

การเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิม
และลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิด ที่มุมกระทำต่างกัน



นางสาว จินจุฑา ตันติไชยบริบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4211-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARISON OF THE STATIC FRICTIONAL FORCE BETWEEN STAINLESS STEEL
BRACKET AND THREE TYPES OF LOW-FRICTION BETA TITANIUM ALLOY WIRES AT
DIFFERENT SECOND-ORDER ANGULATIONS

Miss Jinjutha Tantichaiboriboon

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Orthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4211-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานสถิตระหว่างเบรกกะทัดรัดเหล็กกล้าไร้
สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิด ที่มุมกระทำ
ต่างกัน

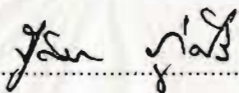
โดย นางสาว จินจุฑา ตันติไชยบริบูรณ์

สาขาวิชา ทันตกรรมจัดฟัน

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ปิยารัตน์ อภิวัฒน์กุล

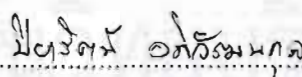
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

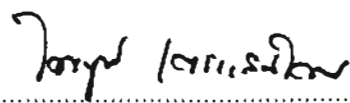

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง รุติมา ภูศิริ)

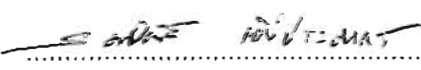
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง พรทิพย์ ชิวขรัตน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ปิยารัตน์ อภิวัฒน์กุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพบูลย์ เตชะเลิศไพศาล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์ สมศักดิ์ เจ็งประภากร)

จินจุทา ดันติไชยบริบูรณ์ : การเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานสถิตระหว่างแปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิด ที่มีมุมกระทำต่างกัน (A COMPARISON OF THE STATIC FRICTIONAL FORCE BETWEEN STAINLESS STEEL BRACKET AND THREE TYPES OF LOW-FRICTION BETA TITANIUM ALLOY WIRES AT DIFFERENT SECOND-ORDER ANGULATIONS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ทพ. วีระ เพชรคุปต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ทพญ. ปิยา รัตน์ อภิวัฒน์กุล, 63 หน้า. ISBN 974-17-4211-8

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความแตกต่างของปริมาณแรงเสียดทานสถิตระหว่างแปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิด รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา

กลุ่มตัวอย่างและวิธีการทดลอง แปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาตรฐานสำหรับฟันเขี้ยว ขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว (mini dyna-lock, 3M Unitek), ลวด 4 ชนิด ขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว ได้แก่ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel, Ormco), ลวดเบต้าทรี 1 (Beta III Titanium Archwire, 3M Unitek), ลวดยัณนีดิว (Colored TMA[®] Honeydew, Ormco), และลวดเบต้าทรี 2 (Nickel-Free Titanium Beta III Archwire, Masel) นำลวดและแปรงเกดเหล่านี้มาทดสอบที่มีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา ประเมินค่าแรงเสียดทานสถิตจากการใช้เครื่องลวดยึดยูนีเวอร์เซลทดสอบมาขึ้น โดยการทดสอบแต่ละครั้งได้มีการเปลี่ยนลวดและแปรงเกดใหม่ทุกครั้ง การทดสอบนี้กระทำที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะแห้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแตกต่างโดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียวและทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (One-Way ANOVA และ Sheffe หรือ Tamhane's T2) ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของแรงเสียดทานสถิตของลวดชนิดต่างๆ เมื่อมีมุมกระทำเดียวกัน และวิเคราะห์โดยใช้สถิติ Independent-Sample T Test ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของแรงเสียดทานสถิตที่มีมุมกระทำต่างกันเมื่อลวดเป็นชนิดเดียวกัน

สรุปผลการวิจัย เมื่อมีมุมกระทำ 0 องศา ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด เมื่อมุมกระทำเป็น 1 องศา พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมยังคงมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตน้อยที่สุด แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับลวดยัณนีดิว และพบว่าลวดยัณนีดิวมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ในลวดทุกชนิด แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 1

ภาควิชา	ทันตกรรมจัดฟัน	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	ทันตกรรมจัดฟัน	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2548	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4776137732 : MAJOR ORTHODONTICS

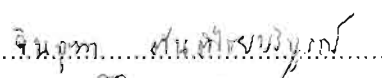
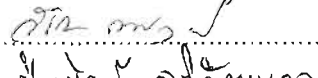
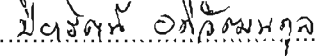
KEY WORD: STATIC FRICTION / CRITICAL ANGLE / LOW-FRICTION BETA TITANIUM ALLOY WIRE / STAINLESS STEEL WIRE / STAINLESS STEEL BRACKET

JINJUTHA TANTICHAIBORIBOON : A COMPARISON OF THE STATIC FRICTIONAL FORCE BETWEEN STAINLESS STEEL BRACKET AND THREE TYPES OF LOW-FRICTION BETA TITANIUM ALLOY WIRES AT DIFFERENT SECOND-ORDER ANGULATIONS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. VACHARA PHETCHARAKUPT, THESIS COADVISOR : ASSOC.PROF. PIYARAT APIVATANAGUL, 63 pp. ISBN: 974-17-4211-8

Objective: To study the difference of static frictional force between stainless steel brackets and 3 types of low-friction beta titanium alloy wires including stainless steel wire at second-order angulations of 0 and 1 degree.

Materials and Methods: Stainless steel brackets with 0.018 inch x 0.025 inch in slot (mini dyna-lock, 3M Unitek) were tested. Four types of orthodontic wire alloys with 0.016 inch x 0.022 inch in dimension were tested: stainless steel (stainless steel, Ormco), Beta III 1 (Beta III Titanium Archwire, 3M Unitek), Honeydew (Colored TMA[®] Honeydew, Ormco), and Beta III 2 (Nickel-Free Titanium Beta III Archwire, Masel). These were tested at second-order angulations of 0 and 1 degree. Static frictional force was evaluated using a Lloyd Universal Testing Machine. Each test was performed with a new bracket-wire sample. All experiments were carried out at room temperature in the dry state. One-Way Analysis of Variance and multiple comparisons with Sheffe or Tamhane's T2 were used for testing the difference of static frictional force of wire types at the same second-order angulations. Independent-Sample T Test was used for testing the difference of static frictional force of 2 second-order angulations in a same wire.

Conclusion: At 0 degree, stainless steel wire had lower static frictional force than 3 types of low-friction beta titanium alloy wires with statistically significant. No significant differences were found among low-friction beta titanium alloy wires. At 1 degree, stainless steel wire still had lowest static frictional force but had no significant differences with honeydew. Honeydew also showed lower static frictional force than Beta III 1 and Beta III 2 with statistically significant. The static frictional force increased when the second-order angulations were increased to 1 degree. However, there are significant differences of static frictional force only stainless steel wire and Beta III 1.

Department / Program	Orthodontics	Student's signature..... 
Field of study	Orthodontics	Advisor's signature..... 
Academic year	2005	Co-advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์
ทันตแพทย์ วัชระ เพชรคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง
ปิยารัตน์ อภิวัดมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้ให้กำลังใจ คำแนะนำและข้อคิด
เห็นต่างๆ รวมทั้งการเขียน และการแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอกราบ
ขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพบุลย์ เตชะเลิศไพศาล และอาจารย์
ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ให้คำปรึกษาด้านสถิติที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย การ
เขียน และแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบริษัททันต-สยาม วิสาหกิจ จำกัด สำหรับแบร็กเกต และลวดเบต้าทรี 1

ขอขอบคุณบริษัทแอดคอร์ดคอร์ปอเรชั่น จำกัด สำหรับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดฮันนี่ดีว
และวงแหวนยาง

ขอขอบคุณ คุณอนุชาต ศรีจันบาล และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ที่ให้คำแนะนำ
และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องลดยด์ยูนิเวอร์เซลเทสติงมาซึน

ขอขอบคุณ คุณพุทธพร แสงรัตนเดช ซึ่งให้กำลังใจและความช่วยเหลือมาตลอดในการทำ
วิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ท้ายนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งท่านได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย
เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
สมมติฐานการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
ข้อตกลงเบื้องต้น	5
ข้อจำกัดของการวิจัย	5
คำสำคัญ.....	6
คำจำกัดความ.....	6
บทที่ 2 วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง.....	7
แรงเสียดทานในทางทันตกรรมจัดฟัน (Friction in Orthodontics).....	7
ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟัน	9
ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factors)	9
ลวด (Archwire).....	9
การมัดลวดกับแบรacket (Ligation of archwire to bracket).....	10
แบรacket (Bracket).....	10
ลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน (Orthodontic appliances)	10
ปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factors)	10
น้ำลาย (Saliva)	10
คราบจุลินทรีย์และแผ่นฟิล์มน้ำลาย (Plaque and acquired pellicle)	10
ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factors)	11
ผลของลวดต่อแรงเสียดทาน (Effect of orthodontic archwires on friction)	11

ชนิดของโลหะที่นำมาผลิตลวดและลักษณะพื้นผิว (Wire alloy and surface texture)	11
ขนาดลวด (Wire size).....	12
ความแข็งตึงของลวด (Wire stiffness)	13
ผลของการมัดลวดกับแบรacketต่อแรงเสียดทาน (Effect of ligation technique on friction).....	14
วัสดุที่ใช้มัดลวดกับแบรacket (Ligature materials).....	14
วิธีในการมัดลวดกับแบรacket (Method of ligation).....	15
ผลของแบรacketต่อแรงเสียดทาน (Effect of bracket on friction)	16
ชนิดของแบรacketและกระบวนการผลิตแบรacket (Bracket materials and manufacturing process)	16
ความกว้างและความลึกของร่องแบรacket (Slot width and depth).....	18
รูปแบบของแบรacket (Bracket design)	18
ความกว้างของแบรacketและระยะห่างระหว่างแบรacket (Bracket width and Interbracket distance)	19
ลักษณะของแบรacket (Bracket prescription).....	19
ผลของลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันต่อแรงเสียดทาน (Effect of orthodontic appliances on friction)	20
ระยะห่างระหว่างแบรacket (Interbracket distance)	20
ระดับของร่องแบรacketระหว่างฟันข้างเคียง (Level of bracket slots between adjacent teeth)	20
แรงที่ใช้ในการถอยฟัน (Forces applied for retraction).....	21
ปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factors)	22
ผลของน้ำลายต่อแรงเสียดทาน (Effect of saliva on friction)	22
ผลของคราบจุลินทรีย์และแผ่นฟิล์มน้ำลายต่อแรงเสียดทาน (Effect of plaque and acquired pellicle on friction)	23
การลดแรงเสียดทานโดยการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าทางเคมี (Improving friction through surface chemistry)	23
การฝังด้วยไอออน (Ion implantation).....	23
กระบวนการพลาสมาเสริมด้วยสารพอลิเอทิลีน (Plasma-Enhanced Polyethylene, PEP).....	26

การเคลือบด้วยสารดีแอลซี (Diamond-like Carbon, DLC).....	27
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	28
ประชากร.....	28
กลุ่มตัวอย่าง.....	28
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	29
การรวบรวมข้อมูล	34
ตัวแปรของการวิจัย.....	35
วิธีการทดลอง	35
การวิเคราะห์ข้อมูล	40
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	48
อภิปรายผลการวิจัย.....	48
สรุปผลการวิจัย	51
ข้อเสนอแนะ	51
รายการอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	58
การวิเคราะห์ข้อมูล	59
การหาค่ามุลิกฤต	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	63

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ค่าน้อยที่สุด (minimum, min) ค่ากลาง (median) และค่ามากที่สุด (maximum, max) ของแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 องศา 41	41
ตารางที่ 2	ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ค่าน้อยที่สุด (minimum, min) ค่ากลาง (median) และค่ามากที่สุด (maximum, max) ของแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 1 องศา 42	42
ตารางที่ 3	ผลการวิเคราะห์การแจกแจงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตด้วยสถิติ One-Sample Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05..... 44	44
ตารางที่ 4	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดีว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 องศา โดยวิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparisons) ด้วยสถิติ Tamhane's T2 ... 45	45
ตารางที่ 5	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดีว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 1 องศา โดยวิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparisons) ด้วยสถิติ Scheffe..... 45	45
ตารางที่ 6	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 และ 1 องศา 46	46
ตารางที่ 7	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 1 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 และ 1 องศา..... 46	46
ตารางที่ 8	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดฮันนี่ดีว เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 และ 1 องศา..... 47	47

ตารางที่ 9	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่าง แปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	47
ตารางที่ 10	ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่าง ลวดและแปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	59
ตารางที่ 11	ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 1 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	59
ตารางที่ 12	ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดฮันนี่ดิว เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	59
ตารางที่ 13	ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและ แปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	59
ตารางที่ 14	การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตใน ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดิว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุม กระทำระหว่างลวดและแปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา.....	60
ตารางที่ 15	ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิต เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกดเป็น 0 และ 1 องศา ในลวดแต่ละชนิด.....	60

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ลำดับการเคลื่อนฟันเขี้ยว.....	8
รูปที่ 2 ระยะเวลาต่างๆ ในการเคลื่อนฟันตามการอธิบายของ Drescher และคณะ	9
รูปที่ 3 การยื่นยาวของฟันตัดหน้าที่เป็นผลมาจากการล้มเอียงของฟันเขี้ยวระหว่างที่ทำการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปบนลวดโค้งที่มีความแข็งตึงน้อย.....	13
รูปที่ 4 การต้านทานการเลื่อนไถลของลวด 4 ชนิดเมื่อมีมุมกระทำมากกว่า θ_c	14
รูปที่ 5 การมัดยางแบบธรรมดาและแบบเลขแปด.....	15
รูปที่ 6 ตัวอย่างแบรกเกตชนิดมัดในตัวเอง	16
รูปที่ 7 การต้านการเคลื่อนที่ลดลงเมื่อขนาดร่องแบรกเกตเพิ่มขึ้น	18
รูปที่ 8 แบรกเกตชนิดที่มี 6 ปีก.....	19
รูปที่ 9 พาวเวอร์อาร์ม	21
รูปที่ 10 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดแรงคู่ควบ	21
รูปที่ 11 คู่สูญญากาศที่มีก๊าซไอออนที่จะแทรกซึมเข้าสู่ลวด.....	24
รูปที่ 12 แรงเสียดทานของลวดชนิดต่างๆ.....	25
รูปที่ 13 ยางโพลียูรีเทนสีเทา.....	29
รูปที่ 14 แมทริวไฮลเดอร์	30
รูปที่ 15 เอ็กซ์พลอเรอร์.....	30
รูปที่ 16 เครื่องมือสำหรับยึดแบรกเกตให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแห่งอะคริลิกเท่ากันทุกครั้ง	30
รูปที่ 17 เครื่องมือสำหรับปรับแบรกเกตให้ได้มุมกระทำเป็นศูนย์และหนึ่งองศา.....	31
รูปที่ 18 เครื่องมือสำหรับยึดแห่งอะคริลิกกับครอสเสดของเครื่องลอยด์ยูนิเวอร์เซลเทสติงมาชีนให้อยู่ในแนวตั้ง.....	31
รูปที่ 19 เครื่องมือสำหรับยึดลวด.....	32
รูปที่ 20 แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดสีส้มที่ใช้ในการกำหนดฐานเครื่องมือสำหรับยึดลวดให้อยู่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง	32
รูปที่ 21 เครื่องลอยด์ยูนิเวอร์เซลเทสติงมาชีน.....	33
รูปที่ 22 เครื่องมือขณะทำการทดลอง	34
รูปที่ 23 การขีดเส้นบนแห่งอะคริลิกด้านละ 10 มิลลิเมตร	35
รูปที่ 24 แห่งอะคริลิกที่ติดแบรกเกตแล้ว	35

รูปที่ 25	แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นเล็กที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งเซนเซอร์เพื่อให้ได้ตำแหน่ง เริ่มแรกเหมือนเดิมทุกครั้งที่ทดลอง	37
รูปที่ 26	การกำหนดตำแหน่งที่ใช้ยึดลวด	38
รูปที่ 27	การยึดลวดกับเครื่องมือสำหรับยึดลวดโดยติดเทปกาวใส และไขววงแหวนโลหะ	39
รูปที่ 28	กราฟแท่งอธิบายค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม	42
รูปที่ 29	กราฟแท่งอธิบายค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตที่มุมกระทำ 0 และ 1 องศา	43
รูปที่ 30	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดลวด ร่องแบริกเกต ความกว้างของแบริกเกตในแนว ใกล้กลาง-ไกลกลาง และมุม θ_c	61



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงเสียดทานเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่เมื่อวัตถุชนิดหนึ่งเคลื่อนผ่านไปยังวัตถุอีกชนิดหนึ่ง โดยแรงเสียดทานนี้เกิดระหว่างวัตถุ 2 ชนิด ที่สัมผัสกัน และมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ แรงเสียดทานมี 2 ประเภท ได้แก่ แรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ โดยแรงเสียดทานสถิตคือ แรงจำเป็นที่น้อยที่สุดที่ทำให้วัตถุที่หยุดนิ่งเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ ส่วนแรงเสียดทานจลน์คือ แรงต้านการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล (Sliding motion) ของวัตถุหนึ่งไปบนอีกวัตถุหนึ่งซึ่งเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ (1-5)

แรงเสียดทานเป็นผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Coefficient of friction) กับแรงปกติ (Normal force)

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเป็นค่าคงที่ซึ่งอยู่ระหว่าง 0 - 1 และเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานอาจขึ้นอยู่กับความหยาบสัมพัทธ์ (Relative roughness) ของพื้นผิวที่สัมผัสกัน ลักษณะของพื้นผิว และความแข็งของพื้นผิว

แรงปกติ คือ แรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวที่สัมผัสกัน โดยอาจจะตั้งฉากกับพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่ง หรือ ทั้งสองพื้นผิว (4, 5)

การเคลื่อนที่ทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อปิดช่องว่างมี 2 วิธี (6)

1. การเคลื่อนที่แบบเซกเมนต์ (Segmental หรือ Sectional mechanic) การเคลื่อนที่ด้วยวิธีนี้จะมีการใช้โคลสซึ่งรูปชนิดต่างๆ (Closing loops) ฟันจะเคลื่อนไปตามลูปที่ถูกแอกติเวท (Activated) ซึ่งระบบแรงนี้เราสามารถออกแบบให้เกิดอัตราที่แรงกระทำต่อฟันต่ำ (Low load-deflection rate) และสามารถควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงและโมเมนต์ได้ (Moment-force ratio)
2. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล (Sliding mechanic) วิธีนี้แบรเกตจะเคลื่อนไปตามลวดหรือ ลวดเคลื่อนไถลผ่านแบรเกตหรือท่อ (Tube)

ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันระหว่างการเคลื่อนที่ทั้ง 2 วิธี คือ แรงเสียดทาน เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบเซกเมนต์จะไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างแบรเกตและลวด ซึ่งเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบไร้แรงเสียดทาน (Friction-free หรือ frictionless technique) แต่วิธีการนี้จะทำให้

เกิดการหมุนของฟันที่ไม่ต้องการทั้งในระนาบหน้าหลังและระนาบขวาง (Sagittal and transverse planes) ซึ่งทำให้มีความจำเป็นต้องปรับระดับฟันเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม แรงเสียดทานมีบทบาทสำคัญในการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไถล ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้การเคลื่อนฟันช้าลง และต้องการหลักยึด (Anchorage) ที่เพิ่มขึ้น แต่ฟันจะถูกเคลื่อนไปตามลวดทำให้ลดปัญหาการหมุนของฟันที่ไม่ต้องการ (3) โดยแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟันจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเสียดทาน ดังนั้นปริมาณแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นต้องถูกควบคุมให้น้อยที่สุดเพื่อสามารถให้แรงที่เหมาะสม (Optimal force) ในการเคลื่อนฟันได้ (5, 7)

ปริมาณแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความกว้างของร่องแบรคเกต ระยะห่างระหว่างแบรคเกต ระยะห่างระหว่างแบรคเกตและลวด รูปร่างและขนาดของลวด มุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกต (Bracket/ wire angulation) ชนิดของวัสดุที่ใช้ และขนาดแรงในการมัดฟัน ลักษณะพื้นผิวของลวดและร่องแบรคเกต และวัสดุที่ใช้ผลิตลวดและแบรคเกต (8, 9)

จากหลายการศึกษาพบว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดน้อยที่สุด ขณะที่ลวดเบต้าไทเทเนียมและแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด (1-3, 10)

อย่างไรก็ตาม ลวดเบต้าไทเทเนียมมีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่างซึ่งเหนือกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น การให้แรงที่น้อยกว่าเนื่องจากมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้สามารถใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่กว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ให้แรงที่เท่ากัน หรือน้อยกว่า จึงสามารถควบคุมแรงบิดหมุน (Torque) ได้ นอกจากนี้ลวดเบต้าไทเทเนียมยังมีอัตราการคืนกลับของลวดหลังจากที่แอคติเวทแล้วมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (Springback, YS/E) ทำให้สามารถเพิ่มระยะการทำงานสำหรับการเคลื่อนฟัน หมายถึงสามารถแอคติเวทลวดได้ในระยะที่มากกว่าโดยที่ไม่ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร อีกทั้งยังให้แรงที่นุ่มนวล สม่่าเสมอ และคงที่ นอกจากนี้ ลวดเบต้าไทเทเนียมยังสามารถถูกดัดให้เป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย (Formability) เช่น รูปส่วนโค้งขากรรไกร (Arch form) และการดัดรูปแบบต่างๆ และสามารถเชื่อมกับโลหะได้ (Weldability) และเนื่องจากลวดเบต้าไทเทเนียมไม่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบทำให้มีคุณสมบัติเข้ากับเนื้อเยื่อร่างกายได้ดี (Biocompatibility) (11-14)

ตามที่ได้กล่าวข้างต้น ลวดเบต้าไทเทเนียมมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ยกเว้นเรื่องแรงเสียดทาน ทำให้มีความพยายามที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของลวดเบต้าไทเทเนียมให้มีแรงเสียดทานที่ต่ำลง วิธีการฝังด้วยไอออน (Ion implantation) เป็นขบวนการหนึ่งปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องแรงเสียดทานโดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลอื่นๆ ที่ต้องการเสียไป วิธีนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบที่ผิวหน้าลวด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดลวด และไม่เกิดการแยกออกเป็นชั้นๆ เหมือนกับวิธีการเคลือบผิวลวด การฝังด้วยไอออนทำให้ลวดมีผิวหน้าที่มีแรงกด (Compressive

forces) มากขึ้น และเพิ่มความแข็ง (Hardness) ที่ผิวหน้าลวดทำให้ลวดสามารถทนต่อการล้าและการหัก (Fatigue และ fracture) อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดรอยที่ผิวหน้าลวดได้ และที่สำคัญคือลดค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานได้ในระดับเดียวกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีความจำเป็นในการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไถล (14) การขัดตกแต่งผิวหน้า (Polished surface finish) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ปรับปรุงลักษณะพื้นผิวของลวดเบต้าไทเทเนียมให้เรียบขึ้น ซึ่งเชื่อว่าสามารถลดขนาดแรงเสียดทานได้

ในปัจจุบันได้มีการผลิตลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีการปรับปรุงลักษณะผิวหน้าลวดให้มีแรงเสียดทานต่ำด้วยวิธีการฝังด้วยไอออน และการขัดตกแต่งผิวหน้า ซึ่งลวดเบต้าไทเทเนียมที่ถูกปรับปรุงให้มีแรงเสียดทานต่ำมีอยู่หลายชนิด แต่ยังไม่มีการศึกษาว่าลวดเบต้าไทเทเนียมชนิดใดที่มีแรงเสียดทานต่ำที่สุด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงศึกษาถึงปริมาณแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำชนิดต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงลวดที่มีแรงเสียดทานต่ำที่สุดเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไถล ซึ่งพบอยู่ในการเคลื่อนฟันเกือบทุกชนิด เช่น การเคลื่อนฟันซี่ชั่วคราว รวมถึงการปรับระดับฟัน และการแก้ไขการหมุนของฟันซึ่งแบรกกเกตจะเคลื่อนผ่านเส้นลวดไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงขนาดของแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิดที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีขนาดเดียวกัน ในขณะที่มุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็นศูนย์กลางและที่มุมวิกฤต
2. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ 3 ชนิดดังกล่าว รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเท่ากัน
3. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแรงเสียดทานสถิตเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็นศูนย์กลางและที่มุมวิกฤตในลวดชนิดเดียวกัน

สมมติฐานการวิจัย

1. มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 1 คู่ เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเท่ากัน
2. มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตต่างกันในลวดชนิดเดียวกัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปช่วยในการเลือกลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำที่สุดเพื่อให้เกิดการเคลื่อนฟันเกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดและให้แรงขนาดที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟัน โดยที่ไม่ทำอันตรายต่อฟันและเนื้อเยื่อรอบรากฟัน และทำให้สามารถใช้เป็นลวดชนิดเดียวในการรักษาได้ ซึ่งจะช่วยให้ระยะเวลาในการรักษาลดลง
2. เพื่อนำผลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อขนาดแรงเสียดทานโดยใช้ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำที่สุด

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ
2. ทำการศึกษาขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรคเกตและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
3. เป็นการศึกษาในสภาวะแห้งที่อุณหภูมิห้อง
4. มุมระหว่างลวดและร่องแบรคเกตที่ศึกษาเป็นศูนย์องศาและที่มุมวิกฤต
5. ลวดที่ศึกษาเป็นลวดเบต้าไทเทเนียมชนิดที่มีแรงเสียดทานต่ำและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว
6. แบรคเกตที่ใช้ศึกษาเป็นแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับฟันซี่วางชนิดมาตรฐานขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นขนาดเดียวกันซึ่งนำมาจากบริษัทผู้ผลิต 3 บริษัท
2. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการศึกษาเป็นขนาดเดียวกันซึ่งนำมาจากบริษัทผู้ผลิตเพียงบริษัทเดียว
3. แบริกเกตที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับพื้นที่ขั้วขนาดมาตรฐานที่มีขนาดและรูปร่างเหมือนกันหมด ซึ่งนำมาจากบริษัทผู้ผลิตเพียงบริษัทเดียว
4. ยางโฟลียูเรเทนที่ใช้สำหรับมัดลวดกับแบริกเกตเป็นยางชนิดเดียวจากบริษัทผู้ผลิตเพียงบริษัทเดียว
5. ค่าแรงเสียดทานสถิตได้จากการวัดด้วยเครื่องล้อยัตินิวเวอร์เซลเทสติงมาชีน (Lloyd Universal Testing Machine, Model LR 10 K) โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก (load cell) 100 นิวตัน และทำการทดลองดึงด้วยความเร็ว 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที การแปลงผลแรงเสียดทานสถิตทำได้โดยประเมินจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงกับระยะทางที่แบริกเกตเคลื่อนที่ไป เมื่อเส้นกราฟที่เกิดจากแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของเส้นกราฟจุดแรกก่อนที่จะมีการลดลงหรือคงที่ของเส้นกราฟ โดยที่จุดสูงสุดนี้แรงที่อ่านได้คือ ค่าแรงเสียดทานสถิต
6. การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ที่ไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยทางชีวภาพ เช่น น้ำลาย คราบจุลินทรีย์ แรงบิดเคี้ยว เป็นต้น

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. การศึกษาเป็นแบบจำลองในสภาวะแห้งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่เหมือนกับสภาวะจริงในช่องปากซึ่งมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าแรงเสียดทาน
2. การทดลองนี้กำหนดให้มุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตเป็นศูนย์องศา และที่มุมวิกฤต ซึ่งในสภาวะจริงจะเกิดมุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตที่มุมต่างๆ ได้เมื่อพื้นที่การเคลื่อนที่

คำสำคัญ

1. แรงเสียดทานสถิต
2. มุมวิกฤต
3. ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำ
4. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
5. แบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม

คำจำกัดความ

1. แรงเสียดทานสถิต หมายถึง แรงสูงสุดที่ทำให้แบริกเกตเริ่มเคลื่อนที่ผ่านลวด โดยกำหนดจากค่าแรงสูงสุดจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่แบริกเกตเคลื่อนที่ผ่านลวดไป
2. มุมวิกฤต หมายถึง มุมที่ลวดกระทำกับแบริกเกตและเกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบริกเกตที่มุมทะแยง โดยค่ามุมวิกฤตหาได้จากความสัมพันธ์ของขนาดลวดในแนวตั้ง ขนาดร่องแบริกเกตในแนวตั้ง และความกว้างของแบริกเกตในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (15) ดังนี้

$$\theta_c = \frac{57.3(\text{CLEARANCE INDEX})}{(\text{BRACKET INDEX})}$$

โดยที่

$$\text{CLEARANCE INDEX} = 1 - \text{ENGAGEMENT INDEX}$$

$$\text{ENGAGEMENT INDEX} = \text{SIZE/SLOT}$$

$$\text{BRACKET INDEX} = \text{WIDTH/SLOT}$$

SIZE หมายถึง ขนาดลวดในแนวตั้ง

SLOT หมายถึง ขนาดร่องแบริกเกตในแนวตั้ง

WIDTH หมายถึง ความกว้างของแบริกเกตในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง

แทนค่าได้ดังนี้

$$\theta_c = \frac{57.3(1-0.4064/0.4572)}{(2.55/0.4572)}$$

$$= 1.14$$

ดังนั้นได้ค่ามุมวิกฤตประมาณ 1 องศา

บทที่ 2

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

แรงเสียดทานในทางทันตกรรมจัดฟัน (Friction in Orthodontics)

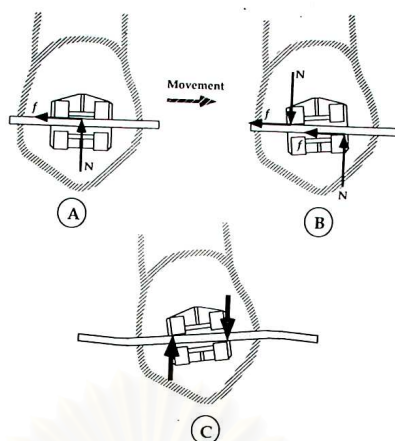
แรงเสียดทานในทางทันตกรรมจัดฟันมีความสำคัญต่อการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไถล เนื่องจากแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันจะต้องมากกว่าแรงเสียดทาน และแรงเสียดทานควรจะมีขนาดที่น้อยเพื่อให้ได้แรงที่เหมาะสม (Optimal force) ในการเคลื่อนฟันโดยไม่ทำอันตรายใดๆ ต่อเนื้อเยื่อรอบรากฟัน (Periapical tissue) และทำให้เกิดการเคลื่อนฟันได้มากที่สุด (6) แรงเสียดทานเป็นแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 อันที่สัมผัสกัน (8) ขณะที่พื้นผิวที่สัมผัสกัน 2 พื้นผิวเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน จะมีแรงเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ แรงเสียดทาน (Frictional force, F) ซึ่งขนานกับแรงในการเลื่อนไถลแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน และ แรงปกติ (Normal force, N) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสและแรงเสียดทาน โดยแรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงปกติ จากสมการ $F = \mu N$ โดยที่ μ = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Coefficient of friction)

แรงเสียดทานแบ่งเป็น 2 ประเภท (1, 3, 8)

1. แรงเสียดทานสถิต (Static frictional force) คือ แรงจำเป็นที่น้อยที่สุดที่ทำให้วัตถุที่หยุดนิ่งเริ่มเกิดการเคลื่อนที่
2. แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic frictional force) คือ แรงต้านการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล (Sliding motion) ของวัตถุหนึ่งไปบนอีกวัตถุหนึ่งซึ่งเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่

Nanda (6) กล่าวว่า ขณะที่มีการเคลื่อนฟันเขี้ยวพบว่าการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างแบรกกेटและลวดเกิดขึ้นในระยะต่างๆ ของการรักษา ดังนั้นขนาดและทิศทางของแรงเสียดทานและแรงปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาต่างๆ ด้วยเหมือนกัน (รูปที่ 1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 ลำดับการเคลื่อนฟันเขี้ยว

A แรงปกติและแรงเสียดทาน

B การล้มเอียงของฟันจนกระทั่งเกิดการสัมผัสกันระหว่างลวดและแบร็กเกตที่มุมทะแยง

C ลวดที่เกิดการงอซึ่งจะให้แรงคู่ควบทำให้เกิดการตั้งฟันที่ล้มเอียง

Drescher และคณะ (3) อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของฟันไปตามลวดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเช่นกัน โดยแบ่งได้เป็น 4 ระยะ

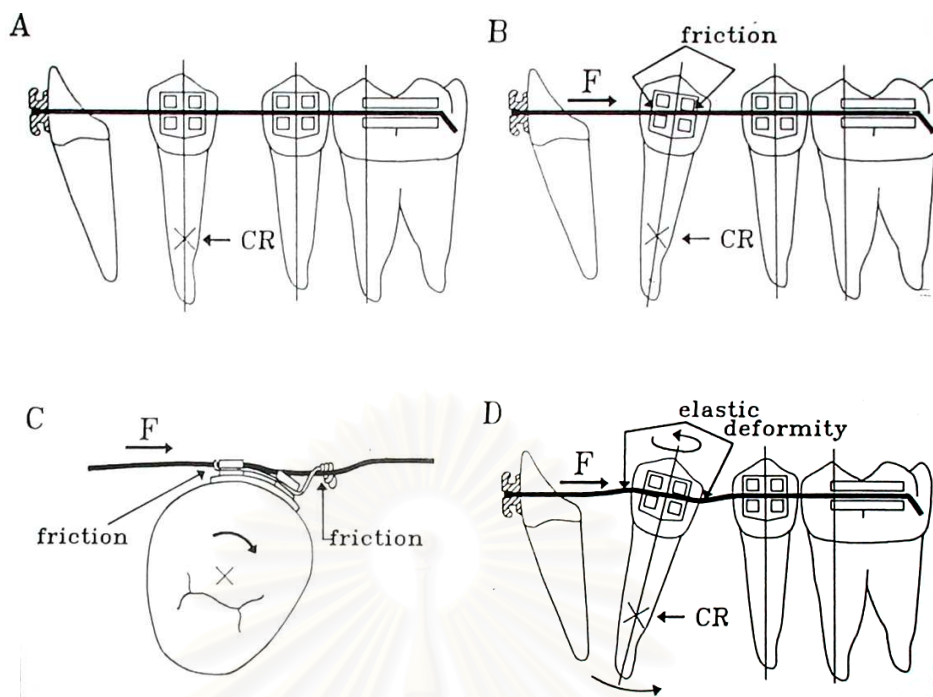
ระยะที่ 1 เป็นระยะก่อนการให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (Mesio-distal) และเป็นระยะที่มีการปรับระดับฟันเรียบร้อยแล้ว โดยลวดจะวางตัวอยู่ในร่องแบร็กเกต (รูปที่ 2, A)

ระยะที่ 2 เมื่อมีการให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ฟันจะมีการล้มเอียง (Tip) และหมุนเนื่องจากแนวแรงอยู่เหนือจุดศูนย์กลางของการต้านทาน (Center of resistance)

(รูปที่ 2, B และ C)

ระยะที่ 3 เมื่อมีการให้แรงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่คืนกลับได้ (Elastic deformity) ของลวด แรงที่จุดสัมผัสระหว่างลวดและแบร็กเกตและแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงที่ให้ในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางจะหมดไป จึงเหลือแรงคู่ควบที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านการล้มเอียง (Antitip) และด้านการหมุน (Antirotation) (รูปที่ 2, D)

ระยะที่ 4 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent deformity) ของลวด ซึ่งควรป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น



รูปที่ 2 ระยะเวลาต่างๆ ในการเคลื่อนฟันตามการอธิบายของ Drescher และคณะ

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเคลื่อนฟันแบบบอดดีลี (Bodily movement) ประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่แบบล้มเอียง (Tipping movement) และการเคลื่อนที่แบบตั้งตรง (Uprighting movement) โดยการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงนั้นทำให้เกิดการเพิ่มแรงเสียดทานจากการยึดติด (Binding) ระหว่างลวดและแบรacketซึ่งด้านการเคลื่อนที่ของฟัน โดยการยึดติดเกิดเมื่อมีจุดสัมผัสระหว่างแบรacket ลวดโค้ง และ/หรือ วัสดุที่ใช้มัดลวดกับแบรacket (Ligatures) ซึ่งทำให้เกิดแรงคู่ควบซึ่งด้านการเลื่อนไถล (2) โดยแรงคู่ควบนี้จะทำให้รากฟันเคลื่อนไปในทิศทางเดียวกับตัวฟันที่ล้มเอียง (Crown tipping) และเกิดการเคลื่อนฟันแบบบอดดีลี

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟัน (6, 8)

ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factors)

ลวด (Archwire)

1. วัสดุ (Material)
2. รูปร่างหน้าตัดและขนาด (Cross-sectional shape and size)

3. ลักษณะพื้นผิว (Surface texture)
4. ความแข็งตึง (Stiffness)

การมัดลวดกับแบรacket (Ligation of archwire to bracket)

1. ลวดที่ใช้มัดลวดกับแบรacket (Ligature wires)
2. ยางที่ใช้มัดลวดกับแบรacket (Elastomerics)
3. วิธีในการมัดลวดกับแบรacket (Method of ligation)

แบรacket (Bracket)

1. วัสดุ (Material)
2. ขบวนการผลิต (Manufacturing process)
3. ความกว้างและความลึกของร่องแบรacket (Slot width and depth)
4. รูปแบบของแบรacket (Bracket design)
5. ความกว้างของแบรacket (Bracket width)
6. ลักษณะของแบรacket (Bracket prescription: First order bend (in-out), Second order bend (angulation), Third order bend (torque))

ลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน (Orthodontic appliances)

1. ระยะห่างระหว่างแบรacket (Interbracket distance)
2. ระดับของร่องแบรacket ระหว่างฟันข้างเคียง (Level of bracket slots between adjacent teeth)
3. แรงที่ใช้ในการถอยฟัน (Forces applied for retraction)

ปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factors)

น้ำลาย (Saliva)

คราบจุลินทรีย์และแผ่นฟิล์มน้ำลาย (Plaque and acquired pellicle)

ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factors)

ผลของลวดต่อแรงเสียดทาน (Effect of orthodontic archwires on friction)

ชนิดของโลหะที่นำมาผลิตลวดและลักษณะพื้นผิว (Wire alloy and surface texture)

โดยทั่วไปลวดที่นำมาใช้ในการทดลองส่วนใหญ่ ได้แก่ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) ลวดโคบอลต์-นิกเกิล-โครเมียม (Co-Cr) ลวดเบต้าไทเทเนียม (β -Ti) และลวดนิกเกิลไทเทเนียม (Ni-Ti) มีหลายการศึกษาที่ได้ผลว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดน้อยที่สุด ขณะที่ลวดเบต้าไทเทเนียมและแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด (1-3, 10, 16-18)

Loftus (5) ทำการทดสอบแรงเสียดทานโดยใช้แบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและเซรามิกที่มีขนาดร่องแบร็กเกต 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว และลวด 3 ชนิด ได้แก่ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดนิกเกิลไทเทเนียม และลวดเบต้าไทเทเนียม ขนาด 0.019 นิ้ว x 0.025 นิ้ว โดยออกแบบการทดลองให้มีการเคลื่อนแบบล้มเอียง (Tipping) และการเคลื่อนแบบหมุน พบว่าลวดเบต้าไทเทเนียมเกิดแรงเสียดทานมากกว่าลวดนิกเกิลไทเทเนียมทั้งในแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและเซรามิก อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างลวดนิกเกิลไทเทเนียมกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และลวดเบต้าไทเทเนียมกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการมีความยืดหยุ่นของลวดทำให้ลดขนาดแรงปกติ (Normal force) ที่กระทำที่จุดสัมผัสระหว่างลวดและแบร็กเกต ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Frank และ Nikolai (4) ที่พบว่าลวดไนตินอล (Nitinol) เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดเนื่องจากความแข็งตึง (stiffness) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อขนาดแรงเสียดทานเมื่อมีมุมกระทำเกิดขึ้นระหว่างลวดและแบร็กเกต

ถึงแม้ว่าการศึกษาข้างต้นจะไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของลวดเบต้าไทเทเนียมกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ขนาดแรงเสียดทานของลวดเบต้าไทเทเนียมก็มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกับการศึกษาอื่นๆ (1-3, 10, 16-18) การที่จะลดขนาดของแรงเสียดทานอาจทำได้โดยวิธีการฝังด้วยไอออนซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบที่ผิวหน้าลวด หรือวิธีการขัดแต่งผิวของลวดเนื่องจากลวดเบต้าไทเทเนียมมีลักษณะผิวที่หยาบ โดยเชื่อว่าพื้นผิวที่เรียบจะลดแรงเสียดทานลงได้

Kusy และคณะ (19) ได้ทำการทดสอบความหยาบของพื้นผิวของลวด (Surface roughness) โดยใช้ Laser spectroscopy พบว่าลวดที่มีความหยาบของพื้นผิวเรียงลำดับจากน้อยที่สุดไปยังมากที่สุด คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโคบอลต์โครเมียม ลวดเบต้าไทเทเนียม

และลวดนิกเกิลไทเทเนียม ตามลำดับ ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าลวดที่มีความหยวบมากจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมาก โดยพบว่าลวดไทเทเนียมมีแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (1-3, 10, 16-18) อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่แสดงว่าความหยวบของพื้นผิวของลวดไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดแรงเสียดทานเนื่องจากพบว่าลวดบางชนิดที่มีพื้นผิวที่หยวบกว่าแต่มีค่าแรงเสียดทานน้อยกว่า (18, 20)

Burstone และ Farzin-Nia (14) เปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ผ่านการทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่ผ่านการฝังด้วยไอออน มีค่าแรงเสียดทานลดลงใกล้เคียงหรือน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขณะที่ Cash และ คณะ (2) พบว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่ผ่านการฝังด้วยไอออนยังคงมีค่าแรงเสียดทานที่มากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และยังได้ผลว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่ผ่านการฝังด้วยไอออนบางชนิด เช่น สีฟ้า สีม่วงน้ำเงิน และสีม่วงแดง (Aqua purple และ violet) มีค่าแรงเสียดทานมากกว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่ไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน

ขนาดลวด (Wire size)

จากหลายการศึกษาพบว่าการเพิ่มขนาดลวดจะทำให้มีค่าแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบร็กเกตเพิ่มขึ้น และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าแรงเสียดทานมากกว่าลวดกลม (16, 21-23)

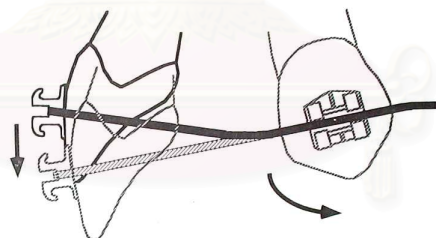
อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาหนึ่งที่พบว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ไม่จำเป็นต้องมีค่าแรงเสียดทานมากเสมอไป Vaughan (16) พบว่าลวดนิกเกิลไทเทเนียมขนาด 0.017 นิ้ว x 0.025 นิ้ว กับแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอร์ (Sintered stainless steel) ขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว และลวดขนาด 0.019 นิ้ว x 0.025 นิ้ว กับร่องแบร็กเกตขนาด 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว ให้ค่าแรงเสียดทานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับลวดกลม และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีขนาดเล็กกว่า ในขณะที่ Kapila (21) ได้ผลตรงข้ามคือลวดนิกเกิลไทเทเนียมขนาด 0.019 นิ้ว x 0.025 นิ้ว กับร่องแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว ทำให้เกิดขนาดแรงเสียดทานมากที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากความกว้างของแบร็กเกตและชนิดของแบร็กเกตที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามพบเฉพาะลวดนิกเกิลไทเทเนียมเท่านั้นที่ขนาดลวดไม่สัมพันธ์กับขนาดแรงเสียดทาน (16, 21)

Frank และ Nikolai (4) พบว่าเมื่อเกิดการยึดติด ลวดกลมจะเกิดการสัมผัสเป็นจุดกับขอบร่องแบร็กเกต ส่วนลวดเหลี่ยมจะมีการสัมผัสเป็นบริเวณที่ใหญ่กว่า ทำให้เกิดแรงปกติขึ้นที่ลวดและแบร็กเกตในลวดกลมมากกว่าลวดเหลี่ยม และอาจทำให้เกิดรอยขึ้นที่ลวดได้ (Indentation) ทำให้ได้ผลการทดลองว่าลวดกลมขนาด 0.020 นิ้ว ให้ขนาดแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหลี่ยมขนาด 0.017 นิ้ว x 0.025 นิ้ว ส่วน Drescher และคณะ (3) พบว่าแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับขนาด

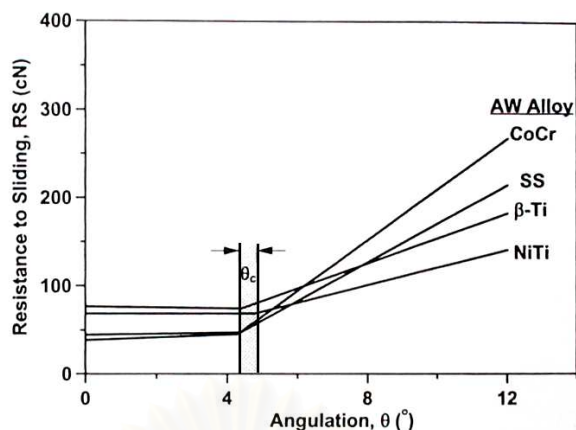
ลวดในแนวดิ่ง (Vertical dimension) ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ที่ลวดเหลี่ยมขนาด 0.017 นิ้ว x 0.025 นิ้ว จะมีค่าแรงเสียดทานที่น้อยกว่าลวดกลมขนาด 0.020 นิ้ว

ความแข็งตึงของลวด (Wire stiffness)

ในระหว่างที่ดึงฟันเขี้ยวไปในช่องว่างที่ถอนฟันกรามน้อย ความแข็งตึงของลวดจะลดลง เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างแบรคเกตกว้าง (Interbracket distance) ดังนั้นแรงที่ใช้ในการดึงฟันเขี้ยวอาจส่งผลให้ลวดเกิดการบิดงอได้ซึ่งทำให้เพิ่มขนาดแรงเสียดทานและเกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบรคเกตได้ง่าย อีกทั้งยังส่งผลให้ฟันเขี้ยวล้มไปทางด้านในไกลกลางทำให้ฟันตัดเคลื่อนตัวลงมายังด้านบดเคี้ยว (extrusion) (รูปที่ 3) จึงควรเพิ่มขนาดลวดเพื่อให้ลวดมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การยึดปลายลวดทั้งสองข้างให้แน่นสามารถเพิ่มความแข็งตึงของลวดได้ถึง 4 เท่า ดังนั้นในขณะที่ดึงฟันเขี้ยวจึงควรมัดลวดที่ฟันตัดข้างและฟันกรามน้อยให้แน่นซึ่งยังทำให้เพิ่มแรงเสียดทานที่ฟันกรามน้อยทำให้ลดการสูญเสียหลักยึดได้ (6) ในทางตรงข้ามการเพิ่มความแข็งตึงของลวดทำให้เพิ่มการยึดติดระหว่างลวดและแบรคเกต ในกรณีที่มีมุมกระทำมากกว่ามุมวิกฤต ($\theta > \theta_c$) และพบว่าลวดนิกเกิลไทเทเนียมทำให้เกิดแรงปกติน้อยที่สุด (24, 25) (รูปที่ 4) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Frank และ Nikolai (4)



รูปที่ 3 การยื่นยาวของฟันตัดหน้าที่เป็นผลมาจากการล้มเอียงของฟันเขี้ยวระหว่างที่ทำการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปบนลวดโค้งที่มีความแข็งตึงน้อย



รูปที่ 4 การต้านทานการเลื่อนไถลของลวด 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำมากกว่า θ_c

ผลของการมัดลวดกับแบร็กเกิดต่อแรงเสียดทาน (Effect of ligation technique on friction)

วัสดุที่ใช้มัดลวดกับแบร็กเกิด (Ligature materials)

การมัดลวดกับแบร็กเกิดจะเกิดแรงปกติซึ่งมีผลต่อแรงเสียดทาน เนื่องจากแรงเสียดทาน (F) เป็นผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (μ) กับแรงปกติ (N) หรือ $F = \mu N$ ดังนั้นวัสดุที่ต่างกันอาจให้แรงปกติที่ไม่เหมือนกัน

วัสดุที่ทำจากยางโพลีเอทิลีนจะเกิดการคลายความเครียด (Stress relaxation) เมื่อเวลาผ่านไปโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในช่องปาก และจะเกิดการคลายความเครียดอย่างรวดเร็วในสองชั่วโมงแรก ซึ่งแรงจะลดลงเกือบครึ่งเมื่อเทียบกับแรงที่ให้เริ่มแรก (26) ดังนั้นในการใช้ยางโพลีเอทิลีนจึงควรยืดยางก่อน (Prestretch) Brantley และคณะ (27) แนะนำว่าควรยืดยางในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้แรงที่สม่ำเสมอ แต่การยืดยางที่อุณหภูมิห้องยังคงเกิดการคลายความเครียดอย่างต่อเนื่องหลังจากใช้งาน ในทางตรงข้ามวัสดุมัดลวดที่ทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถที่จะมัดให้แน่นหรือหลวมได้แล้วแต่ความต้องการ (6) และในกรณีที่ต้องการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไถล การมัดลวดกับแบร็กเกิดควรทำเพื่อคงลวดให้อยู่ในร่องแบร็กเกิดแต่ไม่ให้ลวดเข้าไปในร่องแบร็กเกิดเพื่อลดขนาดแรงปกติลง (24)

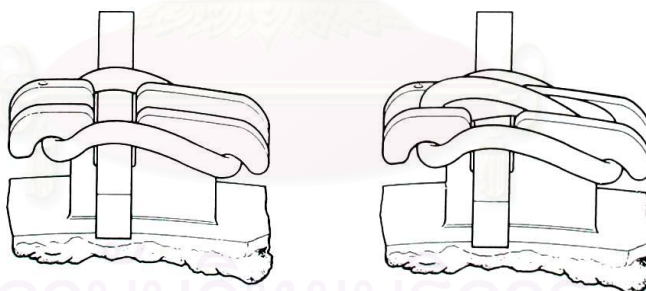
Bednar และคณะ (28) ได้ศึกษาขนาดแรงเสียดทานที่เกิดจากการใช้ยางโพลีเอทิลีนและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในการมัดลวดกับแบร็กเกิด ซึ่งพบว่าการมัดด้วยยางโพลีเอทิลีนให้ขนาดแรงเสียดทานที่มากกว่าการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในลวดทุกขนาด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shivapuja และ Berger (29) แต่ในการศึกษาของ Edwards และคณะ (30) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของขนาดแรงเสียดทานที่เกิดจากการมัดด้วยยางโพลีเอทิลีน

และการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการศึกษานี้ได้ปล่อยให้เกิดการคลายความเครียดของยางก่อนโดยนำยางโพลีเอทิลีนไปแช่ในน้ำลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดลอง และขนาดแรงที่ใช้ในการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิมอาจแตกต่างกัน และการศึกษานี้พบว่าการมัดด้วยลวดที่เคลือบเทฟลอน (Teflon-coated ligature) เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุดในลวดและแบรacketเหล็กกล้าไร้สนิม

Kusy (24) แนะนำให้ใช้การมัดด้วยคอมโพสิท (Composite ligature) เนื่องจากมีการสูญเสียแรงประมาณ 98% ใน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะให้แรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้เหลือแรงปกติที่กระทำต่อลวดและแบรacketน้อยซึ่งเหมาะสมในการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไกล

วิธีในการมัดลวดกับแบรacket (Method of ligation)

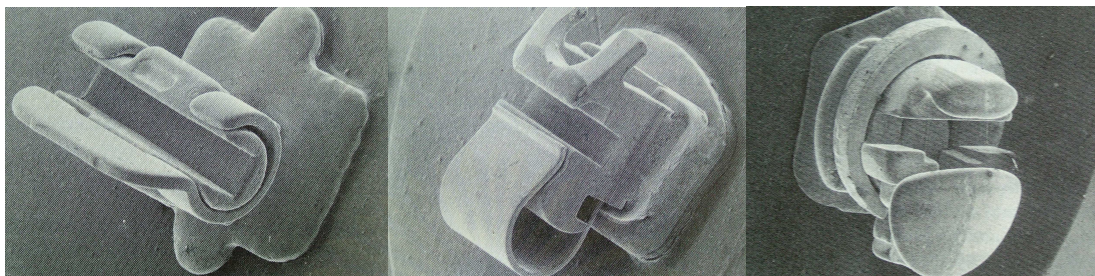
โดยทั่วไปการมัดลวดกับแบรacketด้วยยางโพลีเอทิลีนแบบเลขแปด (Figure-of-eight) (รูปที่ 5) จะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่มากกว่าการมัดแบบธรรมดา (30, 31) นอกจากนี้วิธีการมัดแล้วยังมีแบรacketซึ่งออกแบบให้เกิดแรงในการมัดลดลง โดยจำกัดปริมาณแรงที่มัดลวดกับแบรacket เช่น แบรacketซินเนอร์จี (Synergy) ซึ่งมี 6 ปีก โดยมัดเฉพาะปีกกลางในขณะที่ทำการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไกล ทำให้ลดปริมาณแรงในการมัดได้ ส่วนปีกข้างจะมัดในกรณีที่ต้องการแก้ไขการหมุนของฟัน (6)



รูปที่ 5 การมัดยางแบบธรรมดาและแบบเลขแปด

แบรacketชนิดมัดในตัวเอง (Self-ligating bracket) (รูปที่ 6) เป็นแบรacketอีกชนิดหนึ่งซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อลดแรงเสียดทาน ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าแบรacketชนิดมัดในตัวเองเกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและการมัดด้วยยางโพลีเอทิลีนในลวดทุกขนาด (29, 31-33) แต่มีการศึกษาหนึ่งที่พบว่าแบรacketสปีด (SPEED) ชนิดมัดในตัวเองทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ไม่น้อยไปกว่าการมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและการมัดด้วยยางโพลีเอทิลีน และยังพบว่าลวดขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว ในร่องแบรacketขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว เกิดแรง

เสียดทานมากที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากการทดลองที่ออกแบบให้ขณะที่ดึงลวดมีการล้มน้อยของ
 แบริกเกตได้ทำให้ในแบริกเกตสปิตชนิดมัดในตัวเองซึ่งมีความกว้างของแบริกเกตน้อยเกิดแรง
 เสียดทานมากได้ (28)



รูปที่ 6 ตัวอย่างแบริกเกตชนิดมัดในตัวเอง

ผลของแบริกเกตต่อแรงเสียดทาน (Effect of bracket on friction)

ชนิดของแบริกเกตและกระบวนการผลิตแบริกเกต (Bracket materials and manufacturing process)

ในปัจจุบันมีการผลิตแบริกเกตขึ้นมาหลายชนิด เช่น แบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม แบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอร์ แบริกเกตไทเทเนียม แบริกเกตเซรามิก และแบริกเกตคอมโพสิต ซึ่งได้มีการศึกษามากมายเกี่ยวกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดหลายชนิดขนาดต่างๆ กันกับแบริกเกตเหล่านี้ (1, 7, 16, 23, 25, 34-40)

Vaughan และคณะ (16) ได้ศึกษาแรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างลวด 4 ชนิด (เหล็กกล้าไร้สนิม โคบอลต์โครเมียม นิกเกิลไทเทเนียม และ เบต้าไทเทเนียม) และแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอร์ พบว่าขนาดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซินเทอร์มีค่าน้อยกว่าในแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเหวี่ยง (Conventional cast stainless steel bracket) ประมาณ 38%-44% เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Kapila และคณะ (21) ซึ่งเนื่องมาจากลักษณะพื้นผิวของแบริกเกตที่ไม่เหมือนกัน

Kapur และคณะ (7) ได้เปรียบเทียบขนาดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเหลี่ยมขนาดต่างๆ กับแบริกเกตไทเทเนียมและแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าเมื่อขนาดลวดเพิ่มขึ้นในแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีค่าแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันเมื่อขนาดลวดเพิ่มขึ้นในแบริกเกตไทเทเนียมจะมีค่าแรงเสียดทานที่น้อยลง แต่ความแตกต่างของ

ขนาดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแบรกกเกต 2 ชนิดนี้ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้น ในแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.021 นิ้ว x 0.025 นิ้ว พบว่าให้ค่าแรงเสียดทานที่มากกว่าแบรกกเกตไทเทเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kusy และคณะ (41) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานในแบรกกเกตไทเทเนียมและแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมใกล้เคียงกันเมื่อทดสอบกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิลไทเทเนียม และเบต้าไทเทเนียม

Bazakidou และคณะ (37) ศึกษาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวด 3 ชนิด ได้แก่ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดนิกเกิลไทเทเนียม และลวดเบต้าไทเทเนียม กับแบรกกเกต 3 ชนิด ได้แก่ แบรกกเกตคอมโพสิต แบรกกเกตเซรามิก และ แบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดชินเทอร์ พบว่า ขนาดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดชนิดต่างๆ กับแบรกกเกตคอมโพสิตชนิดที่ไม่มีร่องโลหะ (Without metal slot) ขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว และ 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้วมีค่าน้อยที่สุด และพบว่าแบรกกเกตเซรามิกให้ค่าแรงเสียดทานที่มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับหลายการศึกษา (1, 23, 25, 34, 35, 38) ยกเว้นในร่องแบรกกเกตขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว พบว่าแบรกกเกตเซรามิก และแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าแรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน

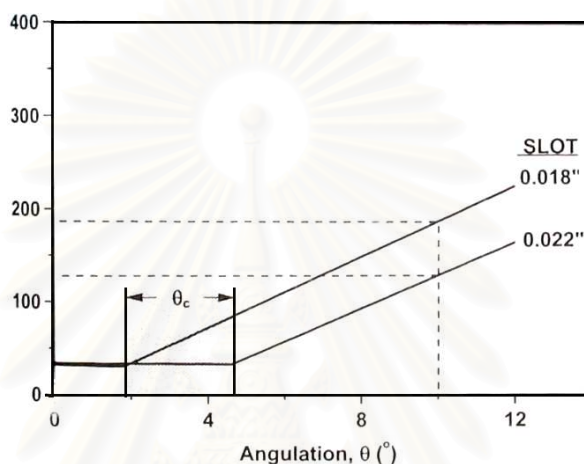
Omana และคณะ (38) พบว่าแบรกกเกตเซรามิกให้ค่าแรงเสียดทานที่มากที่สุดเช่นกัน ยกเว้นแบรกกเกตเซรามิกเซรามามาเฟล็ก (CeramaFlex) และคอนทัวร์ทวิน (Contour Twin) ซึ่งให้ค่าแรงเสียดทานใกล้เคียงกับแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากแบรกกเกต 2 ชนิดนี้ผลิตด้วยวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) ทำให้มีลักษณะเรียบ ขอบมนคล้ายกับแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนแบรกกเกตเซรามิกชนิดอื่น (Starfire, Allure, Lumina, Illusion, และ Transcend) ซึ่งผลิตด้วยวิธีการตัดด้วยไดมอนด์ (Diamond) ทำให้ได้ขอบที่หยาบซึ่งทำให้ลวดเป็นรอยและเพิ่มแรงเสียดทาน

Nishio และคณะ (25) พบว่าแบรกกเกตเซรามิกที่มีร่องโลหะเกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบรกกเกตเซรามิก เนื่องจากร่องแบรกกเกตที่เป็นโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างลวดและเซรามิก

การศึกษาของ Downing และคณะ (36) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและแบรกกเกตเซรามิก (Transcend) และยังพบว่าแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมกับลวดเบต้าไทเทเนียมให้ขนาดแรงเสียดทานมากกว่าแบรกกเกตเซรามิก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kusy และ Whitley (39) ซึ่งไม่พบความแตกต่างระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและแบรกกเกตเซรามิกเหมือนกัน โดย Downing และคณะ ได้อธิบายว่าอาจเนื่องจากวัสดุที่ทำการทดลองมาจากต่างบริษัทกันจึงทำให้ได้ผลการทดลองแตกต่างจากการศึกษาส่วนใหญ่

ความกว้างและความลึกของร่องแบร็กเกต (Slot width and depth)

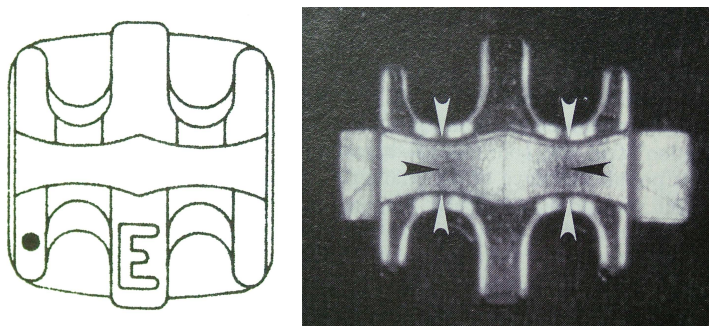
ขนาดของร่องแบร็กเกตอาจไม่มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทาน (17) แต่การศึกษาหนึ่งพบว่าแรงเสียดทานลดลงเมื่อขนาดร่องแบร็กเกตเพิ่มขึ้นจาก 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว เป็น 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว โดยที่ลวดมีขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว เนื่องจากการเกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบร็กเกตลดลง แต่จะสูญเสียการควบคุมตำแหน่งฟัน (รูปที่ 7) (24)



รูปที่ 7 การต้านการเคลื่อนที่ลดลงเมื่อขนาดร่องแบร็กเกตเพิ่มขึ้น

รูปแบบของแบร็กเกต (Bracket design)

แบร็กเกตในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ โดยได้ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อลดแรงเสียดทาน แบร็กเกตที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดแรงเสียดทานนั้นจะออกแบบโดยทำให้แรงปกติที่กระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตลดลง ได้แก่ แบร็กเกตชนิดมัดในตัวเอง แบร็กเกตที่มี 6 ปีก โดยออกแบบให้มัดเฉพาะปีกกลาง แบร็กเกตที่ออกแบบให้มีส่วนนูน (Bump) บริเวณร่องแบร็กเกตทั้งผนังและพื้นเพื่อลดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับลวด (รูปที่ 8) แบร็กเกตชนิดไม่มีแรงเสียดทานที่เรียกว่า Friction-Free brackets ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าแบร็กเกตเหล่านี้ทำให้เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าแบร็กเกตแบบธรรมดา (Conventional brackets) (29, 31-33, 42, 43)



รูปที่ 8 แบริกเกตชนิดที่มี 6 ปีกลูกศรชี้ให้เห็นถึงส่วนที่ถูกออกแบบให้มีส่วนหนุนที่ผนังและพื้นของร่องแบริกเกต

ความกว้างของแบริกเกตและระยะห่างระหว่างแบริกเกต (Bracket width and Interbracket distance)

ผลของความกว้างของแบริกเกตต่อแรงเสียดทานมีทั้งเมื่อเพิ่มความกว้างของแบริกเกตทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นและทำให้แรงเสียดทานลดลง การศึกษาที่พบว่าการเพิ่มความกว้างของแบริกเกตทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางที่ใช้ในการมัดลวดและแบริกเกตต้องถูกยืดออกมากกว่าในแบริกเกตที่แคบทำให้มีค่าแรงปกติที่มากขึ้นซึ่งส่งผลให้แรงเสียดทานมากขึ้นด้วย (21, 43) ส่วนการศึกษาที่พบว่าแรงเสียดทานลดลงเมื่อความกว้างของแบริกเกตเพิ่มขึ้นอธิบายว่าในแบริกเกตที่มีขนาดแคบทำให้พื้นเกิดการลื่นไถลและเกิดมุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตที่มากกว่าทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น (3, 17, 28, 38)

ความกว้างของแบริกเกตมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างแบริกเกต คือ แบริกเกตที่แคบทำให้ระยะห่างระหว่างแบริกเกตเพิ่มขึ้น ดังนั้นทำให้ลวดมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบริกเกตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบริกเกตที่แคบจะควบคุมการหมุนและการลื่นไถลได้น้อยเนื่องจากมีลวดที่สอดเข้าไปในร่องแบริกเกตน้อย (6)

ลักษณะของแบริกเกต (Bracket prescription)

แบริกเกตที่มีการปรับมุมต่างๆ (Preadjusted bracket) ทั้งมุมเอียงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (Tip) และในมุมเอียงในแนวหน้า-หลัง (Torque) ทำให้มีผลต่อค่าแรงเสียดทานได้

Sims และคณะ (32) ศึกษาแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันโดยใช้แบริกเกตขนาด 0.022 นิ้ว x 0.028 นิ้ว ที่มีการปรับมุมต่างๆ 3 ชนิด และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว

พบว่าเมื่อมุมเอียงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง และมุมเอียงในแนวหน้า-หลัง เพิ่มมากขึ้นจะเพิ่ม การต้านการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มมุมเอียงในแนวหน้า-หลังมีผลน้อยกว่าการ เพิ่มมุมเอียงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ดังนั้นจึงควรเรียงฟันให้เรียบก่อนที่จะเริ่มการเคลื่อนฟัน แบบเลื่อนไถลเพื่อลดแรงเสียดทานและลดการสูญเสียหลักยึด

ผลของลักษณะเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันต่อแรงเสียดทาน (Effect of orthodontic appliances on friction)

ระยะห่างระหว่างแบรacket (Interbracket distance)

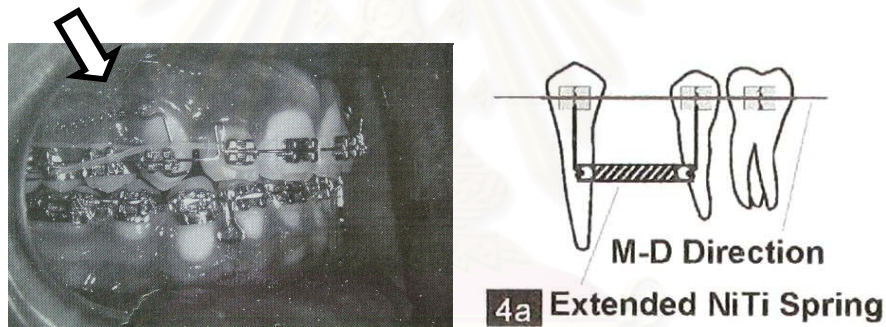
ระยะห่างระหว่างแบรacketมีผลต่อความแข็งแรงดึงของลวดดัดที่ได้อธิบายไว้แล้วว่า ระยะห่าง ระหว่างแบรacketที่มากจะทำให้ลวดมีความยืดหยุ่น (Flexibility) เพิ่มขึ้น ส่วนระยะห่างระหว่าง แบรacketที่น้อยก็ทำให้ลวดมีความยืดหยุ่นลดลง ทำให้ลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการยึดติด (Second order binding) (6, 44)

ระดับของร่องแบรacketระหว่างฟันข้างเคียง (Level of bracket slots between adjacent teeth)

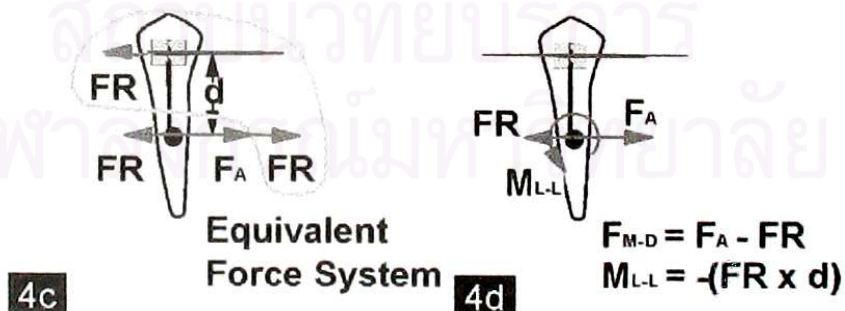
ในกรณีที่ระดับของร่องแบรacketระหว่างฟันข้างเคียงไม่เท่ากันจะส่งผลต่อค่าแรงเสียด ทานได้ คือ ถ้าระดับของร่องแบรacketต่างกันเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น Ogata และคณะ (43) ได้ศึกษาค่าแรงเสียดทานจลน์ระหว่างแบรacketเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆกับลวด เหล็กกล้าไร้สนิมขนาดต่างๆ ที่ความต่างระดับของร่องแบรacket 0.00, 0.25, 0.50, และ 0.75 มิลลิเมตร ได้ผลว่าค่าแรงเสียดทานจลน์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อความต่างระดับของ แบรacketเพิ่มขึ้น Tselepis และคณะ (45) ทดสอบค่ามุมระหว่างแบรacketและลวดชนิดต่างๆ ต่อ ค่าแรงเสียดทาน ที่มุม 0 และ 10 องศา ซึ่งพบว่าขนาดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นในแบรacketและลวด เกือบทุกคู่เมื่อมีมุมกระทำระหว่างแบรacketกับลวดเพิ่มขึ้นทั้งในสภาวะแห้งและเปียก (น้ำลาย เทียม) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Articolo และ Kusy (46) โดยศึกษาที่มุม 0, 3, 7, 11, 13 องศา โดยพบว่าต้องใช้แรงในการเคลื่อนฟันเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรacket เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมุมกระทำเพิ่มขึ้น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดการต้านการเคลื่อนที่ แบบเลื่อนไถล (Resistance to sliding) มากกว่าลวดนิกเกิลไทเทเนียมและลวดเบต้าไทเทเนียม เนื่องจากเกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบรacketที่มากกว่าลวดไทเทเนียม

แรงที่ใช้ในการถอยฟัน (Forces applied for retraction)

การที่จะให้ฟันเกิดการเคลื่อนที่แบบบอดิลีนนั้นจะต้องให้แรงผ่านจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟัน (Center of resistance) แต่ในทางปฏิบัติการให้แรงจะกระทำผ่านแบรคเกตที่ติดอยู่ที่ตัวฟันซึ่งจะทำให้เกิดการล้มเอียง (Tipping) ซึ่งการล้มเอียงนี้จะทำให้เกิดการยึดติดระหว่างลวดและแบรคเกตทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ในการศึกษาของ Yamaguchi และคณะ (47) พบว่าถ้าให้แรงในตำแหน่งที่ไกลจากจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันมากขึ้นจะทำให้เกิดโมเมนต์ที่มากขึ้นด้วยซึ่งส่งผลให้เกิดการล้มเอียง การยึดติดและแรงเสียดทานที่มากตามมา ดังนั้นจึงได้มีหลายบริษัทผลิตพาวเวอร์อาร์ม (Power arms) (รูปที่ 9) เพื่อต่อบนแบรคเกตของฟันซี่ยาวให้ยาวขึ้นเพื่อลดการเกิดโมเมนต์และการยึดติดระหว่างลวดและแบรคเกต แต่ยังคงเกิดแรงเสียดทานระหว่างแบรคเกต ลวด และวัสดุที่ใช้มัดลวดและแบรคเกต อีกทั้งจากคราบจุลินทรีย์ (Plaque) คราบอาหาร หรือคราบหินปูนได้ ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดแรงคู่ควบ (Couple) ในแนวแกนของด้านแก้มและลิ้น (labio-lingual axis) ได้ดังรูปที่ 10 (48)



รูปที่ 9 พาวเวอร์อาร์ม



รูปที่ 10 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดแรงคู่ควบ

ปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factors)

ผลของน้ำลายต่อแรงเสียดทาน (Effect of saliva on friction)

ได้มีการศึกษาผลของน้ำลายต่อแรงเสียดทานทั้งในน้ำลายเทียมและในน้ำลายคน ซึ่งผลการศึกษาทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นและลดลง (35, 45, 49-51) ซึ่งผลการศึกษาที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากน้ำลายเทียมที่ใช้ในการทดลองผลิตมาจากต่างบริษัทจึงทำให้ส่วนประกอบในน้ำลายเทียมแตกต่างกัน และวิธีการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานได้

การศึกษาของ Kusy และคณะ (51) ได้ศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างแปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมและแปรงเกดโพลีคริสตัลไลน์อลูมินากับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม โคบอลต์-โครเมียม นิกเกิลไทเทเนียม และเบต้าไทเทเนียม ในสภาวะแห้งและเปียก (น้ำลายคน) พบว่าในสภาวะแห้งลวดและแปรงเกดเหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่น้อยที่สุด ส่วนลวดนิกเกิลไทเทเนียมและเบต้าไทเทเนียมให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมากกว่าลวดโคบอลต์-โครเมียม และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานในลวดนิกเกิลไทเทเนียมและเบต้าไทเทเนียมลดลง โดยเฉพาะในลวดเบต้าไทเทเนียมซึ่งลดลงถึง 50% ในขณะที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำลายทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีที่ผิวลวด หรือน้ำลายอาจทำให้แรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แต่ในลวดเบต้าไทเทเนียมน้ำลายจะช่วยลดการสึกกร่อนของชั้นไทเทเนียมออกไซด์เพราะการสึกนี้ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยึดติดและลื่นไถล (Stick-slip phenomenon) เช่นเดียวกับการทดลองของ Kusy และ Whitley (52) ซึ่งศึกษาแรงเสียดทานในลวดเบต้าไทเทเนียมกับแปรงเกดโพลีคริสตัลไลน์อลูมินาในน้ำลายชนิดต่างๆ 6 ชนิด ได้ผลว่าในน้ำลายคนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะแห้ง ในขณะที่น้ำลายเทียมชนิดต่างๆ ให้ค่าแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากน้ำลายมีผลต่อขนาดแรงเสียดทาน ดังนั้นควรคำนึงถึงขนาดแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันในผู้ป่วยที่มีภาวะปากแห้ง (Xerostomia) การไหลของน้ำลายลดลง ได้รับรังสีบำบัด หรือยาที่มีผลต่อการหลั่งน้ำลายด้วย

ผลของคราบจุลินทรีย์และแผ่นฟิล์มน้ำลายต่อแรงเสียดทาน (Effect of plaque and acquired pellicle on friction)

คราบจุลินทรีย์ คราบอาหาร หรือคราบหินปูน ที่เกาะอยู่ระหว่างลวดหรือแบร็กเกตทำให้ผิวลวดและแบร็กเกตมีความหยาบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อขนาดแรงเสียดทานได้ (48)

การลดแรงเสียดทานโดยการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าทางเคมี (Improving friction through surface chemistry)

การเปลี่ยนแปลงผิวหน้าทางเคมีนั้นสามารถทำได้โดย 2 วิธี คือ การเคลือบผิว (Coating) และการฝังสารเข้าไป (Implanting) (6) โดยวิธีแรก ได้แก่ การชุบโลหะ (Metal plating) การตกตะกอนของไอระเหยของสารเคมี (Chemical vapor deposition, CVD), โพลีเมอร์ (Solvent polymer), ขบวนการพลาสมา (Plasma deposition, PD), และการเคลือบด้วยสารดีแอลซี (Diamond-like carbon (DLC) coatings) ส่วนวิธีที่ 2 ได้แก่ คาร์บูไรซิง (Carburizing), ไนไตรดิ้ง (Nitriding), การฝังด้วยไอออน (Ion implantation, II) และ Ion beam assisted deposition (IBAD)

การเคลือบผิวจะทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น 5 ไมครอน หรือเท่ากับ 2.5 ไมครอนต่อหนึ่งผิวสัมผัส ขณะที่การฝังสารนั้นไม่ทำให้ขนาดเปลี่ยนแปลง

การฝังด้วยไอออน (Ion implantation)

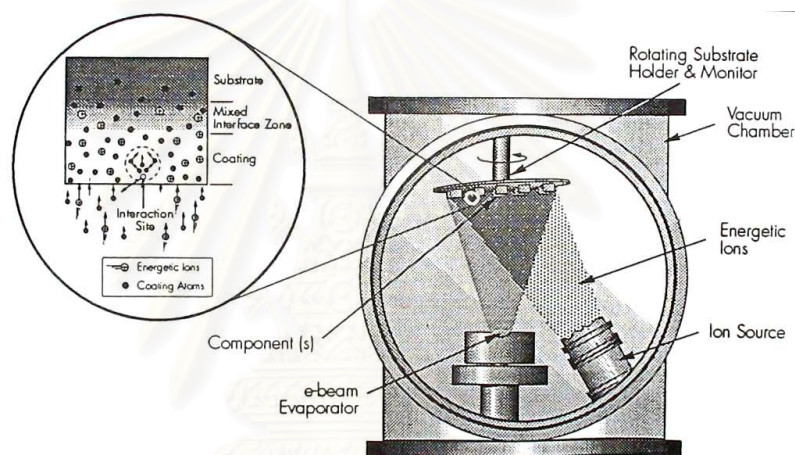
การฝังด้วยไอออนเป็นขบวนการที่ยิงธาตุซึ่งแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าและสามารถฝังเข้าไปในผิวหน้าของสารได้ (6, 14) ความลึกของอะตอมที่สามารถฝังตัวเข้าไปได้ ขึ้นกับพลังงานที่ใช้และปริมาณของอะตอมที่หลั่งออกมา

ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติผิวหน้าในขณะที่คุณสมบัติส่วนใหญ่ และขนาดลวดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนข้อเสียคือ พื้นผิวที่มีการยิงอะตอมไปฝังตัวจะได้รับปริมาณอะตอมไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ

ในปัจจุบันการฝังด้วยไอออนทำเพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของลวดเบต้าไทเทเนียม หลังจากการฝังไอออนลงในผิวลวดที่ระดับพลังงานต่างๆ ทำให้โครงสร้างของชั้นพื้นผิวและชั้นใต้พื้นผิวเปลี่ยนแปลงเกิดเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Amorphization) ในลักษณะที่ยึดติด (Coherent) กันซึ่งจะป้องกันชั้นวัสดุที่นิ่ม จึงช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการยึดติด

และการลื่นไถล (Stick-Slip) และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ลดลงถึง 54%

การฝังด้วยไอออนทำขึ้นในตู้สุญญากาศ (Vacuum chamber) ที่มีไอระเหยของไอออนที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam evaporator) (รูปที่ 11) ไอออนจะแทรกซึมเข้าไปในพื้นผิวของลวดเกิดเป็นโครงสร้างของลวดเดิมและชั้นของสารประกอบไทเทเนียม (TiN และ TiO) ที่ชั้นพื้นผิว และชั้นใต้พื้นผิว ซึ่งชั้นของสารประกอบไทเทเนียมจะมีความแข็งแรงมากและทำให้เกิดปริมาณแรงกด (Compressive force) ที่มากในระดับอะตอม ทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านต่อการล้า (Fatigue resistance) มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Ductility) ลดค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน และลดการเกิดรอยตำหนิที่ผิวลวด



รูปที่ 11 ตู้สุญญากาศที่มีก๊าซไอออนที่จะแทรกซึมเข้าสู่ลวด

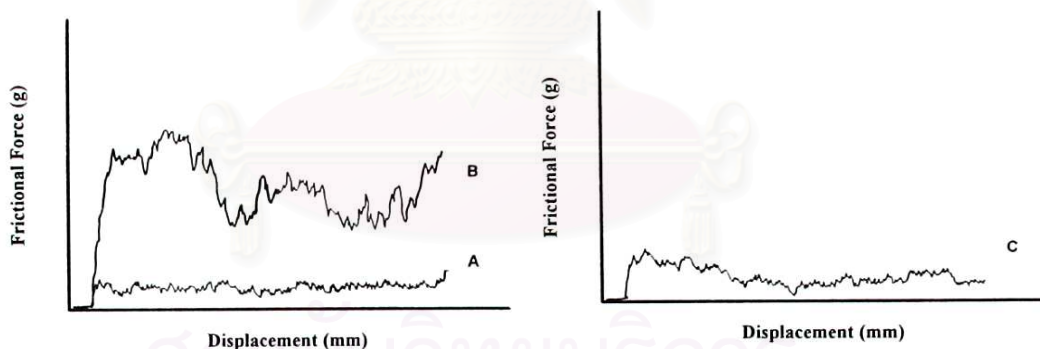
การฝังด้วยไอออนไม่ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างลวดและชั้นเคลือบอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกออกเป็นชั้นๆของวัสดุที่เคลือบได้ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดลวด และยังสามารถควบคุมความลึก การกระจาย และความเข้มข้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไอออนและพลังงานที่ใช้

การฝังด้วยไอออนสามารถทำได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำตั้งแต่ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงคุณลักษณะของพื้นผิวให้ดีขึ้นโดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลอื่นๆ เสียไป ความหนาของไอออนที่ฝังตัวสามารถถูกควบคุมได้ ซึ่งความหนาของชั้นไอออนมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของลวด เช่น ความแข็ง ความเสียดทาน ความต้านทานต่อการล้า ความอ่อนตัว และความต้านทานต่อการล้า

ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำและสีต่างๆ สามารถผลิตได้โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและความหนาของไอออน ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีสีต่างๆ ได้แก่ สีม่วงน้ำเงิน (Purple) สีม่วงแดง (Violet) สีฟ้า (Aqua) สีน้ำผึ้ง (Honeydew)

ได้มีหลายการศึกษาที่ทำการเปรียบเทียบแรงเสียดทาน อัตราการเคลื่อนที่ของพื้น อัตราการปิดช่องว่างของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน และลวดชนิดต่างๆ โดยบางการศึกษาพบว่า การฝังด้วยไอออนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแรงเสียดทาน (10, 14, 53, 54) ในขณะที่บางการศึกษาก็พบว่าไม่มีความแตกต่างของลวดที่ทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน (2, 20, 55)

Burstone และ Farzin-Nia (14) ศึกษาถึงแรงเสียดทานและคุณสมบัติทางกลของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ผ่านการทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าในลวดเบต้าไทเทเนียมที่ไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออนมีแรงเสียดทานจนกระทั่งแปรปรวนเนื่องจากลวดเกิดปรากฏการณ์การยึดติดและการลื่นไถล (Stick-slip phenomenon) (รูปที่ 12) คือ ลวดจะยึดติดกับแบรคเกตและเมื่อให้แรงต่อลวดจะเคลื่อนต่อไปได้แล้วก็เกิดการยึดติดอีกครั้ง ในขณะที่ลวดเบต้าไทเทเนียมที่ทำการฝังด้วยไอออนพบความแปรปรวนของแรงเสียดทานจลน์น้อยมาก และน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย



รูปที่ 12 แรงเสียดทานของลวดชนิดต่างๆ

A คือ ลวดฮันนีดีว, B คือลวดเบต้าไทเทเนียมที่ไม่ได้ฝังด้วยไอออน,

และ C คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ในลวดที่ทำการฝังด้วยไอออนลดลงในระดับใกล้เคียงกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนคุณสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น แรงต้านทานแรงดึง (Tensile strength), การคืนกลับของลวด (Springback), มอดุลัสของสภาพยืด

หยุ่น (Modulus of elasticity) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างลวดที่ทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน แต่พบว่าลวดที่ทำการฝังด้วยไอออนมีความเหนียว (Ductility) เพิ่มขึ้น

การทดลองของ Kusy และคณะ (54) ได้ศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างลวดเบต้าไทเทเนียมที่ทำการฝังไอออนด้วยไนโตรเจนไอออนและแผ่นโพลีคริสตัลไลน์อลูมินาที่ทำการฝังไอออนด้วยไทเทเนียมไอออน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ลดลงอย่างมาก คือ 0.59 เหลือ 0.20 และ 0.47 เหลือ 0.25 ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับลวดที่ไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน

Cash และคณะ (2) ได้ศึกษาแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ฝังด้วยไอออนชนิดต่างๆ และที่ไม่ได้ฝังด้วยไอออน พบว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่ทำการฝังด้วยไอออนบางชนิดเท่านั้นที่มีค่าแรงเสียดทานลดลง ซึ่งได้แก่ ลวดอันนีดีว และลวดไอออนอิมแพลนท์ อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในลวดเบต้าไทเทเนียมสองชนิดนี้ยังคงมากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้พบว่าลวดเบต้าไทเทเนียมสีฟ้า สีม่วงแดง และสีม่วงน้ำเงิน มีค่าแรงเสียดทานใกล้เคียงกับลวดเบต้าไทเทเนียมที่ไม่ได้ฝังด้วยไอออน

Kula และคณะ (55) ทดลองในเรื่องอัตราการปิดช่องว่างโดยใช้ลวดเบต้าไทเทเนียมที่ทำและไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออนในผู้ป่วย ได้ผลว่าอัตราการปิดช่องว่างในเบต้าไทเทเนียมที่ทำการฝังด้วยไอออนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับลวดที่ไม่ได้ทำการฝังด้วยไอออน และยังพบว่าอัตราการปิดช่องว่างในลวดเบต้าไทเทเนียมทั้งสองชนิดนี้เหมือนกับการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

ขบวนการพลาสมาเสริมด้วยสารพาลีลีน (Plasma-Enhanced Parylene, PEP)

ขบวนการพลาสมา คือ วัสดุจะถูกทำให้พลังงานจนกระทั่งมีการแตกตัวเป็นไอออน และเมื่อนำวัสดุเข้าไปในบรรยากาศที่เป็นก๊าซที่มีความร้อนสูง (Gaseous atmosphere) ไอออนเหล่านี้จะกำจัดแร่ธาตุบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว

เมื่อนำไดพาราซีลีน (Diparaxylylene) มาระเหยและสลายตัวเป็นพาราซีลีน (Paraxylylene) และนำไปฉีดในตู้สุญญากาศ ทำให้โมโนเมอร์เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์เป็นโพลีพาราซีลีน (Polyparaxylylene) ซึ่งสามารถเคลือบผิววัสดุได้โดยมีความหนาเพียง 2.5 ไมครอน (6)

การเคลือบแผ่นโพลีคริสตัลไลน์อลูมินาด้วยพีอีพี เมื่อนำมาทดลองกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ลดลงอย่างมากถึง 0.086 และ 0.085 ตามลำดับ และเมื่อทดสอบกับลวดเบต้าไทเทเนียมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

สถิตและแรงเสียดทานจลน์ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งเหลือ 0.16 และ 0.17 ตามลำดับ นอกจากนี้ พีอีพียังมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย (Biocompatibility) และเป็นการเคลือบที่มีเสถียรภาพสำหรับเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน (56)

การเคลือบด้วยสารดีแอลซี (Diamond-like Carbon, DLC)

คุณสมบัติของดีแอลซีเป็นการนำเอาคุณสมบัติที่ดีที่สุดของเพชร (Diamond) และกราไฟต์ (Graphite) มาใช้ โดยจะมีลักษณะแข็ง และทนทานเหมือนเพชร ขณะที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ต่ำและเป็นโครงสร้างที่เฉื่อย (Unreactive structure) เหมือนกราไฟต์

ดีแอลซีให้สีต่างๆ ตั้งแต่ สีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีน้ำตาล ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นที่เคลือบ (Film thickness) แต่การเคลือบของดีแอลซีจะไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกับการฝังด้วยไอออน

เมื่อนำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมาทดสอบกับแผ่นโพลีคริสตัลไลน์อลูมินาที่เคลือบด้วยดีแอลซี พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ 0.15 และ 0.13 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิม และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ในลวดเบต้าไทเทเนียมและแผ่นโพลีคริสตัลไลน์อลูมินาที่เคลือบด้วยดีแอลซีก็ลดลงด้วยเช่นกันเหลือ 0.28 และ 0.33 ตามลำดับ (56)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ประชากร

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว (Stainless steel, Ormco) ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว 3 ชนิด ได้แก่ ลวดฮันนี่ดีว (Colored TMA[®] Honeydew, Ormco) ลวดเบต้าทรี 1 (Beta III Titanium Archwire, 3M Unitek) และลวดเบต้าทรี 2 (Nickel-Free Titanium Beta III Archwire, Masel)

แบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับฟันเขี้ยวชนิดมาตรฐานขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว ที่มีมุมต่างๆ เป็นศูนย์กลาง (mini dyna-lock, 3M Unitek)

กลุ่มตัวอย่าง

เนื่องจากการศึกษาเป็นการทดสอบค่าเฉลี่ยของลวด 4 ชนิด จึงคำนวณหากลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรเพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับประชากร 2 กลุ่ม โดยทดสอบ 2 ทาง คือ

$$N = \frac{2\sigma^2 (Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2}{(\mu_1 - \mu_2)^2}$$

กรณีนี้ที่ $N_1 = N_2$

$$\sigma^2 = S_p^2 = (S_1^2 + S_2^2)/2$$

โดยกำหนดให้ $\alpha = 0.05$ และ $\beta = 0.01$ ดังนั้นได้ค่า $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ และ $Z_{1-\beta} = 1.282$

การใช้ค่าต่างๆ มาแทนในสูตรจะต้องเป็นค่าที่ได้จากการศึกษาที่คล้ายกัน จึงได้นำค่าเหล่านี้มาจากการศึกษาของ Cash และคณะ (2) เนื่องจากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีการปรับสภาพผิวและแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิม เหมือนกับการวิจัยครั้งนี้ แต่ต่างกันเพียง Cash และคณะ ศึกษาเฉพาะลวดเบต้าไทเทเนียมที่ฝังด้วยไอออนชนิดต่างๆ ซึ่งค่าที่นำมาคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานสถิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละกลุ่ม โดยนำมาคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ใหญ่ที่สุดซึ่งได้กลุ่มละเท่ากับ 12 โดยคำนวณจากกลุ่มลวดเบต้าไทเทเนียมสีฟ้า และ สีม่วง (Aqua TMA และ Purple TMA) ดังนี้

ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของกลุ่มสีฟ้าเท่ากับ 6.48

ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของกลุ่มสีม่วงเท่ากับ 6.26

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มสีฟ้าเท่ากับ 0.14

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มสีม่วงเท่ากับ 0.18

$$\text{จากสูตร} \quad N = \frac{2\sigma^2 (Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2}{(\mu_1 - \mu_2)^2}$$

$$\text{แทนค่าได้} \quad N = \frac{(0.14^2 + 0.18^2)(1.96 + 1.282)^2}{(6.48 - 6.26)^2} = 12$$

คัดเลือกลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว ชนิดละ 24 เส้น และแบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับฟันเขี้ยวชนิดมาตรฐานขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว จำนวน 96 ตัว

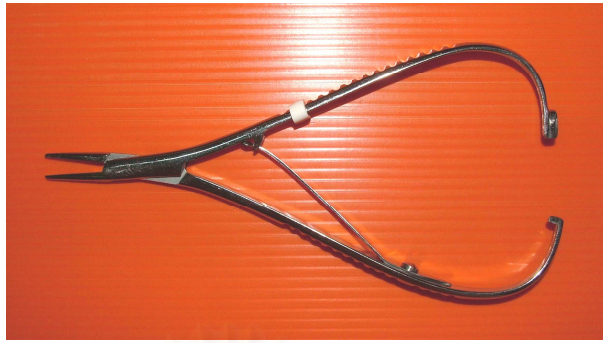
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว ชนิดละ 24 เส้น เป็นจำนวนทั้งหมด 72 เส้น
2. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว จำนวน 24 เส้น
3. แบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับฟันเขี้ยวชนิดมาตรฐานขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว จำนวน 96 ตัว
4. ยางโฟลียูรีเทนสีเทาจำนวน 96 วง



รูปที่ 13 ยางโฟลียูรีเทนสีเทา

5. แมททิวโฮลเดอร์ (Mathieu holder) สำหรับมัดยางเข้ากับแบรคเกต
6. เอ็กซ์พลอเรอร์ (Explorer) สำหรับถอดวงแหวนยางออกจากแบรคเกต

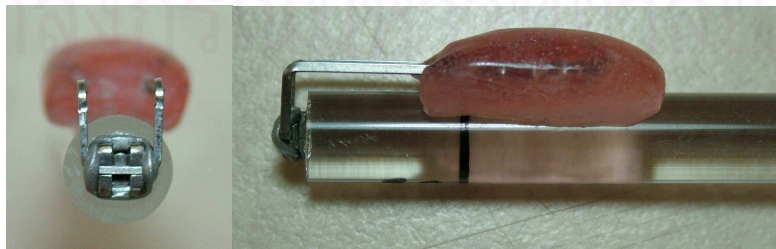
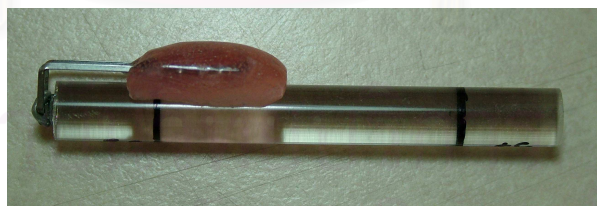


รูปที่ 14 แมททิวไฮลเดอร์



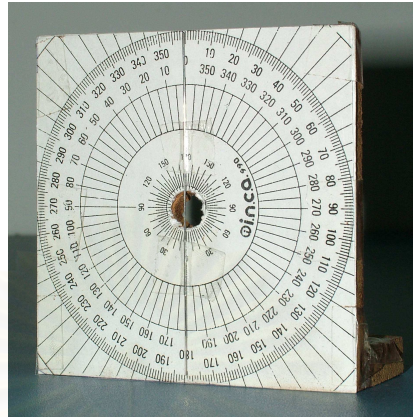
รูปที่ 15 เอ็กซ์พลอเรอร์

7. แท่งอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร สำหรับยึดแบรคเกตจำนวน 96 แท่ง
8. กาวไซยาโนอะคริเลตสำหรับยึดแบรคเกตกับแท่งอะคริลิก
9. เครื่องมือสำหรับยึดแบรคเกตให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งอะคริลิกเท่ากันทุกครั้ง



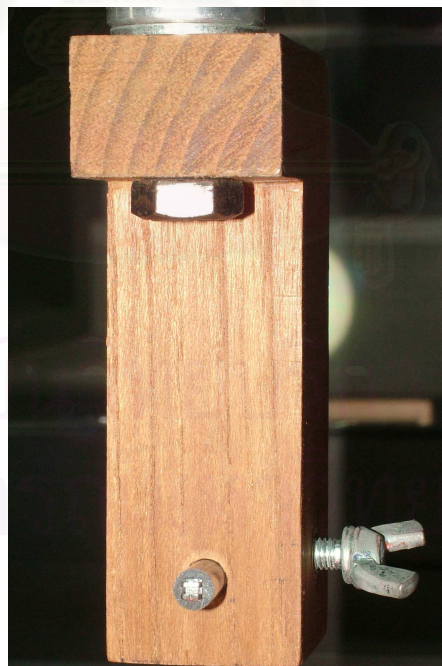
รูปที่ 16 เครื่องมือสำหรับยึดแบรคเกตให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งอะคริลิกเท่ากันทุกครั้ง

10. เครื่องมือสำหรับปรับแบรกกेटให้ได้มุมกระทำเป็นศูนย์และหนึ่งองศา



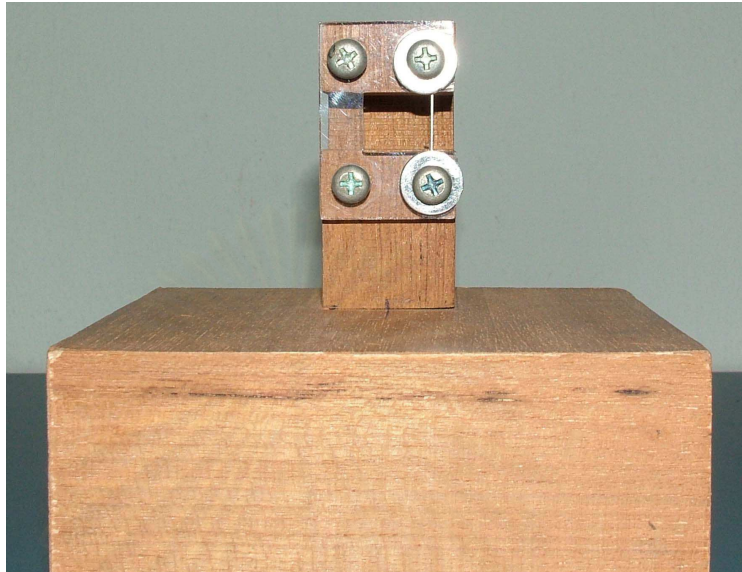
รูปที่ 17 เครื่องมือสำหรับปรับแบรกกेटให้ได้มุมกระทำเป็นศูนย์และหนึ่งองศา

11. เครื่องมือสำหรับยึดแท่งอะคริลิกกับครอสเฮดของเครื่องลอยด์นุเมอร์เชลเทศตั้งมาขึ้นให้อยู่ในแนวตั้ง



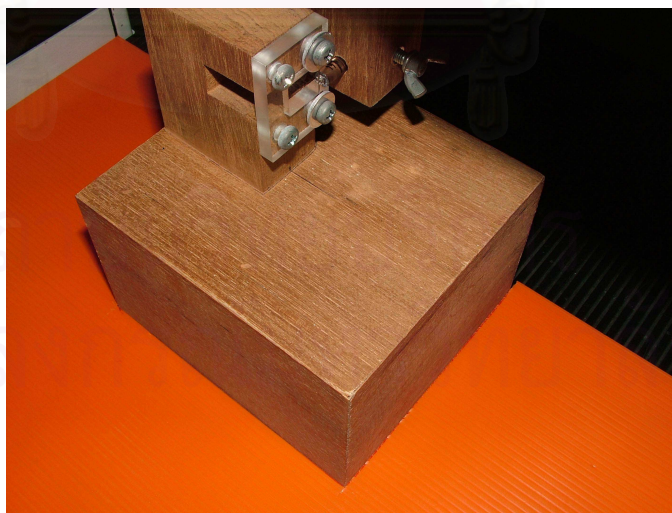
รูปที่ 18 เครื่องมือสำหรับยึดแท่งอะคริลิกกับครอสเฮดของเครื่องลอยด์นุเมอร์เชลเทศตั้งมาขึ้นให้อยู่ในแนวตั้ง

12. เครื่องมือสำหรับยึดลวด



รูปที่ 19 เครื่องมือสำหรับยึดลวด

13. แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดสีส้มใช้ในการกำหนดฐานของเครื่องมือสำหรับยึดลวดให้อยู่ตำแหน่งเดิมทุกครั้งขณะทดลอง

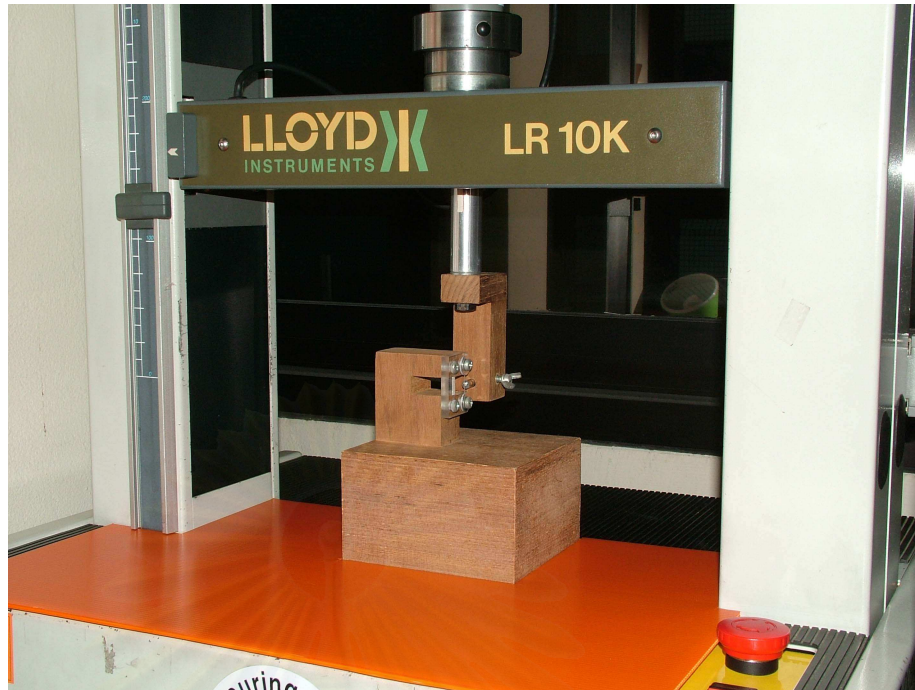


รูปที่ 20 แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดสีส้มที่ใช้ในการกำหนดฐานเครื่องมือสำหรับยึดลวดให้อยู่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง

14. เครื่องลloydยูนิเวอร์แซลทดสอบดึงมาขึ้นเป็นเครื่องมือสำหรับวัดแรงที่ใช้ในการดึงแบรกกเกตผ่านลวด ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องมือมีดังนี้
- ฟิกส์เฮด (Fixed head) คือ ส่วนของเครื่องมือที่อยู่กับที่
 - ครอสเฮด (Cross head) คือ ส่วนของเครื่องมือที่เคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงและเชื่อมต่อกับจอแสดงผล ทำให้สามารถอ่านค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ ในการทดลองนี้จะทำหน้าที่ยึดเครื่องมือที่ยึดแบรกกเกต โดยตั้งค่าให้ครอสเฮดวิ่งด้วยความเร็ว 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จะได้ระยะทาง 0.5 มิลลิเมตร
 - ตุ้มน้ำหนัก (Load cell) ขนาด 100 นิวตัน



รูปที่ 21 เครื่องลloydยูนิเวอร์แซลทดสอบดึงมาขึ้น



รูปที่ 22 เครื่องมือขณะทำการทดลอง

การรวบรวมข้อมูล

หาค่าแรงเสียดทานสถิตโดยใช้เครื่องลloydยูนิเวอร์แซลเทสติงมาชีน (Lloyd Universal Testing Machine, Model LR10 K)

ตัวแปรของการวิจัย

1. ตัวแปรอิสระ
 - 1.1 ชนิดของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
 - 1.2 มุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตที่ศูนย์ และหนึ่งองศา
2. ตัวแปรตาม คือ ค่าแรงเสียดทานสถิต

วิธีการทดลอง

1. คัดเลือกลวด แบร็กเกต และยางโพลีเอทิลีนแบบสุ่ม
2. กำหนดระยะทางที่ให้แท่งอะคริลิกยื่นออกมาจากเครื่องมือที่ติดกับส่วนครอสเฮดโดยใช้ปากกาเขียนแก้วกั้นน้ำขีดเส้นบนแท่งอะคริลิกด้านละ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 23 การขีดเส้นบนแท่งอะคริลิกด้านละ 10 มิลลิเมตร

3. นำแบร็กเกตมายึดติดกับแท่งอะคริลิกด้วยกาวโดยใช้เครื่องมือสำหรับยึดแบร็กเกตเพื่อให้แบร็กเกตอยู่ในตำแหน่งเดิมทุกครั้ง



รูปที่ 24 แท่งอะคริลิกที่ติดแบร็กเกตแล้ว

4. ตัดลวดแต่ละเส้นยาว 19 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นลวดเบต้าไทเทเนียมมีลักษณะเป็นลวดโค้งทำให้สามารถกำหนดความยาวในส่วนที่เป็นเส้นตรงได้จำกัด

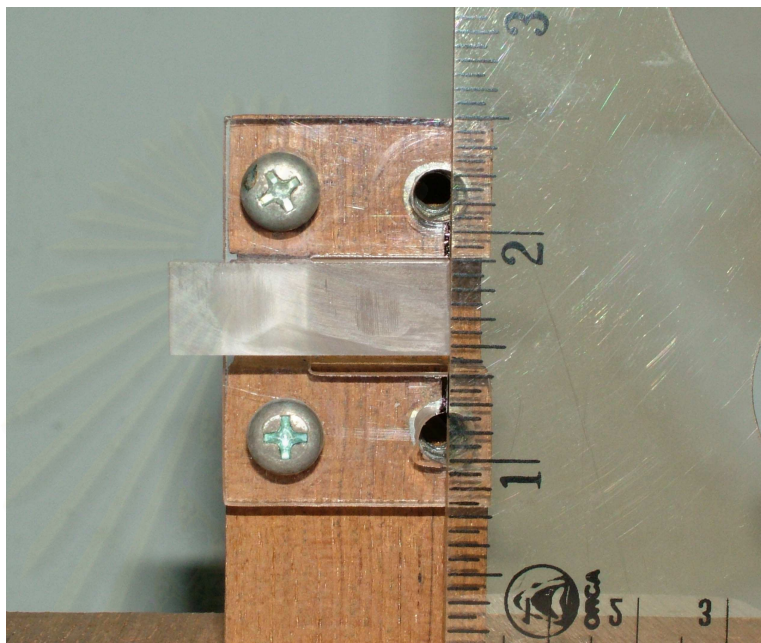
5. สำหรับลวดโค้งจากบริษัท Ormco และ Masel นั้นไม่มีส่วนตรงที่เพียงพอจึงต้องดัดให้ตรงโดยใช้คีมทวิต (Tweed pliers) จับเฉพาะตรงปลายลวด และใช้นิ้วดัด หลังจากนั้นนำมาทาบกับไม้บรรทัดเหล็กจนลวดแนบกับไม้บรรทัดถึงระยะที่ต้องการ แล้วจึงตัดลวดมาทำการทดลอง
6. ลวดและแบรกกेटจะถูกเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อนของลวดและแบรกกेटจากการทดลอง
7. ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกेटเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटเป็นศูนย์ และหนึ่งองศา โดย
 - 4.1. ยึดเครื่องมือสำหรับยึดแท่งอะคริลิกกับครอสเฮด
 - 4.2. วางแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดสำหรับกำหนดฐานของเครื่องที่ใช้ยึดลวด
 - 4.3. วางแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นเล็กที่รองด้านขวาของเครื่องลวดยูนิเวอร์แซลทดสอบ มาขึ้นที่มีเซนเซอร์ป้องกันไม่ให้ส่วนครอสเฮดเคลื่อนต่ำจากตำแหน่งของเซนเซอร์
 - 4.4. เลื่อนเซนเซอร์ลงมาจนถึงขอบบนของแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นเล็ก จากนั้นเคลื่อนครอสเฮดลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงตำแหน่งเซนเซอร์ ซึ่งเครื่องจะส่งสัญญาณเตือนและตัดการทำงาน



รูปที่ 25 แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นเล็กที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งเซนเซอร์เพื่อให้ได้ตำแหน่งเริ่มแรกเหมือนเดิมทุกครั้งที่ทดลอง

- 4.5. เอาแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นเล็กออก แล้วเลื่อนเซนเซอร์ให้ต่ำลง จากนั้นเครื่องจะกลับมาทำงานใหม่แล้วเริ่มนับระยะทางที่ศูนย์มิลลิเมตร
- 4.6. เคลื่อนครอสเฮดขึ้นจนเครื่องอ่านได้ระยะทาง 18.3 มิลลิเมตร และกดตั้งค่าให้เครื่องนับศูนย์ใหม่ ซึ่งจะใช้เป็นตำแหน่งเริ่มแรกทุกครั้งขณะทดลอง ดังนั้นทุกครั้งที่ทดลองจะได้ตำแหน่งของแบรคเกตในแนวตั้งที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง

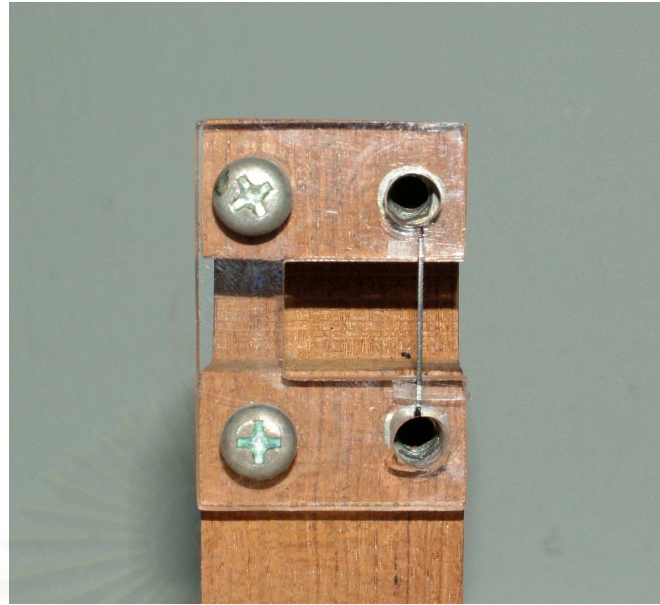
- 4.7. กำหนดตำแหน่งที่จะยึดลวดให้ได้ตำแหน่งเดิมทุกครั้งโดยวางแท่งอะคริลิกทรงเหลี่ยมให้แนบกับแท่งอะคริลิกรูปตัวซี และใช้ไม้สามเหลี่ยมมุมฉากวางแนบกับแท่งอะคริลิกทรงเหลี่ยม หลังจากนั้นใช้ปากกาเขียนแก้วชนิดกันน้ำขีดตำแหน่งที่จะยึดลวด



รูปที่ 26 การกำหนดตำแหน่งที่ใช้ยึดลวด

- 4.8. ยึดลวดกับเครื่องมือสำหรับยึดลวดโดยติดเทปกาวใส หลังจากนั้นไขวงแหวนโลหะยึดลวดให้แน่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 27 การยึดลวดกับเครื่องมือสำหรับยึดลวดโดยติดเทปกาวใส และไขวงแหวนโลหะ

- 4.9. วางเครื่องมือสำหรับยึดลวดที่แผ่นพีวีเออร์บอร์ดซึ่งใช้กำหนดฐานของเครื่องมือ
- 4.10. ใส่แท่งอะคริลิกที่ติดแบร็กเกตแล้วเข้ากับเครื่องมือที่ต่อกับส่วนครอสเฮด
- 4.11. ปรับมุมแบร็กเกตให้เป็นศูนย์องศาโดยเครื่องมือสำหรับตั้งมุม
- 4.12. ทดสอบแรงดึงโดยให้ครอสเฮดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

- 4.13. บันทึกค่าแรงเสียดทานสถิต โดยดูจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงกับระยะทางที่เบรคเกิดเคลื่อนผ่านลวดไป โดยเลือกตำแหน่งที่สูงสุดของกราฟจุดแรกก่อนที่จะมีการลดลงหรือคงที่ โดยวัดเป็นหน่วยนิวตัน
- 4.14. ทำเช่นนี้จนครบ 12 ครั้งสำหรับลวดแต่ละชนิด
- 4.15. ปรับมุมเบรคเกตให้เป็นหนึ่งองศาโดยเครื่องมือสำหรับตั้งมุม
- 4.16. ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนครบ 12 ครั้งสำหรับลวดแต่ละชนิด
8. ศึกษาเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานสถิตระหว่างเบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำที่ศูนย์ และหนึ่งองศา

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตระหว่างเบรคเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำที่ศูนย์ และหนึ่งองศา โดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และถ้าผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างกัน จึงทำการวิเคราะห์ต่อว่าคู่ไหนที่แตกต่างกันโดยทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยสถิติ Sheffe ในกรณีที่มีความแปรปรวนเท่ากัน และสถิติ Tamhane's T2 กรณีที่มีความแปรปรวนไม่เท่ากัน และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานสถิตเมื่อมีมุมกระทำที่ศูนย์ และหนึ่งองศา ในลวดชนิดเดียวกันโดยใช้สถิติ Independent-Sample T Test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 11.5 for Windows

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำจากบริษัทผู้ผลิต 3 บริษัท รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตเป็น 0 และ 1 องศา โดยที่กลุ่มตัวอย่างมีขนาดกลุ่มละ 12 ชิ้น ซึ่งได้ข้อมูลค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าน้อยที่สุด ค่ากลาง และค่ามากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และรูปที่ 28 และ 29

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ค่าน้อยที่สุด (minimum, min) ค่ากลาง (median) และค่ามากที่สุด (maximum, max) ของแบริกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบริกเกตเป็น 0 องศา

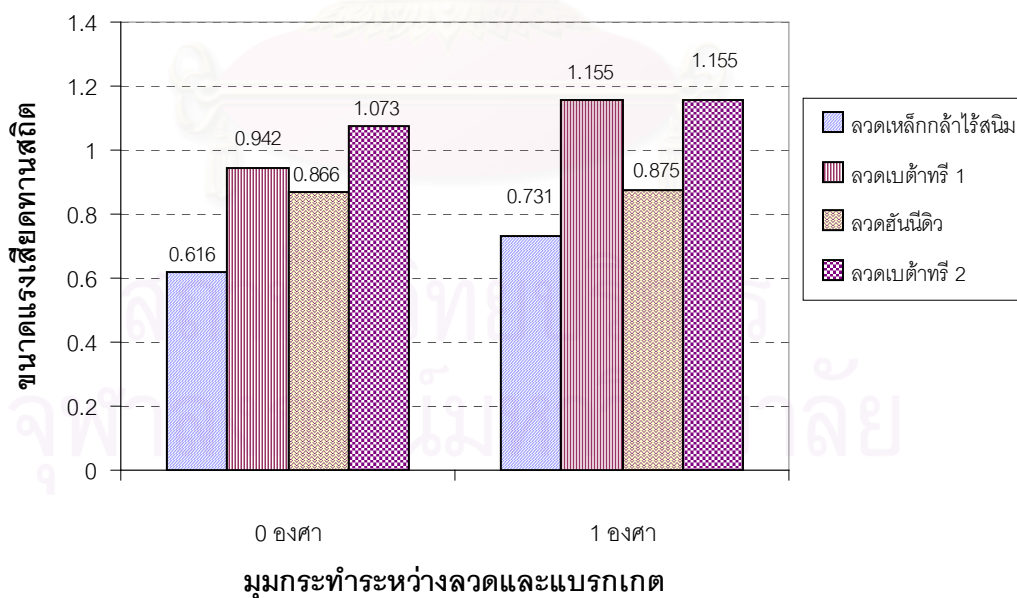
ชนิดลวด	มุม	0 องศา				
		Mean (N)	SD	Min	Median	Max
ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม		0.616	0.105	0.444	0.606	0.768
ลวดเบต้าทรี 1		0.942	0.071	0.867	0.936	1.143
ลวดฮันนี่ดีว		0.866	0.144	0.670	0.842	1.100
ลวดเบต้าทรี 2		1.073	0.219	0.692	1.176	1.308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ค่าน้อยที่สุด (minimum, min) ค่ากลาง (median) และค่ามากที่สุด (maximum, max) ของแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 1 องศา

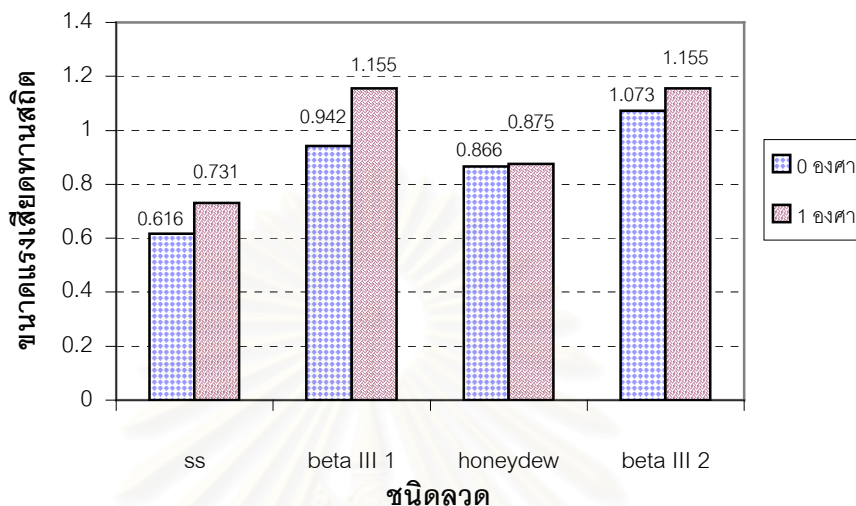
ชนิดลวด	มุม	1 องศา				
		Mean (N)	SD	Min	Median	Max
ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม		0.731	0.118	0.556	0.743	0.914
ลวดเบต้าทรี 1		1.155	0.182	0.819	1.228	1.350
ลวดฮันนี่ดีว		0.875	0.160	0.712	0.811	1.151
ลวดเบต้าทรี 2		1.155	0.189	0.887	1.141	1.459

จากผลการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกเกตเป็น 0 องศา และ 1 องศา มีค่าเรียงลำดับจากน้อยไปมาก คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดฮันนี่ดีว ลวดเบต้าทรี 1 และลวดเบต้าทรี 2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 กราฟแท่งอธิบายค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดีว และลวดเบต้าทรี 2 ที่มุมกระทำ 0 และ 1 องศา

เมื่อศึกษาถึงขนาดแรงเสียดทานสถิตเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเป็น 0 องศา และ 1 องศา ของลวดชนิดต่างๆ พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกระทำเพิ่มขึ้นเป็น 1 องศา ในลวดทุกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 กราฟแท่งอธิบายค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตที่มีมุมกระทำ 0 และ 1 องศา ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดีว และลวดเบต้าทรี 2

จากสมมติฐานการวิจัยที่กล่าวว่ามี ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 1 คู่ เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเท่ากัน จึงทดสอบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ด้วยสถิติ One-Sample Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตมีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในตารางที่ 3 จึงทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตโดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงทำการวิเคราะห์ต่อว่าคู่ไหนที่แตกต่างกันโดยทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยสถิติ Sheffe ในกรณีที่มีความแปรปรวนเท่ากัน และสถิติ Tamhane's T2 ในกรณีที่มีความแปรปรวนไม่เท่ากัน

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตเป็น 0 และ 1 องศา มีดังนี้

1. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดชนิดต่างๆ ที่มุม 0 องศา พบว่า ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าแรงเสียดทานสถิตน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมอีก 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4
2. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบร็กเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดชนิดต่างๆ ที่มุม 1 องศา พบว่า ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าแรงเสียดทานน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 แต่มีค่าน้อยกว่าลวดฮันนี่ดิวอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และยังพบว่าลวดฮันนี่ดิวมีค่าแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การแจกแจงค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตด้วยสถิติ One-Sample Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ชนิดลวด	มุม (องศา)	
	0	1
ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม	0.953	1.000
ลวดเบต้าทรี 1	0.348	0.603
ลวดฮันนี่ดิว	0.962	0.631
ลวดเบต้าทรี 2	0.375	1.000

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดิว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 องศา โดยวิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparisons) ด้วยสถิติ Tamhane's T2

0 องศา	ss.	Beta III 1	Honeydew	Beta III 2
ss.		0.000*	0.001*	0.000*
Beta III 1	0.000*		0.527	0.358
Honeydew	0.001*	0.527		0.076
Beta III 2	0.000*	0.358	0.076	

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนี่ดิว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 1 องศา โดยวิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparisons) ด้วยสถิติ Scheffe

1 องศา	ss.	Beta III 1	Honeydew	Beta III 2
ss.		0.000*	0.221	0.000*
Beta III 1	0.000*		0.002*	1.000
Honeydew	0.221	0.002*		0.002*
Beta III 2	0.000*	1.000	0.002*	

จากสมมติฐานการวิจัยที่กล่าวมาที่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตต่างกัน ในลวดชนิดเดียวกัน จึงทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตด้วยสถิติ Independent-Sample T Test โดยผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อมีมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ดังแสดงในตารางที่ 6

2. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 1 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อมีมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ดังแสดงในตารางที่ 7
3. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดอันนิคิว เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อมีมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ดังแสดงในตารางที่ 8
4. การศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อมีมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม	0	1
0		0.020*
1	0.020*	

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 1 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา

ลวดเบต้าทรี 1	0	1
0		0.002*
1	0.002*	

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต ระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดอานนีดิว เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา

ลวดอานนีดิว	0	1
0		0.885
1	0.885	

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของขนาดแรงเสียดทานสถิต ระหว่างแบรกกเกตเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา

ลวดเบต้าทรี 2	0	1
0		0.332
1	0.332	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย สรุปผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันจะต้องมีขนาดแรงที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตอบสนองของเนื้อเยื่อ และเกิดการเคลื่อนฟันที่ต้องการ ซึ่งอัตราของการเคลื่อนฟันนั้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดแรงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง หลังจากนั้นการเพิ่มขนาดแรงอีกจะไม่ทำให้การเคลื่อนฟันเพิ่มขึ้น

เมื่อมีการเคลื่อนฟันด้วยวิธีการเลื่อนไกลจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรคเกตขึ้น ซึ่งแรงเสียดทานนี้อาจทำให้เนื้อเยื่อที่รองรับฟันไม่ได้รับแรงในช่วงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟัน เนื่องจากแรงที่ให้กับฟันจะสูญเสียไปกับแรงเสียดทาน ส่วนแรงที่เหลือจึงส่งต่อไปยังเนื้อเยื่อที่รองรับฟันเพื่อให้เกิดการเคลื่อนฟัน แรงที่ให้กับฟันจึงต้องมีขนาดแรงที่เพียงพอในการเอาชนะแรงเสียดทาน และยังคงอยู่ในช่วงของแรงที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนฟันได้มากที่สุด (1, 6, 37) ดังนั้นเมื่อมีแรงเสียดทานระหว่างลวดและแบรคเกตมาก แรงที่จะใช้ในการเคลื่อนฟันย่อมมากขึ้นไปด้วย ซึ่งอาจจะมากเกินไปของแรงที่เหมาะสมในฟันนั้นๆ จึงส่งผลต่อฟันที่เป็นหลักยึด ทำให้เกิดการสูญเสียหลักยึด และไม่สามารถที่จะลดการเหลื่อมของฟันในแนวราบ (overjet) ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการสบฟันและความสวยงาม

การวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะแรงเสียดทานสถิตระหว่างลวดและแบรคเกต และศึกษาในลวดขนาด 0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว เนื่องจากเป็นขนาดลวดส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไกลในแบรคเกตขนาด 0.018 นิ้ว x 0.025 นิ้ว และการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงทางคลินิกนั้นไม่ได้เป็นการเคลื่อนแบบต่อเนื่อง แต่จะเคลื่อนในลักษณะล้มเอียงและตั้งตรงเป็นช่วงๆ ไป หมายถึงตัวฟันจะเคลื่อนที่แบบล้มเอียงไปก่อนจนกระทั่งเกิดมุมทแยงขึ้นระหว่างลวดและแบรคเกต หลังจากนั้นจะเกิดแรงคู่ควบทำให้รากฟันตั้งตรง แล้วจึงเคลื่อนต่อไปด้วยวงจรรนี้ (3, 28, 30, 45) ดังนั้นการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไกลจึงขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานสถิตมากกว่าแรงเสียดทานจลน์

การที่เลือกศึกษาเฉพาะที่มุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเป็น 0 และ 1 องศา เนื่องจากมุม 0 องศา เป็นมุมที่เกิดขึ้นหลังจากการที่ฟันมีการปรับระดับเรียบร้อยและพร้อมที่จะทำการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนไกล และมุม 1 องศา เป็นมุมวิกฤตที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างร่องแบรคเกต ขนาดลวด และความกว้างของแบรคเกต (24) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อตัวฟันเริ่มเคลื่อนที่

แบบล้มเฉียงจนทำให้ลวดชนกับแบรคเกตเป็นมุมทะแยง ซึ่งการเคลื่อนพื้นแบบเลื่อนไถลจะเคลื่อนแบบล้มเฉียงสลับกับตั้งตรงไปเรื่อยๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

จากผลการวิจัยที่ศึกษาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าไทเทเนียมชนิดที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเป็น 0 และ 1 องศา พบว่าเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเป็น 0 องศา ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าลวดฮันนีดิว ลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 มีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 40.58, 52.92, และ 74.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา (1-3, 10, 16-18) ที่พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าแรงเสียดทานน้อยที่สุด แต่ขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Burstone และ Farzin-Nia (14) ที่พบว่าลวดฮันนีดิวมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งอาจเนื่องมาจากวิธีการทดลองที่แตกต่างกันได้แก่ การใช้แผ่น 1 คู่ (Flats) แทนแบรคเกต ความเร็วของครอสเฮด และการให้แรงกดแทนการมัดด้วยวงแหวนยาง ในการวิจัยครั้งนี้ได้ควบคุมตัวแปรที่อาจส่งผลต่อการเกิดแรงเสียดทาน เช่น ขนาดลวด การมัดวงแหวนยาง ขนาดแบรคเกต มุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกต ตำแหน่งที่ให้แรง เป็นต้น ดังนั้นค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานสถิตที่ต่างกันนี้น่าจะมาจากความหยาบพื้นผิวของลวดชนิดนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Kusy และคณะ (19) ที่พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีพื้นผิวที่เรียบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับลวดเบต้าไทเทเนียมที่ยังไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ยังไม่เคยมีการศึกษาถึงลักษณะพื้นผิวของลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิดนี้

นอกจากนี้ผลการวิจัยพบว่าเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรคเกตเป็น 1 องศา ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมยังคงมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตที่น้อยที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับลวดฮันนีดิวพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าลวดฮันนีดิวยังมีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกด้วย ซึ่งอาจเนื่องมาจากลวดฮันนีดิวมีความแข็งตึงกว่าลวดเบต้าทรีทั้ง 2 ชนิด ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้เมื่อมีมุมกระทำที่ไม่เกินค่ามุมวิกฤต ความแข็งตึงของลวดที่น้อยจะทำให้เกิดการบิดงอ ซึ่งส่งผลให้เพิ่มขนาดแรงเสียดทานและเกิดการยึดติด (6) และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าลวดฮันนีดิว ลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 มีค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 19.70, 58, และ 58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการวิจัยที่ศึกษาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 และ 1 องศา ในลวดชนิดเดียวกัน พบว่าค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นในลวดทุกชนิดเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเพิ่มขึ้นจาก 0 องศา เป็น 1 องศา โดยพบว่าค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดฮันนีดีว ลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 มีค่าเพิ่มขึ้น 18.67, 1.04, 22.61, และ 7.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเพียง 2 ชนิด คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และลวดเบต้าทรี 1 ซึ่งแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีมุมกระทำเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา (4, 45, 46) เนื่องมาจากการบิดหมุนของแบรกกเกตทำให้เกิดการชนของลวดและแบรกกเกตเป็นมุมทะแยง จึงทำให้แรงที่ลวดกดลงบนแบรกกเกตเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

โดยส่วนมากลวดเบต้าไทเทเนียมได้ถูกนำมาใช้ในการเคลื่อนพื้นแบบเชกเมนต์ ซึ่งจะใช้ลูปชนิดต่างๆ ในการเคลื่อนพื้น เนื่องจากลวดเบต้าไทเทเนียมมีคุณสมบัติเด่น คือ มีอัตราการคืนกลับของลวดมากหลังจากแอคติเวททำให้ได้แรงที่สม่ำเสมอ จึงทำให้มีหลายบริษัทที่พยายามปรับปรุงคุณสมบัติในด้านอื่น เช่น ลดแรงเสียดทาน เพื่อที่จะสามารถนำลวดชนิดนี้มาใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่แพ้สารนิกเกิล

ถึงแม้ว่าการวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ยังไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว แต่ได้มีการวิจัยมากมายที่ศึกษาถึงขนาดแรงเสียดทานของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ยังไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยผลการวิจัยเหล่านี้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานอยู่ที่ 1.338 ถึง 6.16 นิวตัน (2, 21, 37, 45) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยครั้งนี้พบว่ามีความมากกว่าค่าเฉลี่ยของลวดเบต้าไทเทเนียมที่ที่แรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด ถึงแม้ว่าการทดลองเหล่านี้ทำในสภาวะแห้ง ที่อุณหภูมิห้อง ลวดและร่องแบรกกเกตมีขนาดเดียวกันกับการวิจัยครั้งนี้ แต่วิธีการทดลองในเรื่องความเร็วของครอสเฮด ขนาดความกว้างของแบรกกเกต วิธีการมัดลวดเข้ากับพื้น และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยแตกต่างกัน จึงไม่อาจสามารถที่จะสรุปความแตกต่างของลวดทั้ง 2 ชนิดนี้ได้ชัดเจน

จากผลการวิจัยสรุปว่า เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกเกตเป็น 0 องศา พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าแรงเสียดทานน้อยที่สุด แต่เมื่อมุมกระทำเพิ่มเป็น 1 องศา ซึ่งเปรียบเสมือนพื้นเริ่มมีการเคลื่อนที่จนลวดชนกับแบรกกเกต พบว่า ค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดฮันนีดีวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงอาจกล่าวได้ว่าลวดฮันนีดีวสามารถถูกนำมาใช้แทนลวดเหล็กกล้าไร้สนิมได้ แต่ปริมาณแรงที่จะทำให้พื้นเคลื่อนในลวดฮันนีดีวจะต้องมากกว่าในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องจากที่มุมกระทำเป็น 0 องศา ลวดฮันนีดีวยังคงมีแรงเสียดทานมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

สรุปผลการวิจัย

1. เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटเป็น 0 องศา พบว่าแรงเสียดทานสถิตเรียงลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดฮันนี่ดีว ลวดเบต้าทรี 1 และลวดเบต้าทรี 2 โดยที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าแรงเสียดทานสถิตน้อยที่สุดซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำทั้ง 3 ชนิด
2. เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटเป็น 1 องศา พบว่าแรงเสียดทานสถิตเรียงลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดฮันนี่ดีว และลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 ซึ่งมีค่าแรงเสียดทานสถิตเท่ากัน โดยที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดฮันนี่ดีวมีค่าแรงเสียดทานสถิตน้อยกว่าลวดเบต้าทรี 1 และเบต้าทรี 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับลวดฮันนี่ดีว
3. แรงเสียดทานสถิตที่เกิดขึ้นในลวดชนิดเดียวกันเมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटเป็น 0 และ 1 องศา พบว่าในลวดทุกชนิดมีค่าแรงเสียดทานสถิตเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटเพิ่มจาก 0 องศา เป็น 1 องศา โดยที่พบว่าค่าแรงเสียดทานสถิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเบต้าทรี 1

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะมุมกระทำระหว่างลวดและแบรกกेटซึ่งเป็นมุมเอียงในแนวใกล้กลาง-ใกล้กลาง (Tip) ซึ่งในบางกรณีทันตแพทย์จัดฟันจะใส่แรงบิดหมุน (Torque) ที่ลวดเพื่อแก้ไขแนวแกนฟันในขณะที่มีการเคลื่อนฟันไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปควรทดลองในสภาวะที่มีแรงบิดหมุนด้วย
2. จากการวิจัยนี้ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมยังคงมีค่าแรงเสียดทานสถิตน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยครั้งถัดไปควรนำลวดเบต้าไทเทเนียมที่มีแรงเสียดทานต่ำนอกเหนือจาก 3 ชนิดนี้ มาทำการศึกษาต่อไปว่าจะมีชนิดใดหรือไม่ที่มีแรงเสียดทานต่ำใกล้เคียงกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

3. การทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สามารถที่จะจำลองสภาพในช่องปากซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานได้ เช่น การเคี้ยว การกลืน การกัด แรงจากกล้ามเนื้อ เป็นต้น ซึ่งในช่วงเวลาเหล่านี้อาจมีผลต่อขนาดแรงเสียดทานที่อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ดังนั้นการที่จะนำผลการวิจัยนี้ไปปรับใช้จริงในทางคลินิก จะต้องประเมินอย่างระมัดระวัง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- (1.) Cacciafesta V, Sfondrini MF, Scribante A, Klersy C, Auricchio F. Evaluation of friction of conventional and metal-insert ceramic brackets in various bracket-archwire combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124(4):403-9.
- (2.) Cash A, Curtis R, Garrigia-Majo D, McDonald F. A comparative study of the static and kinetic frictional resistance of titanium molybdenum alloy archwires in stainless steel brackets. *Eur J Orthod* 2004;26(1):105-11.
- (3.) Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96(5):397-404.
- (4.) Frank CA, Nikolai RJ. A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. *Am J Orthod* 1980;78(6):593-609.
- (5.) Loftus BP, Artun J, Nicholls JI, Alonzo TA, Stoner JA. Evaluation of friction during sliding tooth movement in various bracket-arch wire combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;116(3):336-45.
- (6.) Nanda R, Ghosh J. *Biomechanics in Clinical Orthodontics*. Philadelphia: WB Saunders; 1997.
- (7.) Kapur R, Sinha PK, Nanda RS. Comparison of frictional resistance in titanium and stainless steel brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;116(3):271-4.
- (8.) Rossouw PE. Friction: An overview. *Seminars in Orthodontics* 2003;9(4):218-222.
- (9.) Braun S, Bluestein M, Moore BK, Benson G. Friction in perspective. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;115(6):619-27.
- (10.) Ryan R, Walker G, Freeman K, Cisneros GJ. The effects of ion implantation on rate of tooth movement: an in vitro model. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997;112(1):64-8.
- (11.) Burstone CJ, Goldberg AJ. Beta titanium: a new orthodontic alloy. *Am J Orthod* 1980;77(2):121-32.
- (12.) Brantley WA. *Orthodontic materials Scientific and Clinical Aspects*. New York: Thieme Stuttgart NewYork; 2001.
- (13.) Kusy RP. A review of contemporary archwires: their properties and characteristics. *Angle Orthod* 1997;67(3):197-207.

- (14.) Burstone CJ, Farzin-Nia F. Production of low-friction and colored TMA by ion implantation. *J Clin Orthod* 1995;29(7):453-61.
- (15.) Kusy RP, Whitley JQ. Influence of archwire and bracket dimensions on sliding mechanics: derivations and determinations of the critical contact angles for binding. *Eur J Orthod* 1999;21(2):199-208.
- (16.) Vaughan JL, Duncanson MG, Jr., Nanda RS, Currier GF. Relative kinetic frictional forces between sintered stainless steel brackets and orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1995;107(1):20-7.
- (17.) Tidy DC. Frictional forces in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96(3):249-54.
- (18.) Krishnan V, Kumar KJ. Mechanical properties and surface characteristics of three archwire alloys. *Angle Orthod* 2004;74(6):825-31.
- (19.) Kusy RP, Whitley JQ, Mayhew MJ, Buckthal JE. Surface roughness of orthodontic archwires via laser spectroscopy. *Angle Orthod* 1988;58(1):33-45.
- (20.) Kusy RP, Whitley JQ, de Araujo Gurgel J. Comparisons of surface roughnesses and sliding resistances of 6 titanium-based or TMA-type archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004;126(5):589-603.
- (21.) Kapila S, Angolkar PV, Duncanson MG, Jr., Nanda RS. Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98(2):117-26.
- (22.) Garner LD, Allai WW, Moore BK. A comparison of frictional forces during simulated canine retraction of a continuous edgewise arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1986;90(3):199-203.
- (23.) Angolkar PV, Kapila S, Duncanson MG, Jr., Nanda RS. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98(6):499-506.
- (24.) Kusy RP. Ongoing innovations in biomechanics and materials for the new millennium. *Angle Orthod* 2000;70(5):366-76.
- (25.) Nishio C, da Motta AF, Elias CN, Mucha JN. In vitro evaluation of frictional forces between archwires and ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004;125(1):56-64.

- (26.) Ash JL, Nikolai RJ. Relaxation of orthodontic elastomeric chains and modules in vitro and in vivo. *J Dent Res* 1978;57(5-6):685-90.
- (27.) Brantley WA, Salander S, Myers CL, Winders RV. Effects of prestretching on force degradation characteristics of plastic modules. *Angle Orthod* 1979;49(1):37-43.
- (28.) Bednar JR, Gruendeman GW, Sandrik JL. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;100(6):513-22.
- (29.) Shivapuja PK, Berger J. A comparative study of conventional ligation and self-ligation bracket systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;106(5):472-80.
- (30.) Edwards GD, Davies EH, Jones SP. The ex vivo effect of ligation technique on the static frictional resistance of stainless steel brackets and archwires. *Br J Orthod* 1995;22(2):145-53.
- (31.) Sims AP, Waters NE, Birnie DJ, Pethybridge RJ. A comparison of the forces required to produce tooth movement in vitro using two self-ligating brackets and a pre-adjusted bracket employing two types of ligation. *Eur J Orthod* 1993;15(5):377-85.
- (32.) Sims AP, Waters NE, Birnie DJ. A comparison of the forces required to produce tooth movement ex vivo through three types of pre-adjusted brackets when subjected to determined tip or torque values. *Br J Orthod* 1994;21(4):367-73.
- (33.) Berger JL. The influence of the SPEED bracket's self-ligating design on force levels in tooth movement: a comparative in vitro study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;97(3):219-28.
- (34.) Tanne K, Matsubara S, Shibaguchi T, Sakuda M. Wire friction from ceramic brackets during simulated canine retraction. *Angle Orthod* 1991;61(4):285-90; discussion 291-2.
- (35.) Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley JC. Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98(5):398-403.
- (36.) Downing A, McCabe J, Gordon P. A study of frictional forces between orthodontic brackets and archwires. *Br J Orthod* 1994;21(4):349-57.

- (37.) Bazakidou E, Nanda RS, Duncanson MG, Jr., Sinha P. Evaluation of frictional resistance in esthetic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997;112(2):138-44.
- (38.) Omana HM, Moore RN, Bagby MD. Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J Clin Orthod* 1992;26(7):425-32.
- (39.) Kusy RP, Whitley JQ. Coefficients of friction for arch wires in stainless steel and polycrystalline alumina bracket slots. I. The dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98(4):300-12.
- (40.) Keith O, Kusy RP, Whitley JQ. Zirconia brackets: an evaluation of morphology and coefficients of friction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;106(6):605-14.
- (41.) Kusy RP, Whitley JQ, Ambrose WW, Newman JG. Evaluation of titanium brackets for orthodontic treatment: part I. The passive configuration. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998;114(5):558-72.
- (42.) Ogura M, Yamagata K, Kubota S, Kim JH, Kuroe K, Ito G. Comparison of tooth movements using Friction-Free and preadjusted edgewise bracket systems. *J Clin Orthod* 1996;30(6):325-30.
- (43.) Ogata RH, Nanda RS, Duncanson MG, Jr., Sinha PK, Currier GF. Frictional resistances in stainless steel bracket-wire combinations with effects of vertical deflections. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;109(5):535-42.
- (44.) Moore JC, Waters NE. Factors affecting tooth movement in sliding mechanics. *Eur J Orthod* 1993;15(3):235-41.
- (45.) Tselepis M, Brockhurst P, West VC. The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;106(2):131-8.
- (46.) Articolo LC, Kusy RP. Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;115(1):39-51.
- (47.) Yamaguchi K, Nanda RS, Morimoto N, Oda Y. A study of force application, amount of retarding force, and bracket width in sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;109(1):50-6.
- (48.) Kusy RP. Influence of force systems on archwire-bracket combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005;127(3):333-42.

- (49.) Downing A, McCabe JF, Gordon PH. The effect of artificial saliva on the frictional forces between orthodontic brackets and archwires. *Br J Orthod* 1995;22(1):41-6.
- (50.) Baker KL, Nieberg LG, Weimer AD, Hanna M. Frictional changes in force values caused by saliva substitution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987;91(4):316-20.
- (51.) Kusy RP, Whitley JQ, Prewitt MJ. Comparison of the frictional coefficients for selected archwire-bracket slot combinations in the dry and wet states. *Angle Orthod* 1991;61(4):293-302.
- (52.) Kusy RP, Whitley JQ. Influence of fluid media on the frictional coefficients in orthodontic sliding. *Seminars in Orthodontics* 2003;9:281-289.
- (53.) Husmann P, Bourauel C, Wessinger M, Jager A. The frictional behavior of coated guiding archwires. *J Orofac Orthop* 2002;63(3):199-211.
- (54.) Kusy RP, Tobin EJ, Whitley JQ, Sioshansi P. Frictional coefficients of ion-implanted alumina against ion-implanted beta-titanium in the low load, low velocity, single pass regime. *Dent Mater* 1992;8(3):167-72.
- (55.) Kula K, Phillips C, Gibilaro A, Proffit WR. Effect of ion implantation of TMA archwires on the rate of orthodontic sliding space closure. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998;114(5):577-80.
- (56.) Kusy RP, Keith O, Whitley JQ, Saunders C. Coefficient of friction characterization of surface-modified polycrystalline alumina. *J Am Ceramic Soc* 1993;76:336-342.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 10 ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกิดเป็น 0 และ 1 องศา

มุม	แรงเสียดทานสถิต (นิวตัน)											
0	.444	.483	.544	.557	.565	.597	.615	.630	.711	.734	.747	.768
1	.556	.558	.639	.656	.677	.732	.753	.767	.794	.849	.880	.914

ตารางที่ 11 ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 1 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกิดเป็น 0 และ 1 องศา

มุม	แรงเสียดทานสถิต (นิวตัน)											
0	.867	.877	.897	.906	.928	.934	.938	.941	.948	.960	.969	1.143
1	.819	.923	.954	1.009	1.180	1.219	1.236	1.237	1.258	1.331	1.348	1.350

ตารางที่ 12 ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดฮันนี่ดิว เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกิดเป็น 0 และ 1 องศา

มุม	แรงเสียดทานสถิต (นิวตัน)											
0	.670	.699	.746	.762	.778	.838	.845	.896	.976	1.033	1.045	1.100
1	.712	.737	.746	.761	.765	.792	.830	.855	.979	1.019	1.150	1.151

ตารางที่ 13 ข้อมูลค่าแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแปรงเกิดเป็น 0 และ 1 องศา

มุม	แรงเสียดทานสถิต (นิวตัน)											
0	.692	.710	.857	.949	1.052	1.175	1.177	1.218	1.222	1.230	1.280	1.308
1	.887	.923	.984	1.019	1.088	1.110	1.171	1.227	1.236	1.319	1.440	1.459

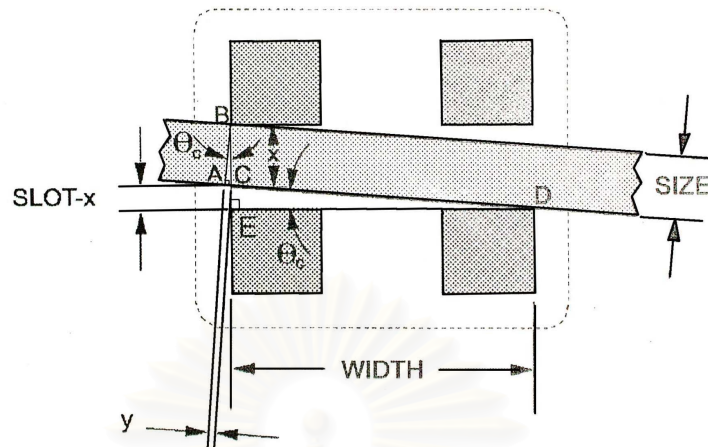
ตารางที่ 14 การทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเบต้าทรี 1 ลวดฮันนีดีว และลวดเบต้าทรี 2 เมื่อมีมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตเป็น 0 และ 1 องศา

	Sig.
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวด 4 ชนิดที่มุม 0 องศา	.000
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวด 4 ชนิดที่มุม 1 องศา	.287

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตเมื่อมุมกระทำระหว่างลวดและแบร็กเกตเป็น 0 และ 1 องศา ในลวดแต่ละชนิด

	Sig.
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม	.682
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 1	.001
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดฮันนีดีว	.671
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสถิตของลวดเบต้าทรี 2	.476

การหาค่ามุมวิกฤต



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดลวด ร่องแบรกเกต ความกว้างของแบรกเกตในแนว
ใกล้กลาง-ไกลกลาง และมุม θ_c

การหามุมวิกฤตสามารถหาได้จากสมการดังนี้ โดยดูจากรูปที่ 30

$$\tan\theta_c = \sin\theta_c / \cos\theta_c = (\text{ด้านตรงข้ามมุม } \theta_c) / (\text{ด้านที่ชิดมุม } \theta_c)$$

เมื่อพิจารณาที่สามเหลี่ยม EDC มุม θ_c คือ มุม EDC

$$\tan\theta_c = \overline{EC} / \overline{ED} = (\text{Slot} - x) / \text{Width} \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อพิจารณาที่สามเหลี่ยม ABC มุม θ_c คือ มุม ABC เนื่องจากเป็นสามเหลี่ยมคล้ายกับ
สามเหลี่ยม EDC

$$\cos\theta_c = \text{Size} / x$$

$$x = \text{Size} / \cos\theta_c \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อนำสมการที่ 2 มาแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้

$$\tan\theta_c = [\text{Slot} - (\text{Size} / \cos\theta_c)] / \text{Width}$$

คูณด้วย $\cos\theta_c$ ตลอด จะได้

$$\sin\theta_c = [\text{Slot} (\cos\theta_c) - \text{Size}] / \text{Width}$$

$$\text{Size} = -\text{Width} (\sin\theta_c) + \text{Slot} (\cos\theta_c)$$

หารด้วย Slot ตลอด จะได้

$$\text{Size} / \text{Slot} = (-\text{Width} / \text{slot}) \sin\theta_c + \cos\theta_c \quad \text{สมการที่ 3}$$

กรณีที่มุม θ_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 องศา $\sin\theta_c \approx \pi\theta_c/180$ และ $\cos\theta_c \approx 1$ เมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ 3 จะได้

$$\text{Size / Slot} = -(\text{Width / Slot})(\pi\theta_c/180) + 1$$

คูณด้วย Slot / Width โดยตลอด จะได้

$$(\text{Slot / Width})(\text{Size / Slot}) = -\pi\theta_c/180 + (\text{Slot / Width})$$

$$(\text{Slot / Width})(\text{Size / Slot}) - (\text{Slot / Width}) = -\pi\theta_c/180$$

$$\theta_c = 180/\pi[-(\text{Slot / width})(\text{Size / Slot}) + (\text{Slot / Width})]$$

$$\theta_c = (180/\pi)(\text{Slot / width}) [- (\text{Size / Slot}) + 1]$$

$$\theta_c = \frac{180/\pi [1 - (\text{Size / Slot})]}{(\text{Width / Slot})}$$

$$\theta_c = \frac{57.32 [1 - (\text{Size / Slot})]}{(\text{Width / Slot})}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จินจุฑา ตันติไชยบริบูรณ์ เกิดวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิตจากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544 ทำงานเป็นพนักงานมหาวิทยาลัยที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นเวลา 7 เดือน และได้ลาออกมาทำงานเอกชนที่จังหวัด กรุงเทพมหานครเป็นเวลา 1 ปี 5 เดือน และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย