Dentofac Orthop 123: 64-73.
- Kapila, S., et al. 1990. Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. Am J Orthod Dentofac Orthop 98: 117-126.
- Kusy, R. P., et al. 1988. Surface roughness of orthodontic archwires via laser spectroscopy. Angle Orthod 58: 33-45.
- Kusy, R. P., and Whitley, J. Q. 1990. Effects of surface roughness on the coefficients of friction in modil orthodontic systems. J Biomech 9: 913-925.
- Kusy, R. P., Whitley, J. Q., and Prewitt, M. J. 1991. Comparison of the frictional coefficients for selected archwire-bracket slot combinations in the dry and wet states. Angle Orthod 61: 293-302.
- Kusy, R. P., and Whitley, J. Q. 1999. Assessment of second-order clearances between orthodontic archwires and bracket slots via the critical contact angle for binding. Angle Orthod 69: 71-80.
- Kusy, R. P., and O'Grady, P. W. 2000. Evaluation of titanium brackets for orthodontic treatment: Part II – The active configuration. Am J Orthod Dentofac Orthop 118: 675-684.
- Lee, S. H., and Chang, Y. I. 2001. Effects of recycling on the mechanical properties and the surface topography of nickel-titanium alloy wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 120: 654-663.
- Matasa, C. G. 1996. Bracket angulation as a function of its length in the canine distal movement. Am J Orthod 110: 178-184.
- McLean, W.G., and Nelson, E. W. 1962. Schaum's outline of theory and problems of engineering mechanics statics and dynamics. 2 nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Meling, T. R., and Odegaard, J. 1998. The effect of second-order couple on the application of torque. Am J Orthod Dentofac Orthop 113: 256-262.

- Michelberger, D. J., et al. 2000. The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. Am J Orthod Dentofac Orthop 118: 662-674.
- Nanda, R. S., and Ghosh, J. 1997. Biomechanics in clinical orthodontics. Philadelphia: W. B. Saunders.
- Ogata, R. H., et al. 1994. Frictional resistances in stainless steel bracket-wire combinations with effects of vertical deflections. Am J Orthod Dentofac Orthop (cited by Nanda and Ghosh, 1997)
- Omana, H. M., Moore, R. N., and Bagby, M. D. 1992. Frictional properties of metal and ceramic brackets. J Clin Orthod 26: 425-432.
- Peterson, L., et al. 1982. A comparison of friction resistance for Nitinol and stainless steel wire in edgewise brackets. Quint Inter Digest 5: 563-571.
- Pratten, D. H., et al. 1990. Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 98: 398-403.
- Proffit, W. R., et al. 2000. Contemporary orthodontics, 2 nd ed. St. Louis: Mosby.
- Prososki, R. P., Bagby, M. D., and Erickson, L.C. 1991. Static frictional force and surface roughness of nickel-titanium arch wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 100: 341-348.
- Riley, J. L., Garrett, S. G. and Moon, P. C. 1979. Frictional forces of ligated plastic and metal edgewise brackets. J Dent Res 58: A21. (cited by Nanda and Ghosh, 1997)
- Rock, W. P., and Wilson, H. J. 1989. The effect of bracket type and ligation method upon forces exerted by orthodontic archwires. Br J Orthod 16: 213-217.
- Saunders, C. R., and Kusy, R. P. 1994. Surface topography and frictional characteristics of ceramic brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 106: 605-614.
- Stannard, J. G., Gau, J. M., and Hanna, M. 1986. Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. Am J Orthod 89: 485-491.
- Tanne, K., Sakuda, M., and Burstone, C. J. 1987. Three-dimensional finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces. Am J Orthod Dentofac Orthop 92: 499-505.
- Tanne, K., Koenig, H. A., and Burstone, C. J. 1988. Moment to force ratios and the center of rotation. Am J Orthod Dentofac Orthop 94: 426-431.

- Tanne, K., et al. 1991. Patterns of initial tooth displacements associated with various root lengths and alveolar bone heights. Am J Orthod Dentofac Orthop 100: 66-71.
- Tanne, K., et al. 1991. Wire friction from ceramic brackets during simulated canine retraction. Angle Orthod 61: 285-290.
- Thorstenson, G. A., and Kusy, R. P. 2001. Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet (saliva) states. Am J Orthod Dentofac Orthop 120: 361-370.
- Thorstenson, G. A., and Kusy, R. P. 2002. Comparison of resistance to sliding between different self-ligating brackets with second-order angulation in the dry and saliva states. Am J Orthod Dentofac Orthop 121: 472-482.
- Thorstenson, G. A., and Kusy, R. P. 2002. Effect of archwire size and material on the resistance to sliding of self-ligating brackets with second-order angulation in the dry state. Am J Orthod Dentofac Orthop 122: 295-305.
- Thorstenson, G. A., and Kusy, R. P. 2003. Effects of ligation type and method on the resistance to sliding of novel orthodontic brackets with second-order angulation in the dry and wet states. Angle Orthod 73: 418-430.
- Tidy, D. C. 1989. Frictional forces in fixed appliances. Am J Orthod Dentofac Orthop 96: 249-254.
- Tselepis, M., Brockhurst, P., and West, B. C. 1994. Frictional resistance between brackets and archwires. Am J Orthod Dentofac Orthop 106: 131-138.
- Tselepis, M., Brockhurst, P. and West, V. C. 1994. The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 106: 131-138.
- Vanden Bulcke, M. M., et al. 1986. The center of resistance of anterior teeth during intrusion using the laser reflection technique and holographic interferometry. Am J Orthod Dentofac Orthop 90: 211-220.
- Vanden Bulcke, M. M., et al. 1987. Location of centers of resistance for teeth during intrusion using the laser reflection technique. Am J Orthod Dentofac Orthop 91: 375-384.
- Vaughan, J. L., et al. 1995. Relative kinetic frictional forces between sintered stainless steel brackets and orthodontic wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 107: 20-27.

Willems, G., et al. 2001. Frictional behavior of stainless steel bracket-wire combinations subjected to small oscillating displacements. Am J Orthod Dentofac Orthop 120: 371-377.

Webb, R. I., Caputo, A. A., and Chaconas, S. J. 1978. Orthodontic force production by closed coil springs. Am J Orthod 74: 405-409.

Zufall, S. W., and Kusy, R. P. 2000. Sliding mechanics of coated composite wires and the development of an engineering model for binding. Angle Orthod 70: 34-47.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 19 แสดงการทดสอบความเป็นปกติของการแจกแจงปริมาณแรงเสียดทานสถิต และแรงเสียดทานจลน์ที่วัดได้ (normality test) ด้วย Kolmogorov-Smirnov

ขนาดลด (นิ้ว)	มุมกระทำ (องศา)	Kolmogorov-Smirnov		
		แรงเสียดทานสถิต	แรงเสียดทานจลน์	
0.016	0	0.449	0.688	
	1	0.993	0.958	
	2	0.754	0.767	
	3	0.981	0.729	
	4	0.758	0.678	
	6	0.622	0.754	
	8	0.730	0.646	
	10	0.975	0.998	
	0.018	0	0.477	0.968
		1	0.982	0.946
2		0.957	0.968	
3		0.511	0.679	
4		0.565	0.923	
6		0.919	0.609	
8		0.679	0.754	
10		0.825	0.997	

ตารางที่ 19 (ต่อ)

ขนาดลวด (นิ้ว)	มุมกระทำ (องศา)	Kolmogorov-Smirnov		
		แรงเสียดทานสถิต	แรงเสียดทานจลน์	
0.016x0.016	0	0.462	0.365	
	1	0.838	0.989	
	2	0.784	0.965	
	3	0.757	0.787	
	4	0.975	0.873	
	6	0.483	0.608	
	8	0.660	0.899	
	10	0.957	0.882	
	0.016x0.022	0	0.621	0.811
		1	0.445	0.988
2		0.994	0.970	
3		0.882	0.904	
4		0.998	0.962	
6		0.907	0.795	
8		0.785	0.536	
10		0.860	0.797	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 20 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ในลวดทั้ง 4 ขนาด

Test of Homogeneity of Variance

Friction \ Wire	Sig.			
	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
Static	.090	.004	.008	.000
Dynamic	.297	.004	.033	.000

ตารางที่ 21 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016 นิ้ว ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม

0.016 นิ้ว Static (Tukey HSD)

0.016	0	1	2	3	4	6	8	10
0		1.000	.793	.963	.045	.000	.000	.000
1	1.000		.908	.992	.089	.001	.000	.000
2	.878	.990		1.000	.767	.059	.000	.000
3	.760	.959	1.000		.166	.015	.000	.000
4	.070	.229	.760	.878		.842	.026	.000
6	.000	.002	.035	.068	.751		.584	.001
8	.000	.000	.000	.000	.026	.702		.001
10	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.002	

0.016 นิ้ว Dynamic (Tukey HSD)

ตารางที่ 22 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.018 นิ้ว ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม

0.018 นิ้ว Static (Tamhane's T2)

0.018	0	1	2	3	4	6	8	10
0		.871	.407	.003	.000	.000	.000	.000
1	.670		1.000	.481	.100	.000	.000	.000
2	.341	1.000		.986	.685	.000	.000	.000
3	.009	.948	1.000		1.000	.000	.000	.000
4	.000	.412	.869	1.000		.002	.000	.000
6	.000	.00	.000	.001	.004		.015	.000
8	.000	.000	.000	.000	.000	.149		.262
10	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.095	

0.018 นิ้ว Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 23 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016x0.016 นิ้ว² ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกตทั้ง 8 มุม

0.016x0.016 นิ้ว² Static (Tamhane's T2)

0.016x0.016	0	1	2	3	4	6	8	10
0		.845	.185	.130	.000	.000	.000	.000
1	.941		1.000	1.000	.008	.000	.000	.000
2	.309	1.000		1.000	.228	.004	.000	.000
3	.079	.998	1.000		.115	.002	.000	.000
4	.000	.012	.644	.235		.770	.027	.000
6	.000	.000	.010	.001	.650		.903	.000
8	.000	.000	.000	.000	.003	.603		.231
10	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.056	

0.016x0.016 นิ้ว² Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 24 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ในลวดขนาด 0.016x0.022 นิ้ว² ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกตทั้ง 8 มุม

0.016x0.022 นิ้ว² Static (Tamhane's T2)

0.016x0.022	0	1	2	3	4	6	8	10
0		1.000	.058	.000	.000	.000	.000	.000
1	1.000		.022	.000	.000	.000	.000	.000
2	.016	.053		.443	.004	.000	.000	.000
3	.000	.000	.160		.785	.001	.000	.000
4	.000	.000	.003	.928		.424	.000	.000
6	.000	.000	.000	.000	.046		.196	.000
8	.000	.000	.000	.000	.000	.516		.005
10	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.001	

0.016x0.022 นิ้ว² Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 25 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ ในมุมกระทำระหว่างลวดและร่องแปรงเกตทั้ง 8 มุม

Test of Homogeneity of Variance

Degree	Sig.							
	0	1	2	3	4	6	8	10
Friction								
Static	.175	.001	.018	.228	.071	.115	.014	.007
Dynamic	.184	.000	.039	.068	.005	.019	.003	.029

ตารางที่ 26 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 0 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

0 องศา Static (Tukey HSD)

0 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.080	.124
0.016x0.016	.000	.136		.997
0.016x0.022	.000	.711	.685	

0 องศา Dynamic (Tukey HSD)

ตารางที่ 27 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 1 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

1 องศา Static (Tamhane's T2)

1 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.175	.000
0.016x0.016	.000	.177		.209
0.016x0.022	.000	.029	.997	

1 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 28 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 2 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

2 องศา Static (Tamhane's T2)

2 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.345	.508
0.016x0.016	.000	.709		1.000
0.016x0.022	.000	.998	.901	

2 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 29 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 3 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

3 องศา Static (Tukey HSD)

3 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.001	.610
0.016x0.016	.000	.016		.028
0.016x0.022	.000	.703	.000	

3 องศา Dynamic (Tukey HSD)

ตารางที่ 30 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 4 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

4 องศา Static (Tukey HSD)

4 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.235	.961
0.016x0.016	.000	.682		.085
0.016x0.022	.000	.243	.013	

4 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 31 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 6 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

6 องศา Static (Tukey HSD)

6 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.001	.690
0.016x0.016	.000	.029		.028
0.016x0.022	.000	.246	.000	

6 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 32 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 8 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

8 องศา Static (Tamhane's T2)

8 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.001	.354
0.016x0.016	.000	.031		.079
0.016x0.022	.000	.406	.000	

8 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

ตารางที่ 33 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตและค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานจลน์ที่มุมกระทำระหว่างลวดและร่องแบร็กเกต 10 องศา ในลวดทั้ง 4 ขนาด

10 องศา Static (Tamhane's T2)

10 องศา	0.016	0.018	0.016x0.016	0.016x0.022
0.016		.000	.000	.000
0.018	.000		.001	.799
0.016x0.016	.000	.126		.002
0.016x0.022	.000	.090	.000	

10 องศา Dynamic (Tamhane's T2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ผกายพฤทธิ์ สุตังคานุ เกิดวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตรบัณฑิตจากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปีการศึกษา 2541 รับราชการที่โรงพยาบาลวชิรพยาบาลจังหวัดมหาสารคาม 1 ปี แล้วย้ายมารับการราชการที่ โรงพยาบาลสมเด็จพระพุทธเลิศหล้าจังหวัดสมุทรสงครามอีก 1 ปี และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันยังคงรับราชการที่โรงพยาบาลสมเด็จพระพุทธเลิศหล้า อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย