



การเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุน
ด้วยเครื่องระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอดจ์เทเปอร์เ็นคอร์

COMPARISON OF CYCLIC FATIGUE RESISTANCE OF PROTAPER NEXT
AND EDGETAPER ENCORE NICKEL-TITANIUM ROTARY FILE SYSTEM

วศินี แก้วอำไพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของฟิสิกส์เกลไทเทเนียมชนิดหมุน
ด้วยเครื่องระบบโพรมิเตอร์เน็กซ์และระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

COMPARISON OF CYCLIC FATIGUE RESISTANCE OF PROTAPER NEXT
AND EDGETAPER ENCORE NICKEL-TITANIUM ROTARY FILE SYSTEM



WASINEE KAEWUMPAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Clinical Dentistry)

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของฟลีนิกเกลไทเทเนียมชนิดหมุน
ด้วยเครื่องระบบโพรมิเตอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์

ของ

วศินี แก้วอำไพ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ.ชีนาลย์ ปิยะชน) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทพ.วรรณธนะ
สัตตบรรณสุข)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ทพญ.จารุมา ศักดิ์ดี)

ชื่อเรื่อง	การเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์
ผู้วิจัย	วศินี แก้วอำไพ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ชินาลัย ปิยะชน

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบระหว่างไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ ทำการศึกษาด้วยอุปกรณ์ทดสอบความล้าจากการหมุนรอบแบบคลองรากฟันจำลองที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง ใช้ไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ขนาดเอ็กซ์ทูอย่างละ 15 ตัว ทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวการหมุนของไฟล์ภายในคลองรากฟันจำลองจนกระทั่งหัก บันทึกเวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหักเพื่อนำไปคูณกับความเร็วรอบคำนวณเป็นจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก เปรียบเทียบด้วยการทดสอบที (Independent t-test) ที่ระดับนัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 นำส่วนปลายของไฟล์ที่หักมาวัดความยาวและสำรวจพื้นผิวรอยหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเพื่อวิเคราะห์กลไกการหักที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีจำนวนรอบการหมุนก่อนหักสูงกว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้มีตำแหน่งการหักที่ไม่แตกต่างกัน และภาพพื้นผิวรอยหักของไฟล์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าไฟล์ทุกตัวแสดงพื้นผิวการแตกหักในรูปแบบกลไกการหักด้วยความล้าจากการหมุนรอบ จากการศึกษาสรุปได้ว่า ไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์

คำสำคัญ : ความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ, กระบวนการความร้อน, ไฟลนิกเกิลไทเทเนียม

Title	COMPARISON OF CYCLIC FATIGUE RESISTANCE OF PROTAPER NEXT AND EDGETAPER ENCORE NICKEL-TITANIUM ROTARY FILE SYSTEM
Author	WASINEE KAEWUMPAI
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Chinalai Piyachon

The aim of this study was to compare the cyclic fatigue resistance of the ProTaper Next and the EdgeTaper Encore rotary system. The cyclic fatigue testing of the instruments was performed in a newly invented artificial canal. A total of fifteen X2 new instruments of each brand were tested. The motion of file rotation in an artificial canal was recorded until file separation was observed. The time of file rotation before the fracture was recorded and calculated by multiplication by the speed of rotation to get the number of cycles to failure (NCF). The length of the fractured fragment was also recorded. The data were analyzed statistically using an independent t-test at $P < 0.05$. A scanning electron microscope was used to characterize the topographic features of the fracture surface. The results showed that the EdgeTaper Encore had a significantly higher number of cycles to failure than ProTaper Next. There were no significant differences ($P > 0.05$) found between groups for the length of the fracture parts. All fractured surfaces revealed typical features of cyclic fatigue fractures. In conclusion, the EdgeTaper Encore rotary system had a higher number of cycles to failure than ProTaper Next. This implies that the EdgeTaper Encore rotary system had more resistance to cyclic fatigue failure in comparison to the ProTaper Next rotary system.

Keyword : cyclic fatigue resistance, Heat treatment, Nickel-Titanium rotary file

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จอย่างสูงจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ชินาลัย ปิยะชน ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดี ตลอดจนการดูแลด้วยความเอาใจใส่ ทำให้ผู้วิจัยสามารถแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ได้อย่างราบรื่น

ขอกราบขอบพระคุณนายโมษิต วงศ์ปิ่นแก้ว และนางสาวศิริวรรณ อ่วมปาน วิศวกรประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่มอบความรู้และให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ภาพชิ้นงานในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย และเพื่อนทุกคน สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนที่ดีเสมอมา

วศินี แก้วอำไพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
คำถามงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย	2
จุดมุ่งหมายของการวิจัย	3
ขอบเขตการวิจัย	3
ตัวแปรที่ศึกษา.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
กรอบแนวคิดวิจัย	5
สมมติฐานการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ปัจจัยที่มีผลต่อการหักของไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง	9
ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์	21
ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์	22
การทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง	23

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
วัสดุอุปกรณ์	29
ขั้นตอนการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ	31
การตรวจสอบผิวเครื่องมือด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	31
การทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ	31
การตรวจสอบไฟล์ภายหลังการทดสอบ.....	32
การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา	33
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	36
สรุปผล	36
อภิปรายผล.....	36
ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	42
ภาคผนวก.....	43
ประวัติผู้เขียน.....	46

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าเฉลี่ยความยาวส่วนปลายของไฟล์ที่หัก	33
ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหัก และจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก	33
ตาราง 3 ตารางบันทึกเวลาและจำนวนรอบก่อนหักของเครื่องมือ	44



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 พื้นผิวรอยหักของไฟล์ที่เกิดจากแรงบิดภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (14)	7
ภาพประกอบ 2 พื้นผิวรอยหักของเครื่องมือที่เกิดจากความล้าจากการหมุนรอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (14)	8
ภาพประกอบ 3 พื้นผิวของไฟล์ (ก) ระบบโพไฟลวอร์เท็กซ์บลู (ข) ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็ม	9
ภาพประกอบ 4 รูปร่างหน้าตัดของไฟล์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอเลเมนต์ (finite element analysis)(19)	10
ภาพประกอบ 5 (ก) หน้าตัดของไฟล์รูปสี่เหลี่ยมแบบต่างๆ (ข) กราฟเส้นแสดงความยืดหยุ่นต่อการโค้งงอ (20)	11
ภาพประกอบ 6 การจัดเรียงอะตอมของโลหะนิกเกิลไทเทเนียม(28).....	13
ภาพประกอบ 7 (ก) หน้าตัดของไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ (20) และ (ข) การหมุนของไฟล์แบบไม่สมมาตร (28).....	19
ภาพประกอบ 8 ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์(58)	21
ภาพประกอบ 9 ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์(10)	22
ภาพประกอบ 10 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Pruett และคณะ(18)	24
ภาพประกอบ 11 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Li และคณะ(63).....	25
ภาพประกอบ 12 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Zinelisและคณะ (61)	25
ภาพประกอบ 13 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Haikel และคณะ(65).....	26
ภาพประกอบ 14 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Grande และคณะ (66)	26
ภาพประกอบ 15 ตัวอย่างของคลองรากฟันจำลองตามแบบของ Grande และคณะ(67) ซึ่งมีค่ามุมความโค้ง 60 องศา โดย (ก) รัศมีความโค้ง 2 มิลลิเมตร (ข) รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร	27
ภาพประกอบ 16 ลักษณะคลองรากฟันจำลองของ Grande และคณะ (67)	30

ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์ทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ	30
ภาพประกอบ 18 (ก) ผิวหน้าตัดรอยหักของไฟล้ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข) ภาพมุมคมตัดและ (ค) ลักษณะร้าวขนานที่ กำลังขยาย 2,500 เท่า.....	34
ภาพประกอบ 19 (ก) ผิวหน้าตัดรอยหักของไฟล้ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข) ภาพมุมคมตัดและ (ค) ลักษณะร้าวขนานที่ กำลังขยาย 2,500 เท่า.....	34
ภาพประกอบ 20 ตำแหน่งของไฟล้ที่หักในคลองรากฟันจำลอง	36
ภาพประกอบ 21 พื้นผิวหน้าตัดรอยหักบริเวณพื้นที่ที่เสียหายจากการล้า(สีเขียว)และพื้นที่รับแรง เกินพิกัด(สีเหลือง) ของไฟล้ (ก) ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และ (ข) ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์.....	38
ภาพประกอบ 22 แผนภูมิแสดงจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก(NCF)ของไฟล้ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ (P) และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์(E)	45

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นคือ การหักของไฟล์ขณะใช้งาน ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ รูปร่างคลองรากฟัน การหมุนของเครื่องมือ การออกแบบหน้าตัดและความผายของไฟล์ ร่องรอยหรือจุดบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการการผลิตบนผิววัสดุ รวมถึงวิธีการใช้งาน(1) การหักของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง มีสาเหตุและลักษณะการหัก 2 แบบ คือ การหักจากการบิด (Torsional fracture) การหักจากความล้าจากการหมุนรอบ (Cyclic fatigue fracture)(2) หรือเกิดร่วมกันทั้งสองลักษณะ(3) โดยการหักจากความล้าจากการหมุนรอบ เป็นการหักที่ไม่ปรากฏร่องรอยการชำรุดมาก่อน สามารถเกิดขึ้นได้แม้เป็นไฟล์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อน ไม่สามารถสำรวจความผิดปกติได้ก่อนใช้งาน จึงควรระมัดระวังเป็นอย่างมากหากนำมาใช้งานซ้ำโดยเฉพาะไฟล์ขนาดใหญ่(4) ถึงแม้จะมีคำแนะนำให้จำกัดจำนวนครั้งในการใช้งานแต่ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนถึงจำนวนครั้งที่เหมาะสม นอกจากนั้นการหักของไฟล์เกิดขึ้นได้จากการใช้งานเพียงครั้งเดียว(5) ซึ่งอาจเกิดจากการทำงานหนักในคลองรากฟันที่มีความซับซ้อนหรืออาจเกิดจากจุดบกพร่องบนผิววัสดุในกระบวนการผลิต (3)

ผู้ผลิตไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องได้มีความพยายามในการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาคความล้าของไฟล์ขณะใช้งาน มีการออกแบบรูปร่างหน้าตัด รูปแบบการหมุน รวมทั้งปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะด้วยกระบวนการความร้อน (heat treatment) เพื่อเพิ่มความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ (cyclic fatigue resistance) ให้สูงขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสการแตกหักและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น(6) Elnaghy (7) ศึกษาเปรียบเทียบไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง 4 ระบบ พบว่า ทวิสท์ไฟล์ (Twisted Files, SybronEndo, Orange, CA, USA) มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากที่สุด รองลงมาคือ โปรเทเปอร์เน็กซ์ (Protaper Next, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ไฮฟลิกซ์ซีเอ็ม (HyFlex CM, Coltene-Whaledent, Cuyahoga Falls, USA) และโปรเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล (ProTaper Universal, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ตามลำดับ เนื่องจากไฟล์ระบบทวิสท์ไฟล์ โปรเทเปอร์เน็กซ์ และไฮฟลิกซ์ซีเอ็ม เป็นไฟล์ที่ทำจากโลหะที่ผ่านกระบวนการความร้อน จึงมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูงกว่าไฟล์ระบบโปรเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอลซึ่งไม่ได้ผ่าน

กระบวนการความร้อน และการเปรียบเทียบความต้านทานการบิด (torsional resistance) และการสึกจากการศึกษาของ Elnaghy และ Elsaka(8) พบว่าไฟลระบบโพเทเปอร์เน็กซ์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ไฟลระบบทวิสตีไฟลและเรซ (Race, FKG, La-Chaux De Fonds, Switzerland) ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ทันตแพทย์นิยมใช้ไฟลระบบโพเทเปอร์เน็กซ์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบอื่นๆที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ (EdgeTaper Encore, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) เป็นไฟลที่ผลิตสู่ท้องตลาดเมื่อไม่กี่ปีมานี้ มีการออกแบบรูปร่างของไฟลใกล้เคียงกับระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ โดยมีขนาด รูปร่างหน้าตัด ลักษณะการหมุน และการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน แต่มีราคาจำหน่ายที่ต่ำกว่า จึงทำให้ไฟลระบบนี้ได้รับความสนใจ แต่ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของไฟลระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ การทดสอบสมบัติทางกลของไฟลสามารถทดสอบได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการทดสอบความล้าที่เกิดขึ้น ไฟลหมุนในคลองรากฟันค้ำหรือความล้าจากการหมุนรอบ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไฟลหักในคลองรากฟัน(3) จึงเป็นที่มาของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ซึ่งสนใจการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของไฟลทั้ง 2 ระบบนี้

คำถามงานวิจัย

ไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ และระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ขนาดเอ็กซ์ทู มีความสามารถในการต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่แตกต่างกันหรือไม่

ความสำคัญของการวิจัย

ไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องสามารถทำงานได้ดีในคลองรากฟันค้ำ โดยช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการเตรียมคลองรากฟันได้ แต่การใช้งานไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องมักพบปัญหาที่สำคัญคือ การหักของไฟล เนื่องจากการใช้งานในคลองรากฟันค้ำทำให้ไฟลเกิดความล้าจากการหมุนรอบและนำไปสู่การแตกหักได้ที่ระยะเวลาหนึ่ง (9) การหักของไฟลจะส่งผลให้การรักษาคคลองรากฟันมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น สำหรับไฟลระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ ซึ่งเป็นระบบใหม่ที่มีจำหน่ายภายในประเทศ ทางบริษัทผู้ผลิตระบุว่าเป็นไฟลที่ผ่านกระบวนการความร้อนประเภทไฟร์ไวร์ (Firewire) ทำให้มีความยืดหยุ่น(flexibility) ที่ดีและมีความแข็งแรง(10) อย่างไรก็ตามการจะนำไฟลระบบใหม่มาใช้งานในคลินิก ควรมีการทดสอบ

ความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบก่อน เพื่อประมาณการจำนวนครั้งของการใช้งานซ้ำและลดความเสี่ยงของการหักในคลองรากฟันคိုင်ได้

เนื่องจากไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีขนาด ความผาย รูปร่างหน้าตัดและการใช้งานไม่แตกต่างจากไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ ในการทดลองนี้จึงได้เลือกไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์มาใช้ในการเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ โดยเลือกใช้ขนาดเอ็กซ์ทู (X2) เนื่องจากการสำรวจของ Fernández และคณะ(3) พบว่าไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ที่ถูกทิ้งส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นขนาดเริ่มต้นที่ใช้ในการขยายคลองรากฟัน โดยเฉพาะไฟล์ขนาดเอ็กซ์ทู ที่มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่น้อยกว่าขนาดเอ็กซ์วัน(X1)(11) และ Pereira และคณะ(12) พบว่าในการเตรียมคลองรากฟันด้วยไฟล์ขนาดเอ็กซ์ทู ไฟล์จะมีความทำงานหนักกว่าไฟล์ขนาดอื่นๆ และได้รับแรงบิด(torque) มากที่สุด ไฟล์ขนาดเอ็กซ์ทูจึงมีโอกาสหักได้บ่อย ดังนั้นไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ขนาดเอ็กซ์ทูจึงมีความสำคัญในการใช้งาน ในการทดสอบครั้งนี้จึงเลือกไฟล์ขนาดเอ็กซ์ทูมาเป็นตัวแทนของระบบไฟล์ในการทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ โดยประเมินจากจำนวนรอบที่ไฟล์หมุนในคลองรากฟันจำลองก่อนการหัก

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อทดสอบสมบัติทางกลของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ขนาดเอ็กซ์ทู ด้วยวิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ (cyclic fatigue testing)

ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น ชนิดของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง

ตัวแปรตาม จำนวนรอบการหมุนของไฟล์ก่อนการหัก

นิยามศัพท์เฉพาะ

1.ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง (Nickel-titanium rotary file) หมายถึง เครื่องมือสำหรับเตรียมคลองรากฟันที่ผลิตจากโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม มีการหมุนโดยเครื่องกล

2.กระบวนการความร้อน (Heat treatment) หมายถึง กรรมวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิตไฟล์ เพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลของโลหะให้ดีขึ้น

3.การหักจากความล้าจากการหมุนรอบ (cyclic fatigue failure) หมายถึง การหักของเครื่องมือที่เกิดจากการหมุนอย่างต่อเนื่องในคลองรากฟันโค้ง ซึ่งทำให้โลหะได้รับแรงดึงและแรงบีบอัดสลับกันต่อเนื่อง จนมีความล้าสะสมและเกิดการหักขึ้น

4.ความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ (Cyclic fatigue resistance) หมายถึง ความสามารถของเครื่องมือที่จะทนทานต่อความล้าของโลหะจากการหมุนรอบในคลองรากฟันโค้ง ที่วัดด้วยการทดสอบความล้า (cyclic fatigue testing) โดยการประเมินระยะเวลาการหมุนของไฟล์ในคลองรากฟันจำลองจนกระทั่งเกิดการหัก หน่วยเป็นวินาที จำนวนรอบการหมุนก่อนการหัก (number of cycles to failure; NCF) คำนวณจากสูตร

$$\text{จำนวนรอบการหมุนก่อนการหัก (NCF)} = \frac{\text{ความเร็วในการหมุน (rpm)} \times \text{เวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหัก (s)}}{60}$$

5.การหักจากการบิด (Torsional fracture) หมายถึง การหักของเครื่องมือที่เกิดจากแรงบิด

6.ความต้านทานการบิด (Torsional resistance) หมายถึง ความสามารถของเครื่องมือในการต้านทานแรงบิดก่อนเกิดการหัก

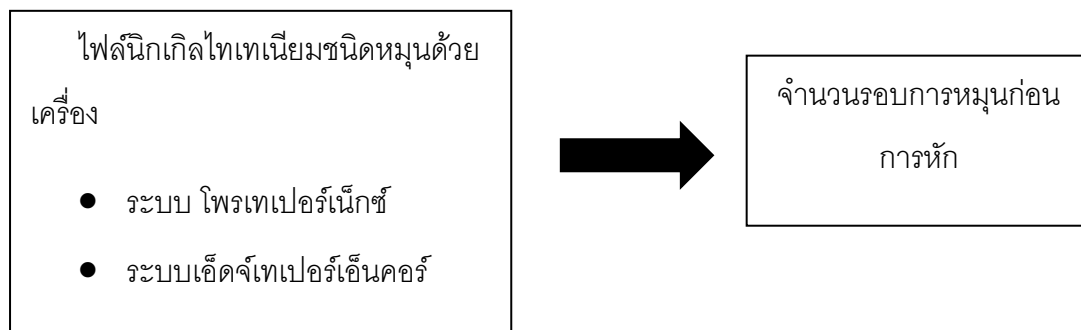
7.ลักษณะการหมุนแบบนอกแกนไฟล์ หมายถึง การหมุนที่มีแนวการหมุนของหน้าตัดเอียงออกจากจุดกึ่งกลางของแกนเครื่องมือ

8.ความเค้น (stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ

9.ความยืดหยุ่น (flexibility) หมายถึง ความสามารถของเครื่องมือในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงและสามารถคืนรูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดการให้แรง

10.ความแข็งแรงทางแนวเฉือน (ultimate shear strength) หมายถึง ความแข็งแรงของเครื่องมือในการต้านทานแรงเฉือนก่อนเกิดการหัก

กรอบแนวคิดวิจัย



สมมติฐานการวิจัย

สมมติฐานหลัก

จำนวนรอบการหมุนก่อนการหักของฟิสิกส์เกิดไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพรทอปเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ ไม่มีความแตกต่างกัน

สมมติฐานรอง

จำนวนรอบการหมุนก่อนการหักของฟิสิกส์เกิดไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพรทอปเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ มีความแตกต่างกัน

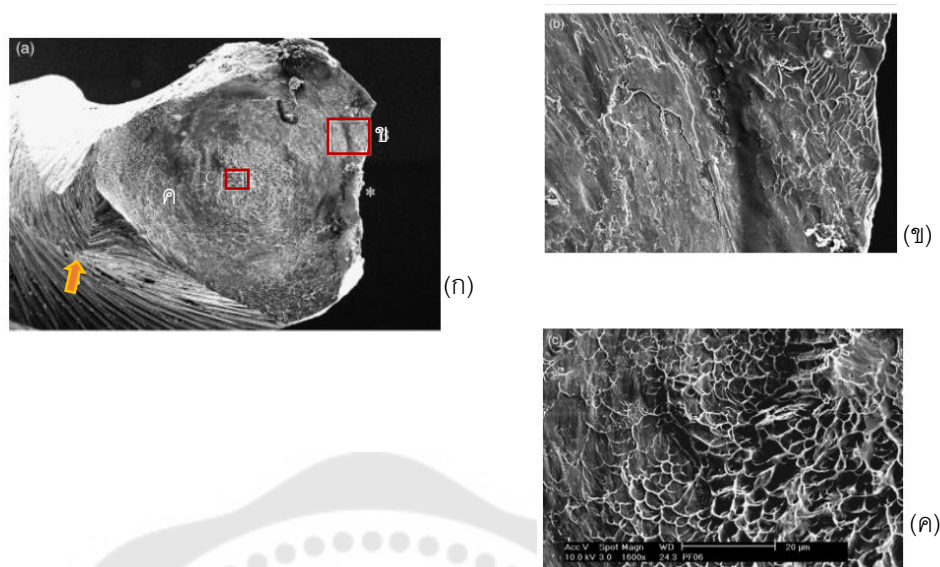
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องที่จำหน่ายในปัจจุบันมีความหลากหลาย และมีเทคนิคการผลิตที่แตกต่างกัน แต่ยังไม่มีการทดสอบประสิทธิภาพอย่างเป็นทางการเป็นมาตรฐาน ปัญหาในการใช้งานทางคลินิกยังคงพบการหักของไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องเกิดขึ้นได้ โดยสามารถเกิดการหักได้มากกว่าไฟล်ที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากโลหะนิเกิลไทเทเนียมมีสมบัติความต้านแรงดึง (tensile strength) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งนี้การหักของไฟล်ภายในคลองรากฟันนั้น จะส่งผลให้การรักษามีความซับซ้อนยิ่งขึ้น(9)

Sattapan และคณะ(2) ได้ศึกษาลักษณะของไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องที่ถูกทิ้งหลังจากมีการใช้งานมากกว่า 6 เดือน พบว่าไฟล်ที่มีการชำรุดส่วนใหญ่เกิดการคลายเกลียว รองลงมาคือมีการหักและการโค้งงอ โดยลักษณะเกลียวที่เปลี่ยนแปลงนั้นพบว่า มีทั้งการคลายเกลียว การบิดเกลียวกลับ หรือมีหลายลักษณะร่วมกัน การเปลี่ยนแปลงลักษณะเกลียวนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) โดยจะเกิดขึ้นก่อนการหัก ทั้งนี้การหักของไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องจะมีลักษณะแตกต่างกันตามแรงที่ได้รับ ได้แก่ การหักจากการบิด (Torsional fracture) และการหักจากความล้าจากการหมุนรอบ (cyclic fatigue failure) หรืออาจพบว่ามีลักษณะทั้งสองเกิดขึ้นร่วมกัน(8)

การหักจากการบิด เป็นการแตกหักของโลหะแบบเหนียว (ductile fracture) จะเกิดขึ้นเมื่อส่วนปลายของไฟล်ยึดติดกับผนังคลองรากฟันขณะที่ไฟล်กำลังหมุนอยู่ ซึ่งอาจมาจากการออกแรงกดไฟล်ไปทางปลายรากฟันมากเกินไป ทั้งนี้จะทำให้เครื่องมือเกิดความเค้นสูงจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ส่งผลให้ไฟล်มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) ก่อนที่จะหัก จึงสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของเกลียวไฟล်ได้(2) โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดแรงเฉือน (shear force) จนมีการเลื่อนไถลของเนื้อโลหะ ส่งผลให้ช่องว่างขนาดเล็ก (microvoid) ที่อยู่ภายใน ยืดยาวขึ้นและขยายตัวจากการเชื่อมรวมกันของช่องว่าง จนภายในเนื้อโลหะมีช่องว่างเพิ่มขึ้น(9) และเกิดการหักในที่สุดจากการรับแรงบิดที่สูงเกินกว่าความแข็งแรงทางแนวเฉือนของโลหะ (ultimate shear strength)(13, 14) ความเค้นที่เกิดจากแรงบิดนี้จะแปรผกผันกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นไฟล်ที่มีขนาดเล็กซึ่งมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยจะเกิดการหักได้ง่ายกว่า เพราะมีความเค้นเกิดขึ้นสูงกว่าไฟล်ขนาดใหญ่(2, 14)

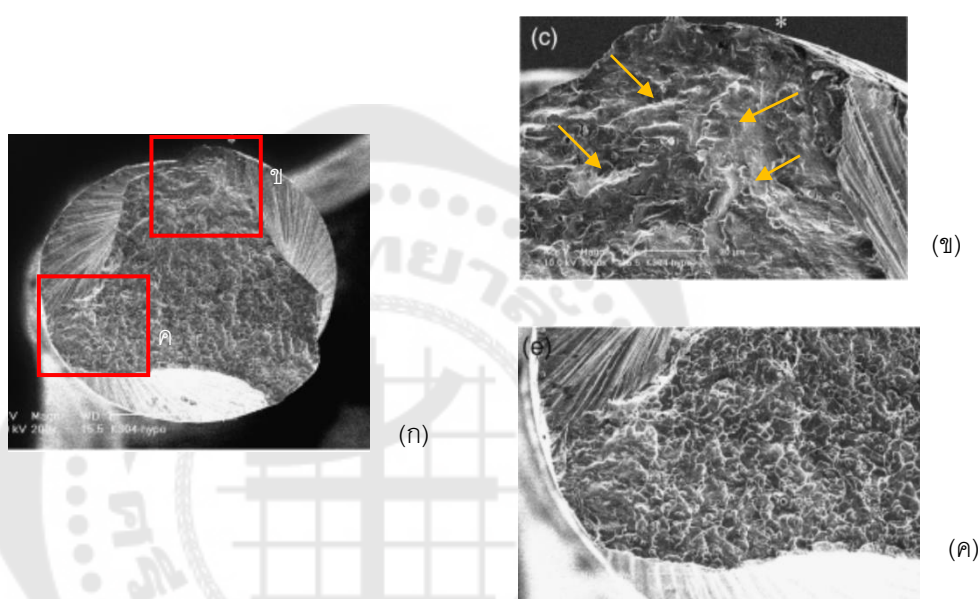


ภาพประกอบ 1 พื้นผิวรอยหักของไฟลท์ที่เกิดจากแรงบิดภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (14)

เมื่อสำรวจลักษณะพื้นผิวของไฟลท์ที่หักจากการฉีกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยายต่ำพบว่า (ภาพประกอบ 1 ก) บริเวณที่ใกล้กับรอยหักจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเกลียวเกิดขึ้น (ลูกศร) และในรอยหักบริเวณที่ใกล้กับส่วนขอบนั้น (ภาพประกอบ 1 ข) จะพบรอยบุ๋มลักษณะรูปวงรีที่ชี้ไปทางจุดเริ่มต้นการหัก (9) ซึ่งเกิดจากช่องว่างภายในโลหะที่ได้รับแรงเฉือน ถัดเข้ามาใกล้กึ่งกลางหน้าตัดจะปรากฏเป็นแนวการขัดสีกันของพื้นผิวที่หัก โดยปรากฏเป็นแถบพื้นผิวเรียบอยู่ล้อมรอบส่วนกึ่งกลาง ในส่วนกึ่งกลางนั้น (ภาพประกอบ 1 ค) จะเห็นเป็นลักษณะคล้ายเส้นใย (fibrous region) ละเอียดเล็กๆ แต่เมื่อส่องด้วยกำลังขยายสูง จะปรากฏเป็นรอยบุ๋มขนาดเล็ก (14)

การหักจากความล้าจากการหมุนรอบ มีลักษณะการหักเป็นแบบเปราะ (brittle fracture) เกิดจากการที่ไฟลท์หมุนอยู่ในคลองรากฟันค้ำเป็นเวลานาน ความค้ำของคลองรากฟันจะทำให้เนื้อโลหะที่อยู่ด้านในส่วนค้ำได้รับแรงบีบอัด (compressive stress) และเนื้อโลหะด้านนอกส่วนค้ำจะได้รับแรงดึง (tensile stress) (9) โดยมีความเค้นเกิดขึ้นได้มากที่สุด ในตำแหน่งที่มีการค้ำงอที่สุดหรือในจุดกึ่งกลางส่วนค้ำ เมื่อไฟลท์หมุนทำให้เกิดแรงบีบอัดและแรงดึงกระทำต่อเนื้อโลหะ สลับไปทุกรอบการหมุนอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นแรงกระทำซ้ำๆ แต่มีระดับความเค้นที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการยืดหยุ่น ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้น หากมีรอยชำรุดเกิดขึ้นที่ผิวเครื่องมือทั้งจากการผลิตหรือการใช้งาน จะเป็นตำแหน่งที่มีการสะสมความเค้น และเป็นจุดเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว

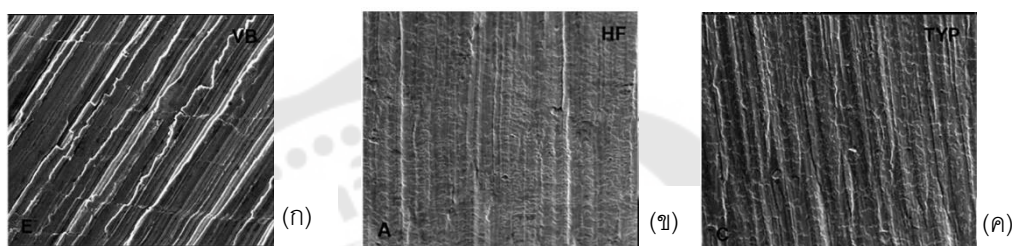
ขนาดเล็ก (microcrack)(15) โดยสามารถเกิดการขยายขอบเขตเพิ่มขึ้นได้ตามแนวผลึก ส่งผลให้ ความแข็งแรงของโลหะลดลงจนไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ และเกิดการหักในที่สุด การหัก ลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับเครื่องมือทุกขนาด แต่สำหรับไฟล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเค้น สะสมภายในได้มากกว่าไฟล์ขนาดเล็ก จึงส่งผลให้มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบน้อย กว่าและมีโอกาสหักได้มากกว่าไฟล์ขนาดเล็ก(5, 13, 14)



ภาพประกอบ 2 พื้นผิวรอยหักของเครื่องมือที่เกิดจากความล้าจากการหมุนรอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (14)

การสำรวจพื้นผิวรอยหักของไฟล์ที่เกิดจากความล้าจากการหมุนรอบ(ภาพประกอบ 2) ในมุมด้านข้างของเกลียวไฟล์ไม่พบเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลียวหรืออาจเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย และขอบรอยหักจะมีลักษณะเรียบ (2) บริเวณขอบของไฟล์ที่ใกล้กับคมตัดจะเป็นจุดเริ่มต้นของ รอยร้าว(ภาพประกอบ 2 ข) ซึ่งจะขยายตัวเข้าไปในเนื้อโลหะและปรากฏเป็นสันนูนมีทิศทาง กระจ่ายออกจากจุดเริ่มต้น(ลูกศร) โดยมีทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงดึงที่ได้รับ(16) เมื่อถัดเข้ามาใน เนื้อโลหะการร้าวบริเวณนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีการหักขึ้นในที่สุด จึงปรากฏเป็นรอยบวม ขนาดเล็ก ที่มีรูปร่างและขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งมีบริเวณไปจนถึงขอบของไฟล์ (ภาพประกอบ 2 ค) (13, 14)

นอกจากนั้นการสำรวจผิวเครื่องมือทางด้านข้าง (lateral surface) ภายหลังจากทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ สามารถพบรอยร้าวบนผิวโลหะที่มีลักษณะเป็นเส้นขนาน (longitudinal crack) ได้ ซึ่งแสดงถึงความเค้นสูงที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะ จากการศึกษาของ Modesto และคณะ(17) พบรอยร้าวลักษณะนี้เกิดขึ้นบนผิวของไฟลระบบไพโรไฟลวอร์เท็กซ์บลู ซึ่งแตกต่างจากไฟลระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็มและไทฟูน (ภาพประกอบ 3) แต่ทั้งนี้รอยร้าวดังกล่าวไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล



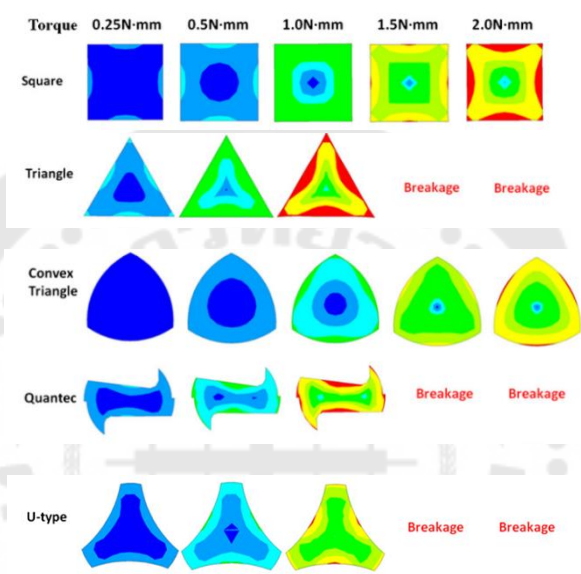
ภาพประกอบ 3 พื้นผิวของไฟล (ก) ระบบไพโรไฟลวอร์เท็กซ์บลู (ข) ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็ม และ (ค) ระบบไทฟูน(17)

ปัจจัยที่มีผลต่อการหักของไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง

การหักของไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย ได้แก่ การออกแบบเครื่องมือ กระบวนการผลิต ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ ลักษณะการหมุนของเครื่องมือ รูปร่างคลองรากฟัน จำนวนครั้งในการใช้งานของเครื่องมือ

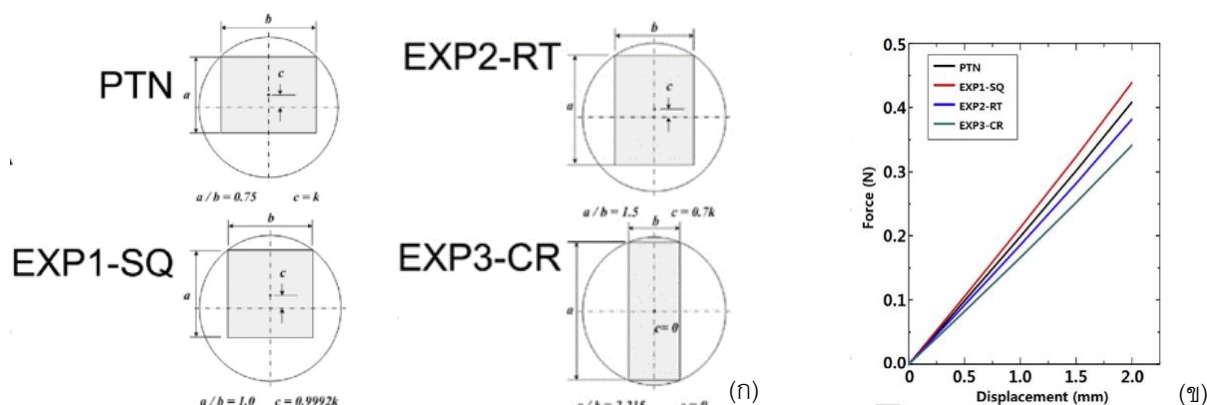
การออกแบบขนาดและรูปร่างหน้าตัดของไฟล มีผลต่อการกระจายแรงและความต้านทานการบิดและการโค้งงอ โดยไฟลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะเกิดการหักจากความล้าจากการหมุนรอบได้เร็วกว่าไฟลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก เนื่องจากไฟลขนาดใหญ่จะสะสมความเค้นในเนื้อโลหะไว้ได้มากกว่า(18) แต่การมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะส่งผลให้ไฟลมีความต้านทานการบิดมากกว่า(9) ส่วนการออกแบบรูปร่างหน้าตัด จากการศึกษาของ Zhang และ คณะ(19) ได้เปรียบเทียบการกระจายความเค้นบนหน้าตัดของไฟลที่มีรูปร่างแตกต่างกัน พบว่าการออกแบบให้ไฟลมีพื้นที่หน้าตัดน้อยลง เช่น หน้าตัดรูปสามเหลี่ยม หรือการออกแบบให้มีร่อง (flute) ลึก เช่น ไฟลที่มีหน้าตัดรูปตัวยู (U-type) และไฟลระบบควอนเทค (Quantec)

(ภาพประกอบ 4) ทำให้ไฟล์มีความต้านทานการบิดน้อยกว่าหน้าตัดแบบอื่นๆ แต่ในทางตรงกันข้ามไฟล์รูปสามเหลี่ยมจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า จึงส่งผลให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่าไฟล์หน้าตัดรูปสามเหลี่ยมมน (convex-triangle) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่า ดังนั้นหากต้องการทำให้ไฟล์ขนาดใหญ่มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สามารถออกแบบได้โดยการทำร่องลึกเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดลง



ภาพประกอบ 4 รูปร่างหน้าตัดของไฟล์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis)(19)

นอกจากนั้นมีการศึกษาของ Ha และคณะ(20) ได้เปรียบเทียบสมบัติของไฟล์หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีจุดกึ่งกลางหน้าตัดอยู่นอกแนวแกนไฟล์(ภาพประกอบ 5 ก) พบว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ (PTN) ที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีความยืดหยุ่นต่อการโค้งงอ (bending flexibility) มากกว่าไฟล์หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (EXP1-SQ) แต่ไฟล์หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีระยะจุดกึ่งกลางหน้าตัดห่างจากแนวแกนไฟล์มากขึ้น พบว่าจะมีความยืดหยุ่นต่อการโค้งงอลดลง (ภาพประกอบ 5 ข)



ภาพประกอบ 5 (ก) หน้าตัดของไฟลรูปสี่เหลี่ยมแบบต่างๆ (ข) กราฟเส้นแสดงความยืดหยุ่นต่อการโค้งงอ (20)

ปัจจัยที่ 2 คือการผลิตโลหะผสมนิเกิลไทเทเนียม ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนที่ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้น โดยเป็นจุดที่อ่อนแอในเนื้อโลหะ หรือการมีช่องว่างขนาดเล็กจากธาตุออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอน หรือไฮโดรเจนเกิดขึ้น(9) นอกจากนั้นการผสมโลหะที่มีการกระจายตัวของธาตุทั้งสองที่ไม่เท่ากันจะทำให้มีช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้นได้ โดยช่องว่างเหล่านี้จะทำให้รอยร้าวมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นได้ง่าย(21) ส่วนวิธีการกลึงผิวโลหะเพื่อให้ได้ความผายและรูปร่างต่างๆ อาจทำให้เกิดรอยบนผิวโลหะขึ้นโดยเฉพาะในเครื่องมือที่มีความผายมาก ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำในบริเวณที่มีรอยเหล่านี้ จะมีการสะสมความเค้นจนเกิดรอยร้าวในตำแหน่งนั้นขึ้นได้ ซึ่งจะมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือ (9, 22) ต่อมาได้มีวิธีการทางเคมีที่เรียกว่า อิเล็กโตรโพลิช (electropolishing) ช่วยให้ผิวเครื่องมือมีความเรียบและแข็งแรงมากขึ้น เครื่องมือที่ผ่านกระบวนการนี้จึงมีความต้านทานการแตกหักที่สูงขึ้น ในการศึกษาของ Anderson และคณะ(23) ได้เปรียบเทียบผลของการทำอิเล็กโตรโพลิช กับไฟลระบบเอ็นโดเวฟ (EndoWave, J Morita Corporation, Osaka, Japan) โปรไฟล์ (ProFile, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) และเรซ โดยพบว่าการทำอิเล็กโตรโพลิชจะช่วยลดความขรุขระบนพื้นผิวโลหะ ส่งผลให้ไฟลมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบและความต้านทานการบิดที่มากกว่าไฟลระบบเดียวกันที่ไม่ผ่านการทำอิเล็กโตรโพลิช

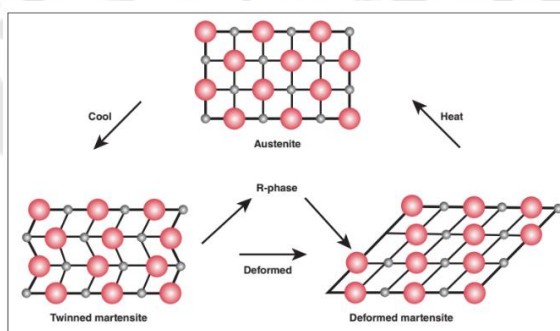
ปัจจัยที่ 3 การปรับสมบัติเชิงกลของโลหะด้วยการผ่านกระบวนการความร้อน (thermomechanical treatment/ heat treatment) เพื่อให้ได้โลหะที่มีสมบัติเชิงกลเหมาะสมกับ

การใช้งาน กระบวนการนี้จะทำให้อุณหภูมิสิ้นสุดออสเทนไนต์ (austenite finish; Af) สูงขึ้น จึงทำให้ขณะใช้งานที่อุณหภูมิร่างกาย โลหะผสมนิเกิลไทเทเนียมจะมีส่วนประกอบของวัฏภาคมาเทนไซต์ (martensite phase) และอาร์เฟส (R phase) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โลหะมีความยืดหยุ่น และมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากขึ้น ตัวอย่างของโลหะผสมนิเกิลไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการความร้อน ได้แก่ โลหะเอ็มไวร์ (M-wire) อาร์เฟส (R phase) ซีเอ็มไวร์ (CM-wire) บลูไวร์ (Blue wire) โกลด์ไวร์ (Gold wire) แมกซ์ไวร์ (MaxWire) และไฟร์ไวร์ (Firewire) เป็นต้น

เอ็มไวร์ (M-wire) ผลิตจากโลหะผสมนิเกิลไทเทเนียม ซึ่งมีโลหะนิเกิลเป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละ 55.8 ต่อน้ำหนักและมีโลหะไทเทเนียมร้อยละ 44.2 ต่อน้ำหนัก ไฟล์ที่ผลิตจากโลหะเอ็มไวร์จะผ่านกระบวนการความร้อน ก่อนนำไปกลึงให้ได้รูปร่างและความฝายที่ต้องการ (6, 24) ผลจากกระบวนการความร้อนนี้ทำให้เอ็มไวร์มีอุณหภูมิสิ้นสุดออสเทนไนต์อยู่ในช่วง 43-50 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิร่างกาย โลหะจะมีส่วนประกอบของวัฏภาคออสเทนไนต์ (austenite phase) ร่วมกับวัฏภาคมาร์เทนไซต์และอาร์เฟส โลหะเอ็มไวร์จึงมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า โลหะนิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม (conventional NiTi) ดังนั้นความเค้นที่ทำให้เกิดวัฏภาคมาร์เทนไซต์ได้นั้นจะมีค่าที่ลดลง โลหะจึงมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น และส่วนประกอบโลหะที่เป็นวัฏภาคมาร์เทนไซต์นี้จะสามารถจัดเรียงอะตอมได้ใหม่เมื่อได้รับแรง จึงทำให้โลหะสามารถต้านทานรอยร้าวได้ดีขึ้น และมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่มากกว่าโลหะนิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม (25) โดยเห็นได้จากการทดสอบของ Gao และคณะ (15) พบว่าไฟล์นิเกิลไทเทเนียมระบบโปรไฟล์เวอร์เท็กซ์ (ProFile Vortex, Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, USA) ซึ่งผลิตจากโลหะประเภทเอ็มไวร์ มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูงกว่า โดยมีจุดเริ่มต้นรอยร้าวเกิดขึ้นน้อยกว่าไฟล์นิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม และการศึกษาของ Elnaghy และคณะ (7) ได้เปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์กับไฟล์ระบบอื่นๆ พบว่า ไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ซึ่งทำจากโลหะเอ็มไวร์ มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่มากกว่า ไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์และโพเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล แต่มีความต้านทานน้อยกว่าไฟล์ระบบทวิสตีไฟล์ ตัวอย่างของไฟล์ที่ผลิตจากโลหะเอ็มไวร์ ได้แก่ โปรไฟล์เวอร์เท็กซ์ โปรไฟล์จีทีซีรีส์เอ็กซ์ (ProFile GT Series X, Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, USA) โพเทเปอร์เน็กซ์ เรซิพรอค (Reciproc, VDW, Munich, Germany) และเวฟวัน (Wave One, Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Switzerland) เป็นต้น (25)

อาร์เฟส (R phase) เป็นโลหะผสมนิเกิลไทเทเนียมประเภทหนึ่งผ่านกระบวนการความร้อน จนเกิดการจัดเรียงอะตอมอยู่ในสภาวะอาร์เฟส ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นในช่วง

คุณสมบัติแบบๆ ระหว่างวัฏภาคออสเทนไนต์ และวัฏภาคมาร์เทนไซต์ (ภาพประกอบ 6) โลหะที่ได้จะมีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ที่ต่ำ จึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) ได้ การผลิตเครื่องมือจึงใช้การบิดเส้นโลหะตรงให้เกิดเป็นเกลียวแทนการกลึงเครื่องมือ หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการความร้อนเพื่อคงรูปร่างโลหะ ซึ่งมีอุณหภูมิสิ้นสุดออสเทนไนต์อยู่ในช่วง 18-25 องศาเซลเซียส จึงทำให้โลหะกลับมาอยู่ที่วัฏภาคออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิร่างกาย ซึ่งโลหะจะมีสมบัติยืดหยุ่นพิเศษ แต่สามารถเปลี่ยนเป็นวัฏภาคมาร์เทนไซต์ได้โดยอาศัยความเค้นที่ต่ำลง โลหะประเภทอาร์เฟสนี้มีความยืดหยุ่นที่สูงกว่านิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม(25) และมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูงใกล้เคียงกับโลหะประเภทเอ็มไวร์(26) แต่มีความต้านทานการบิดน้อยกว่าโลหะนิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม (27) เมื่อเปรียบเทียบกับไฟลระบบอื่นๆ ในการศึกษาของ Elnaghy และคณะ(25) พบว่า ทวิสตีไฟลซึ่งเป็นโลหะนิเกิลไทเทเนียมประเภทอาร์เฟส จะมีความต้านทานการบิดและความต้านทานการโค้งงอน้อยกว่าไฟลระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ซึ่งเป็นโลหะนิเกิลไทเทเนียมประเภทเอ็มไวร์ และไฟลระบบเรซซึ่งเป็นโลหะนิเกิลไทเทเนียมประเภทแมกซ์ไวร์ (8) ตัวอย่างไฟลกลุ่มนี้ได้แก่ ระบบทวิสตีไฟล และทีเอฟอะแดปทีฟ (TF Adaptive, SybronEndo, Orange, CA) นอกจากนี้ยังมีไฟลระบบเคทริกซ์เอฟ (K3XF, SybronEndo, Orange, CA) ซึ่งเป็นอาร์เฟสที่ผ่านการกลึงโลหะให้เป็นเกลียวแทนการบิดเกลียว



ภาพประกอบ 6 การจัดเรียงอะตอมของโลหะนิเกิลไทเทเนียม(28)

ซีเอ็มไวร์ (CM-wire) เป็นโลหะผสมนิเกิลไทเทเนียมที่มีปริมาณของโลหะนิเกิลอยู่ร้อยละ 52 ซึ่งน้อยกว่าโลหะนิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม(6) และได้ผ่านกระบวนการความร้อน จนมีอุณหภูมิสิ้นสุดออสเทนไนต์อยู่ในช่วง 47-55 องศาเซลเซียส ทำให้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิร่างกาย โลหะจะประกอบด้วยวัฏภาคของออสเทนไนต์ มาร์เทนไซต์และมีอาร์เฟสเล็กน้อย(25)

สมบัติของโลหะประเภทซีเอ็มไวร์ภายใต้อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิร่างกายจะสามารถดัดงอหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่มีการคืนรูป แต่จะคืนรูปร่างเดิมได้เมื่อผ่านความร้อนหรือผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclaving procedure) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงอะตอมของวัสดุภาคมาเทนไซต์ที่เป็นส่วนประกอบ ทำให้ขณะใช้งานสามารถควบคุมความโค้งของไฟล์ และช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการเตรียมคลองรากฟันโค้งได้ โลหะประเภทนี้สามารถโค้งงอได้มากโดยมีมุมในการโค้งงอมากกว่าโลหะเอ็มไวร์และแบบดั้งเดิม จึงทำให้โลหะซีเอ็มไวร์มีความยืดหยุ่นและมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่มากกว่าโลหะเอ็มไวร์และแบบดั้งเดิมด้วย(29) ตัวอย่างไฟล์ที่ทำจากโลหะซีเอ็มไวร์ ได้แก่ ไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็มและระบบไทพูน (Typhoon, Clinician's choice Dental Product, New Milford, CT, USA) เป็นต้น(25)

บลูไวร์ (Blue wire) เป็นการปรับปรุงสมบัติของโลหะโดยผ่านการกลึงให้ได้รูปร่างเกลียวและขนาดที่ต้องการ ก่อนเข้าสู่กระบวนการความร้อนและความเย็น ทำให้โลหะมีอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเทไนต์ใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกายคือ 38.5 องศาเซลเซียส ขณะใช้งานโลหะจึงมีวัสดุภาคมาเทนไซต์จำนวนมาก ทำให้ไฟล์มีความอ่อนตัว สามารถดัดให้โค้งงอได้โดยไม่คืนรูป ผิวของโลหะมีชั้นไทเทเนียมออกไซด์ซึ่งมีความหนาประมาณ 60-80 นาโนเมตรทำให้ปรากฏเป็นสีฟ้า(6) ชั้นไทเทเนียมออกไซด์จะทำให้ผิวเครื่องมือมีความแข็งซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพการตัดและทนการสึกได้ดีขึ้น ไฟล์ที่ผลิตด้วยบลูไวร์จะมีความยืดหยุ่นและมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่านิกเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิมและแบบเอ็มไวร์(30) ไฟล์ประเภทบลูไวร์นี้ ได้แก่ ไฟล์ระบบโปรไฟล์วอร์เท็กซ์บลู (ProFile Vortex Blue, Dentsply Tulsa, Dental Specialties, OK, USA) และเรซิพรอคบลู (Reciproc Blue, VDW, Munich, Germany)(25) Nguyen และคณะ(31) ทำการศึกษาพบว่าไฟล์ระบบโปรไฟล์วอร์เท็กซ์บลู มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบและความยืดหยุ่นมากกว่าไฟล์ระบบโปรเทเปอร์เน็กซ์ และโปรเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล

โกลด์ไวร์ (Gold wire) เป็นการปรับสมบัติของโลหะด้วยกระบวนการความร้อนหลังจากการกลึง โลหะที่ได้จะมีอนุภาคของไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium nitride) กระจายบนผิวทำให้ปรากฏเป็นสีทอง(32) และมีอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเทไนต์ที่สูงประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส(33) ในขณะใช้งานไฟล์จะมีวัสดุภาคส่วนใหญ่เป็นมาเทนไซต์และอาร์เฟส จึงมีสมบัติการจดจำรูปร่างและมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี (25) ทำให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบเพิ่มขึ้น ไฟล์ที่ผลิตด้วยวิธีนี้ ได้แก่ โปรเทเปอร์โกลด์ (ProTaper Gold, Dentsply, Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, USA) และเวฟวันโกลด์ (WaveOne Gold, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)(25) จากการศึกษาของ Uygan และคณะ(34) พบว่าไฟล์ระบบโปรเท

เปอร์โกลด์ มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูงกว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และโพเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่าเมื่อมีแรงบิด ส่งผลให้ไฟล์ระบบโพเทเปอร์โกลด์ จึงมีความต้านทานการบิดน้อยกว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล(32)

แมกซ์ไวร์ (MaxWire) เป็นโลหะที่ผ่านกระบวนการความร้อนร่วมกับการทำอิเล็กโตรโพลิซิง โลหะประเภทนี้จะมีอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเตนไนต์ประมาณ 35 องศาเซลเซียส(6) จึงทำให้ในอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) โลหะจะอยู่ในวัฏภาคมาเทนไซต์ซึ่งสามารถดัดรูปร่างได้ แต่เมื่อใช้งานในคลองรากฟันไฟล์จะกลับคืนรูปร่างเดิมร่วมกับการเปลี่ยนวัฏภาคเป็นออสเทนไนต์และจะทำให้ไฟล์มีสมบัติความยืดหยุ่นพิเศษ ไฟล์ที่ผลิตจากแมกซ์ไวร์นี้ ได้แก่ เอ็กซ์พีเอ็นโดเชเปอร์ (XP-endo Shaper, FKG Dentaire, Chaux De Fonds, Switzerland) และเอ็กซ์พีเอ็นโดฟินิเชอร์ (XP-endo Finisher, FKG Dentaire, Chaux De Fonds, Switzerland) ก่อนการใช้งานไฟล์จะมีรูปร่างโค้งงอซึ่งสามารถทำการดัดไฟล์ให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น แต่เมื่ออยู่ในคลองรากฟันโลหะจะเปลี่ยนเป็นวัฏภาคออสเทนไนต์และไฟล์จะมีรูปร่างโค้งงอตามเดิม โดยการโค้งงอนี้ทำให้ไฟล์สามารถเข้าไปทำความสะอาดคลองรากฟันในบริเวณที่ซับซ้อนได้ดี ไฟล์ระบบนี้มีความยาวเพียงร้อยละ 1 จึงทำให้มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูง แต่จะมีความต้านทานการบิดต่ำ(25)

ไฟร์ไวร์ (Firewire) เป็นกระบวนการความร้อนแบบการอบอ่อน (annealed heat treatment; AHT) ที่ทำให้ไฟล์เกิดสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีความยืดหยุ่นที่ดี(35) ส่งผลให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าต่อการหมุนรอบมากขึ้น ส่วนปลายของไฟล์จะมีลักษณะโค้งเล็กน้อยช่วยให้ไฟล์สามารถเข้าทำงานในคลองรากฟันโค้งได้ดี และไฟล์ประเภทไฟร์ไวร์จะมีความอ่อนตัวสามารถดัดโค้งได้(28) ไฟล์ที่ผลิตจากไฟร์ไวร์ ได้แก่ ไฟล์ระบบเอ็ดจ์ไฟล์ (EdgeFile, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) เอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ เอ็ดจ์เทเปอร์แพลตตินัม (EdgeTaper Platinum, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) และเอ็ดจ์วันไฟร์ (EdgeOne Fire, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) (10) Topcuoglu และคณะ(36) ได้เปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบระหว่างเอ็ดจ์ไฟล์กับไฟล์ระบบอื่นๆในคลองรากฟันโค้งรูปตัวเอส พบว่าไฟล์ระบบเอ็ดจ์ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่า ไฟล์ระบบไฮเฟล็กซีซีเอ็ม วันเคิร์ฟ (One curve, Micro-Mega, Besancon, France) และโพเทเปอร์เน็กซ์ทั้งในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิภายในคลองรากฟัน

นอกจากนั้นยังมีการผลิตไฟล์ด้วยวิธีการกัดเซาะโลหะด้วยหลักการทำงานของกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (Electrical discharge machining; EDM) ซึ่งเกิดจากการ

เหนียวของกระแสไฟฟ้าโดยการปล่อยประจุไฟฟ้าไปบนโลหะประเภทซีเอ็มไวร์ (6, 29) จนได้ไฟล์ที่มีรูปร่างหน้าตัดและความผายตามต้องการ การผลิตวิธีนี้จะช่วยลดความขรุขระบนผิวเครื่องมือลงได้ ซึ่งทำให้ไฟล์มีความเค้นสะสมลดลง ไฟล์ที่ผลิตโดยวิธีนี้คือ ไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็ม (Hyflex EDM, Coltene-Whaledent, Altstetten, Switzerland) โดยไฟล์มีอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเตนไต์ที่สูงกว่าไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็ม จึงทำให้โลหะอยู่ในวัฏภาคมาร์เทนไซต์และอาร์เฟสขณะใช้งาน และการผลิตด้วยวิธีนี้จะช่วยให้ผิวเครื่องมือมีความแข็งมากกว่าไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็ม ซึ่งส่งผลให้มีความต้านทานการหักและความสามารถในการตัดที่ดีกว่า(25) ส่วนความยืดหยุ่นของไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มจะใกล้เคียงกับโลหะประเภทซีเอ็มไวร์ ซึ่งทำให้มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูง จากการศึกษาของ Goo และคณะ(29) พบว่าไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบและความต้านทานการบิดมากกว่า ไฟล์ระบบไฮเฟล็กซ์ซีเอ็ม และโพเทเปอร์เน็กซ์

ปัจจัยที่ 4 ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ จากผลการศึกษาที่ผ่านมาอันยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน ทั้งนี้เกิดจากรูปแบบการศึกษาและชนิดของเครื่องมือที่แตกต่างกัน ในการศึกษาของ Pruett และคณะ(18) ได้ทดสอบกับไฟล์ระบบไลท์สปีด (Lightspeed) พบว่า ความเร็วของการหมุนที่แตกต่างกันในคลองรากโค้ง จะไม่มีผลต่อจำนวนรอบการหมุนก่อนการหัก โดยความเร็วรอบที่มากกว่าจะทำให้เกิดความเค้นในเนื้อโลหะเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้เกิดการหักที่เร็วขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Gao และคณะ(15) ที่ทดสอบกับไฟล์ระบบโพไฟล์วอทเท็กซ์ พบว่าไม่มี ความแตกต่างกันของความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ ที่ความเร็ว 300 และ 500 รอบต่อ นาที แต่มีการศึกษาของ Lopes และคณะ(37) ที่ทดสอบกับไฟล์ระบบโพเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอลด้วยความเร็วรอบต่างกัน พบว่ากลุ่มที่ใช้ความเร็ว 600 รอบต่อนาที จะมีจำนวนรอบการหมุนก่อนการหักน้อยกว่า กลุ่มที่ใช้ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เนื่องจากความเร็วที่มากกว่าจะทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อโลหะสูงขึ้น และทำให้มีแรงตึงบนผิวโลหะ (surface tension) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกิดการหักในที่สุด ในขณะที่ความเร็วต่ำจะมีความร้อนเกิดขึ้นอย่างช้าๆและสามารถกระจายไปยังบริเวณโดยรอบได้ ทำให้มีระยะเวลาการหมุนนานขึ้น ดังนั้นการหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำจะทำให้ไฟล์สามารถทนต่อความล้าได้นานกว่า อย่างไรก็ตาม Daugherty และคณะ(38) พบว่าการใช้ความเร็วรอบการหมุน 350 รอบต่อนาที จะทำให้ไฟล์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ช้ากว่าการใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ 150 รอบต่อนาที อาจเนื่องจากการหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าจะเกิดแรงเสียดทานกับตัวไฟล์ได้มากกว่า(14) ทั้งนี้การหักของไฟล์ที่เกิดจากความเร็วในการหมุนอาจมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ผลการศึกษาออกมาแตกต่างกันได้เช่น ประสิทธิภาพการใช้

งาน หรือเทคนิคต่างๆ(39) มีการศึกษาของ Pereira และคณะ(12) ได้วัดแรงบิดสูงสุดจากไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ที่ความเร็วแตกต่างกัน พบว่าในการเตรียมคลองรากฟันจำลองพลาสติก หากขยับไฟล์เข้าออก 4 ครั้งอย่างช้าๆจนถึงความยาวการทำงาน จะทำให้ไฟล์ที่หมุนด้วยความเร็ว 350 รอบต่อนาที เกิดแรงบิดที่ตัวไฟล์ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ความเร็ว 250 และ 300 รอบต่อนาที จากผลดังกล่าวจึงสามารถใช้ไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ด้วยความเร็วรอบสูงได้ โดยร่วมกับการขยับไฟล์ขึ้นลง 4 ครั้งก่อนถึงปลายรากฟัน ซึ่งเป็นการลดแรงกดไฟล์ เพื่อทำให้เกิดแรงบิดต่อไฟล์น้อยที่สุด

ปัจจัยที่ 5 ลักษณะการหมุนของเครื่องมือ เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการหักของเครื่องมือ โดยทั่วไปการหมุนต่อเนื่องในคลองรากฟันโค้ง จะทำให้เนื้อโลหะเกิดแรงดึงและแรงบีบอัดสลับกันต่อเนื่อง จนมีรอยร้าวเกิดขึ้นและขยายตัวภายในเนื้อโลหะ ส่งผลให้เกิดการแตกหักตามมาได้ จึงได้มีการออกแบบลักษณะการหมุนของไฟล์แบบการหมุนแบบไปกลับ (reciprocating motion) คือ มีการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาสลับกันอย่างต่อเนื่อง การหมุนตามเข็มนาฬิกาจะทำให้เกิดการตัดเนื้อฟัน โดยกำหนดให้หมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยมุมที่น้อยเพื่อป้องกันความเค้นที่จะทำให้เครื่องมือหัก สลับกับการหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุมน้อยกว่าการหมุนตามเข็มนาฬิกา (6) จากการศึกษาของ De-Deus และคณะ(40) พบว่าหากนำไฟล์ระบบโพไฟล์ ขนาดเอฟทู มาปรับให้มีการหมุนแบบไปกลับด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที จะทำให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่าการหมุนแบบต่อเนื่องด้วยความเร็ว 200 และ 400 รอบต่อนาที เนื่องจากการหมุนแบบไปกลับจะต้องใช้เวลานานขึ้นในการหมุนให้ครบรอบ 360 องศา จึงทำให้จำนวนรอบการหมุนที่จะเกิดความเค้นแรงดึง (tensile stress) และรอยร้าวได้นั้นลดลง ดังนั้นการหมุนแบบไปกลับสามารถช่วยเสริมสมบัติเชิงกลของโลหะและช่วยลดการหักของเครื่องมือจากความล้าจากการหมุนรอบได้(41) สอดคล้องกับการศึกษาของ Pedulla และคณะ(42) ที่เปรียบเทียบไฟล์ 4 ระบบ ได้แก่ เรซิพรอค เวฟวัน เอ็มทูและทวิสดีไฟล์ โดยมีการตั้งค่าการหมุน 3 แบบ ดังนี้ การหมุนแบบต่อเนื่อง การหมุนไปกลับแบบเรซิพรอคอล (RECIPROCAL) และการหมุนไปกลับแบบเวฟวันอล (WAVEONE ALL) พบว่าการหมุนแบบไปกลับทั้ง 2 แบบทำให้ไฟล์ทุกระบบที่ทำการศึกษามีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่าการหมุนแบบต่อเนื่อง และจากการสำรวจทางคลินิกจะพบอุบัติการณ์การหักและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฟล์ที่หมุนแบบไปกลับเกิดขึ้นน้อย(43) ตัวอย่างไฟล์ที่มีการหมุนแบบไปกลับ ได้แก่ เรซิพรอค เรซิพรอคบลู เวฟวันและเวฟวันโกลด์(25)

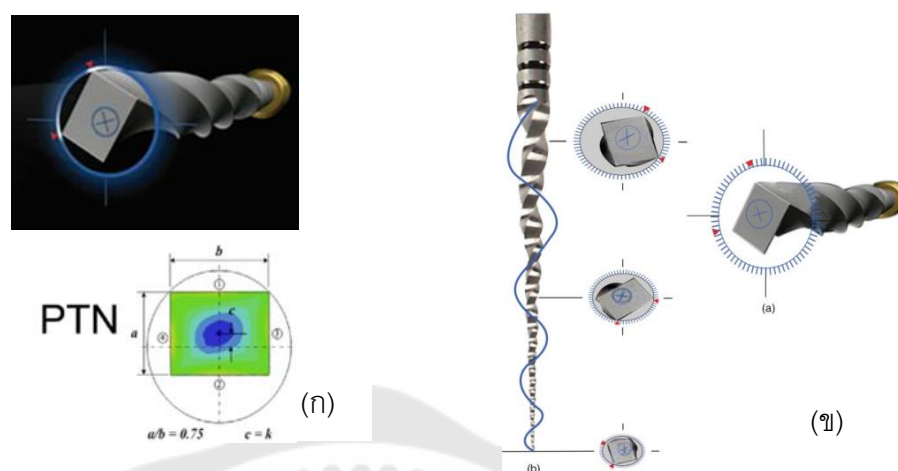
การพัฒนารูปแบบการหมุนอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การหมุนแบบต่อเนื่องร่วมกับการหมุนแบบไปกลับ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานและมีความปลอดภัยมากขึ้น

ตัวอย่างไฟล์ที่มีการหมุนประเภทนี้คือ ไฟล์ระบบจีเนียส (Genius system, Ultradent, SouthJordan, UT,USA) และทีเอฟอะแดปทิฟ เป็นต้น

ไฟล์ระบบจีเนียส จะมีการหมุนแบบไปกลับในช่วงแรกของการเตรียมคลองรากฟัน เพื่อให้เครื่องมือสามารถขยายเข้าไปยังบริเวณปลายรากฟันได้ง่ายและตัดเนื้อฟันได้อย่างปลอดภัยมากขึ้น เมื่อไฟล์สามารถเข้าไปถึงปลายรากฟันได้แล้วการหมุนของไฟล์จะเปลี่ยนเป็นการหมุนแบบต่อเนื่องเพื่อกำจัดเศษเนื้อฟันออกจากคลองรากฟัน(6) จากการศึกษาของ Ozyurek และคณะ(44) พบว่า การทำงานของไฟล์ระบบจีเนียสจะทำให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบในคลองรากฟันรูปตัวเอสมากกว่า ไฟล์ระบบเรซิพรอคบลูและเวฟวันโกลด์ อย่างไรก็ตาม Bueno และคณะ(35) พบว่าไฟล์ระบบจีเนียสมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบน้อยกว่า ไฟล์ระบบเอ็ดจ์ไฟล์เอ็กซ์วัน (EdgeFile X1, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) ที่มีการหมุนไปกลับแบบเวฟวันออก

ไฟล์ระบบทีเอฟอะแดปทิฟ เป็นการเตรียมคลองรากฟันที่อาศัยการหมุนแบบต่อเนื่อง โดยมอเตอร์จะสามารถรับรู้ถึงแรงกดที่เกิดขึ้นกับตัวไฟล์ได้ หากไฟล์มีความต้านทานขณะหมุนเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะปรับการหมุนให้เป็นแบบไปกลับได้เองอัตโนมัติ ช่วยลดความเสี่ยงในการหักและทำให้ตัดและกำจัดเศษเนื้อฟันดีขึ้น เมื่อไฟล์มีความต้านทานลดลงแล้วไฟล์จะกลับมาหมุนต่อเนื่องเช่นเดิม นอกจากนั้นโดยปกติหากไฟล์หมุนต่อเนื่องจนมีมุมการหมุนครบ 600 องศา ไฟล์จะหยุดหมุนเพื่อให้ผลึกในเนื้อโลหะจัดเรียงอนุภาคใหม่ให้เหมาะสมกับความเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อลดโอกาสในการแตกหักได้(6, 45)

การหมุนที่มีแนวแกนการหมุนเอียงออกจากจุดกึ่งกลาง (Eccentric rotary motion) เกิดจากการออกแบบให้จุดกึ่งกลางหน้าตัดของไฟล์อยู่ในตำแหน่งนอกแนวแกนของเครื่องมือ (ภาพประกอบ 7 ก) ในขณะที่มีการหมุนไฟล์จะสัมผัสกับผนังคลองรากฟันเพียงบางจุดเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะการหมุนแบบไม่สมมาตร (ภาพประกอบ 7 ข) จะช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะได้ ไฟล์ที่มีการหมุนลักษณะนี้ ได้แก่ ไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ เอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ เอ็กซ์พีเอ็นโดเซเปอร์ ทูเชป (TRUshape,Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, USA) และเรโวเอส (Revo-S, Micro-mega, Besancon, France) เป็นต้น (6, 46)



ภาพประกอบ 7 (ก) หน้าตัดของไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ (20) และ (ข) การหมุนของไฟล์แบบไม่สมมาตร (28)

การเคลื่อนที่ของไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ภายในคลองรากฟัน เป็นการหมุนต่อเนื่องที่มีลักษณะไม่สมมาตร เนื่องจากขณะหมุนไฟล์จะสัมผัสกับผนังคลองรากฟันเพียง 2 จุด ซึ่งช่วยลดโอกาสการดึงเครื่องมือเข้าไปในคลองรากฟันได้ (screw in effect) และสามารถกำจัดเศษเนื้อฟันออกจากคลองรากฟันได้มากขึ้น(8) จากการเคลื่อนที่ของไฟล์แบบไม่สมมาตรนี้ทำให้การกระจายความเค้นในเนื้อโลหะเปลี่ยนไป โดยความเค้นที่เกิดขึ้นตามแกนไฟล์ (axial stress) จะลดลง ส่งผลให้ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่าไฟล์ที่มีการหมุนแบบสมมาตร(46)

ปัจจัยที่ 6 รูปร่างคลองรากฟัน เป็นปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเค้นสะสมบนผิวเครื่องมือได้ระหว่างที่มีการหมุนอยู่ในคลองรากฟัน(14) จากการศึกษาของ Preutt และคณะ(18) พบว่าปัจจัยจากรัศมีความโค้งและ มุมความโค้งมีผลต่อการหักของเครื่องมือในคลองรากฟัน คลองรากฟันที่มีค่ามุมความโค้งที่มากและรัศมีความโค้งน้อย มีผลให้เกิดความเค้นต่อโลหะมากขึ้นในบริเวณที่คลองรากฟันมีความโค้ง ทำให้จำนวนรอบที่ไฟล์หมุนก่อนการหักลดลง หรือกล่าวได้ว่าไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบลดลง(14) จากการศึกษาของ Peng และคณะ(47) ได้เปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์และโพรเทเปอร์ยูนิเวอร์ซอล ในฟันที่มีค่ามุมความโค้งคลองรากแตกต่างกันพบว่าไฟล์ทั้ง 2 ระบบจะมีจำนวน

รอบการหมุนก่อนหักมากที่สุดใคลองรากฟันที่มีความมุมความโค้ง 45 องศา รองลงมาคือ 60 องศา และ 90 องศาตามลำดับ

นอกจากนั้นลักษณะคลองรากฟันที่มีความซับซ้อนหรือตีบแคบ อาจทำให้ความฝายของไฟล์มีขนาดเท่ากับคลองรากจนเกิดเทเปอร์ล็อก (taper lock) ขึ้นได้ ซึ่งต้องใช้แรงบิดสูงขึ้นเพื่อให้ไฟล์ที่ติดอยู่หมุนได้ จนเกิดแรงบิดเกินกว่าขีดจำกัดของโลหะ และมีการหักของไฟล์เกิดขึ้นได้ การศึกษาของ Peter และคณะ(48) ได้เปรียบเทียบการเตรียมคลองรากฟันที่มีความกว้างและแคบ ด้วยไฟล์ระบบโพเรเพอร์ยูนิเวอร์ซอล พบว่าไฟล์ที่หมุนอยู่ในคลองรากฟันแคบจะเกิดแรงเสียดทานกับผนังคลองรากฟันมากกว่า และทำให้มีแรงบิดเกิดขึ้นมากกว่าไฟล์ในคลองรากฟันกว้าง แรงเสียดทานนี้จึงเป็นอีกปัจจัยที่นำไปสู่การแตกหักได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ ในการเตรียมคลองรากฟันที่แคบ พบว่าไฟล์จะมีจำนวนรอบการหมุนมากกว่าในคลองรากฟันกว้าง ซึ่งอาจส่งผลให้ไฟล์มีความล้าจากการหมุนรอบเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

ปัจจัยที่ 7 จำนวนครั้งในการใช้งานของเครื่องมือเพิ่มโอกาสการหักของไฟล์ได้มากขึ้น โดยมีการศึกษาของ Svec และ Power(49) ที่ตรวจสอบพื้นผิวของไฟล์ภายหลังการทดลองกับฟันมนุษย์พบว่า ไฟล์ทุกตัวจะปรากฏร่องรอยการสึกที่เป็นหลุมขนาดเล็ก หรือบางชิ้นอาจพบรอยร้าวเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจของ Peng และคณะ(50) พบว่าไฟล์ที่มีการใช้งานทางคลินิกหลายครั้ง จะมีรอยร้าวขนาดเล็กและรอยสึกที่บริเวณคมตัด รอยชำรุดเหล่านี้จะเป็นตำแหน่งที่สะสมความเค้น จนเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดรอยร้าวในการใช้งานครั้งถัดไปได้ จึงส่งผลให้ไฟล์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่น้อยกว่าการใช้งานครั้งแรก(51) จากการศึกษาของ Keskin และคณะ(4) ได้เปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์ระบบโพเรเพอร์ยูนิเวอร์ซอลและโพเรเพอร์เน็กซ์ ที่ผ่านการใช้งานทางคลินิกมา 3 ครั้ง พบว่าไฟล์ระบบโพเรเพอร์ยูนิเวอร์ซอลและโพเรเพอร์เน็กซ์ จะมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่ลดลงหลังการใช้งาน โดยเฉพาะไฟล์ที่มีขนาดใหญ่จะมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบลดลงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จำนวนครั้งของการใช้งานจะเกี่ยวข้องกับการมีรอยชำรุดเกิดขึ้นภายหลังจากการใช้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีโอกาสเกิดการหักขึ้นได้จากการใช้งานเพียงครั้งเดียว โดยการหักที่เกิดขึ้นอาจมาจากหลายปัจจัยร่วมกันจากที่กล่าวมาแล้ว หรืออาจเป็นผลมาจากตัวผู้ใช้งาน ขั้นตอนการใช้ และเทคนิคต่างๆในการใช้งาน(52) หากใช้งานด้วยความระมัดระวัง ลดแรงกดไปทางปลายราก และทำการฝายส่วนต้นของคลองรากฟันก่อน จะสามารถช่วยลดความเค้นที่เกิดจากแรงบิดได้ นอกจากนี้ลำดับในการใช้เครื่องมือ ควรใช้โดยเรียงจากขนาดและความฝายตามที่บริษัทแนะนำ

(9, 53) จากการศึกษาของ Yared และคณะ(54, 55) พบว่าจากการจำลองการใช้งานในคลินิก ไฟลระบบโพไฟล์สามารถใช้เตรียมคลองรากฟันได้ 10 คลองรากฟัน และสามารถเตรียมคลองรากฟันกรามใหญ่ในผู้ป่วยด้วยเทคนิคควรรันไดว์นได้ 4 ซี่ โดยไม่มีการหักเกิดขึ้น และยังคงมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่ไม่แตกต่างกับไฟล์ก่อนใช้งาน

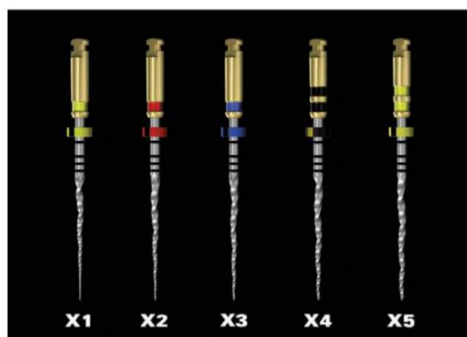
ส่วนผลจากการทำความสะอาดเครื่องมือนั้น ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เครื่องมือเกิดการแตกหัก(55) และเมื่อศึกษาผลของน้ำยาล้างคลองรากฟัน พบว่าน้ำยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นสูงและสารละลายอีดีทีเอ ไม่ได้ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเนื้อโลหะ และไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของไฟลนิกเกิลไทเทเนียม(56, 57)

ระบบไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ และระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ มีข้อมูลดังนี้

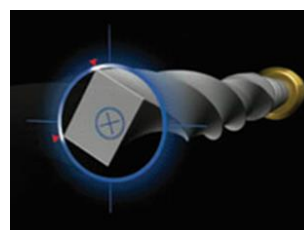
ไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์

มีความยาว 21, 25 และ 31 มิลลิเมตร ประกอบด้วย ไฟล์ 5 ขนาด ดังนี้

1. เอ็กซ์วัน (X1) มีจุดปลายสุดขนาด 17 ความผายร้อยละ 4
2. เอ็กซ์ทู (X2) มีจุดปลายสุดขนาด 25 ความผายร้อยละ 6
3. เอ็กซ์ทรี (X3) มีจุดปลายสุดขนาด 30 ความผายร้อยละ 7
4. เอ็กซ์โฟร์ (X4) มีจุดปลายสุดขนาด 40 ความผายร้อยละ 6
5. เอ็กซ์ไฟว์ (X5) มีจุดปลายสุดขนาด 50 ความผายร้อยละ 6



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 8 ไฟลนิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์(58)

โพเทเปอร์เน็กซ์เป็นไฟล์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการความร้อนประเภทเอ็มไวร์ ทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรง ทนต่อการสึกและมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบมากกว่าไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม(24, 25)

ไฟล์ระบบนี้ถูกออกแบบให้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดอยู่นอกแกนไฟล์ ทำให้มีลักษณะการหมุนที่แนวแกนหมุนเอียงออกจากจุดกึ่งกลาง โดยมีคมตัดของไฟล์เป็นจุดสัมผัสผนังคลองราก 2 จุด (ภาพประกอบ 8 ข) ลดการยืดเกาะเนื้อฟัน ประกอบกับความผายของไฟล์ซึ่งมีระดับไม่คงที่ จะช่วยลดโอกาสการเกิดเทเปอร์ล็อก และการดึงเครื่องมือเข้าไปในคลองรากได้ รวมทั้งช่วยให้มีพื้นที่ในการกักเก็บเศษเนื้อฟันได้เพิ่มขึ้น และส่วนปลายของไฟล์มีลักษณะที่ไม่คม(58, 59)

ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์

มีความยาว 21 และ 25 มิลลิเมตร ประกอบด้วย ไฟล์ 5 ขนาด ดังนี้

1. เอ็กซ์วัน (X1) มีจุดปลายสุดขนาด 17 ความผายร้อยละ 4
2. เอ็กซ์ทู (X2) มีจุดปลายสุดขนาด 25 ความผายร้อยละ 6
3. เอ็กซ์ทรี (X3) มีจุดปลายสุดขนาด 30 ความผายร้อยละ 6
4. เอ็กซ์โฟร์ (X4) มีจุดปลายสุดขนาด 40 ความผายร้อยละ 6
5. เอ็กซ์ไฟว์ (X5) มีจุดปลายสุดขนาด 50 ความผายร้อยละ 6



Rectangle



(ก)

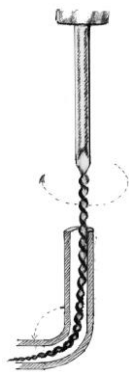
(ข)

ภาพประกอบ 9 ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์(10)

เอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ เป็นไฟล์ที่ผ่านกระบวนการความร้อน ซึ่งบริษัทผู้ผลิตเรียกว่า ไฟร์ไวร์ พบว่าลักษณะไฟล์ก่อนใช้งานจะมีการโค้งงอเล็กน้อย(28) บริษัทผู้ผลิตระบุว่าไฟล์ระบบนี้มีความแข็งแรงมาก มีความยืดหยุ่นดี มีความอ่อนตัวและสามารถดัดโค้งได้ถึง 90 องศา ใช้ได้กับคลองรากฟันทุกระดับ ไฟล์ระบบนี้มีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และจุดกึ่งกลางหน้าตัดอยู่ในตำแหน่งนอกแกนไฟล์ (ภาพประกอบ 9 ข) มีจุดสัมผัสผนังคลองรากฟัน 2 จุด ไฟล์มีระดับความผายที่ไม่คงที่ และมีลักษณะการหมุนที่แนวการหมุนเอียงออกจากจุดกึ่งกลาง ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการเก็บกักเศษเนื้อฟัน ไฟล์ระบบนี้จะไม่เกิดการคลายเกลียวและมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่สูงกว่าไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ (10)

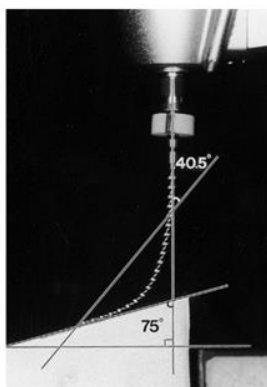
การทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง

มาตรฐานของเครื่องมือเตรียมคลองรากฟันที่กำหนดไว้ในเอดีเอหมายเลข 28 (American Dental Association specification no. 28) ได้กล่าวถึงลักษณะทางกายภาพและวิธีการทดสอบสมบัติของเครื่องมือ ซึ่งได้แก่ ความต้านทานต่อการหักเมื่อบิด (resistance to fracture by twisting) และความแข็งตึง(stiffness) ซึ่งเป็นการวัดสมบัติของเครื่องมือด้วยแรงคงที่(60) อาจไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานในทางคลินิกได้ เนื่องจากการทำงานของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง มีการหมุนต่อเนื่องขณะใช้งานภายในคลองรากฟันและจะมีการสะสมความล้าเกิดขึ้น ต่อมาจึงพัฒนารูปแบบการทดสอบไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง ด้วยการจำลองการเตรียมคลองรากฟันที่มีลักษณะโค้ง เพื่อทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ โดยประเมินจากจำนวนรอบการหมุนของไฟล์ก่อนการหัก(61) ทั้งนี้ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับการทดสอบนี้ที่ชัดเจน โดยการศึกษาที่ผ่านมาได้มีผู้ออกแบบวิธีการทดสอบ 4 รูปแบบ ดังนี้(14) การหมุนของเครื่องมือในท่อโลหะโค้ง การหมุนของเครื่องมือบนพื้นเอียง การหมุนของเครื่องมือโดยมีความโค้งตามแนวมุม และการหมุนของเครื่องมือในร่อง



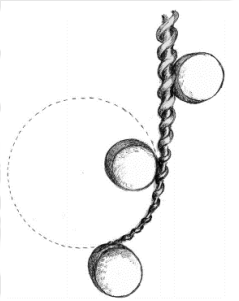
ภาพประกอบ 10 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Pruett และคณะ(18)

การหมุนของเครื่องมือในท่อโลหะโค้ง (curved metal tube) (ภาพประกอบ 10) เป็นการทดสอบที่ใช้ท่อโลหะดัดให้โค้งตามมุมที่ต้องการ โดยกำหนดความโค้งด้วยค่ามุมตามแบบ Schneider(62) และพบว่าค่ามุมที่กำหนดนั้นไม่สามารถบ่งบอกถึงความโค้งได้ชัดเจน ต่อมา Pruett และคณะ(18) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบพบว่าเมื่อท่อโลหะมีมุมความโค้งเพิ่มขึ้นหรือมีรัศมีความโค้งลดลง จะทำให้ไฟล์ที่หมุนในท่อนั้นมีจำนวนรอบการหมุนก่อนการแตกหักน้อยลงได้ การศึกษาในภายหลังจึงได้มีการกำหนดความโค้งด้วยมุมและรัศมีความโค้งตามแบบ Pruett และคณะ(18) นอกจากการใช้ท่อโลหะแล้วยังมีบางการศึกษาที่ได้ดัดแปลงเป็นท่อแก้วดัดโค้งเพื่อใช้ในการทดสอบนี้เช่นกัน(23) อย่างไรก็ตามลักษณะของท่อซึ่งเป็นทรงกระบอกนั้น จะมีความกว้างมากกว่าขนาดของไฟล์ อาจทำให้ไฟล์มีการติดตัวภายในท่อ ส่งผลให้ไฟล์มีมุมความโค้งลดลงและมีรัศมีความโค้งเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่เป็นไปตามรูปร่างคลองรากที่กำหนดไว้ และไฟล์แต่ละระบบจะมีความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการติดตัวภายในท่อและมีความโค้งเกิดขึ้นไม่เท่ากัน ดังนั้นการทดสอบรูปแบบนี้จึงยังไม่สามารถควบคุมความโค้งของไฟล์ที่ใช้ทดสอบได้อย่างแม่นยำ นอกจากนั้นลักษณะท่อที่ไม่พอดีกับตัวไฟล์ อาจทำให้ไฟล์มีการสั่นหรือขยับภายในท่อได้ในขณะหมุน จึงทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกับไฟล์แต่ละตัวไม่เท่ากัน ด้วยข้อจำกัดของลักษณะท่อที่กล่าวมานี้ส่งผลให้ การทดสอบด้วยวิธีนี้มีความแม่นยำลดลง(14, 61)



ภาพประกอบ 11 วิธีการทดสอบความต้านทานจากการหมุนรอบของ Li และคอนกรีต(63)

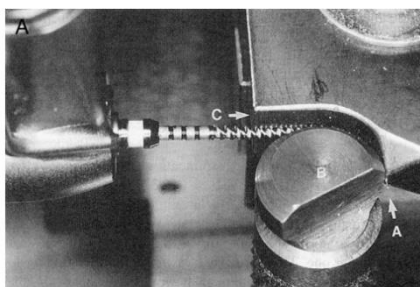
การหมุนของเครื่องมือบนพื้นเอียง (Rotation against an inclined plane)(ภาพประกอบ 11) เป็นการออกแบบให้ไฟล์หมุนอยู่บนพื้นเอียงซึ่งทำจากโลหะ โดยสามารถปรับมุมเอียงเพื่อให้ไฟล์มีมุมความโค้งได้ตามที่กำหนด โดยจะเป็นมุมตามลักษณะของ Schneider(62) ซึ่งไม่สามารถกำหนดค่ารัศมีความโค้งได้ การทดสอบนี้เป็นรูปแบบที่ติดตั้งง่าย และสามารถขยับไฟล์ขึ้นลงได้ในขณะทดสอบ แต่ความเค้นที่เกิดขึ้นกับไฟล์แต่ละระบบที่ทดสอบนั้นอาจไม่เท่ากัน เพราะว่าจะมีรัศมีความโค้งและระยะตำแหน่งสูงสุดของความโค้งที่ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นค่าความต้านทานความต้านทานจากการหมุนรอบยังไม่สัมพันธ์กับค่ามุมเอียงของพื้นโลหะที่กำหนดไว้(14, 61)



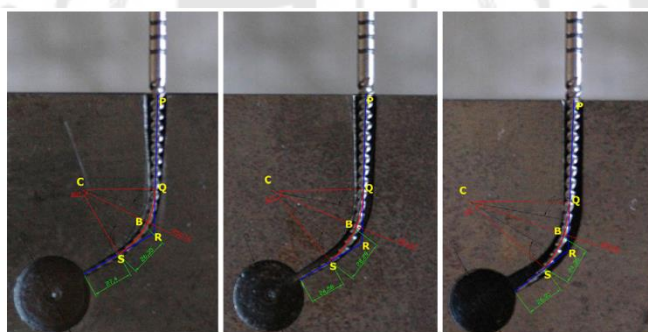
ภาพประกอบ 12 วิธีการทดสอบความต้านทานจากการหมุนรอบของ Zinelis และคอนกรีต (61)

การหมุนของเครื่องมือที่โค้งตามแนวหมุด (Rotation with a three-point bend) (ภาพประกอบ 12) เป็นการทดสอบโดยใช้หมุดกลม 2-3 แท่งในการควบคุมความโค้ง ซึ่งไฟล์จะวางตัวและหมุนอยู่ในแนวร่องของหมุด โดยอาศัยความสามารถในการโค้งของไฟล์ วิธีนี้สามารถทำการทดสอบไฟล์ได้หลายสภาวะ โดยสามารถดัดแปลงให้ไฟล์หมุนในน้ำ หรือในสภาวะที่สัมผัสกับน้ำยาล้างคลองรากฟันได้(64) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของไฟล์ในเงื่อนไขตัวแปรต่างๆ แต่ถ้ามมีการเปรียบเทียบไฟล์ในระบบอื่นๆที่มีความผายและรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน จะทำให้ความสามารถในการโค้งงอของไฟล์ในร่องหมุดนั้นแตกต่างกันด้วย และในไฟล์ตัวเดียวกันนั้นในบริเวณส่วนปลายและส่วนโคนจะสามารถโค้งงอได้ไม่เท่ากัน เมื่อทำการทดสอบจึงได้ความโค้ง

ของไฟล์ที่ไม่แน่นอน และแม้ว่ารูปแบบการทดสอบนี้จะสามารถกำหนดระยะส่วนโค้งได้ แต่ยังไม่สามารถกำหนดมุมและรัศมีมีความโค้งได้ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ(61)



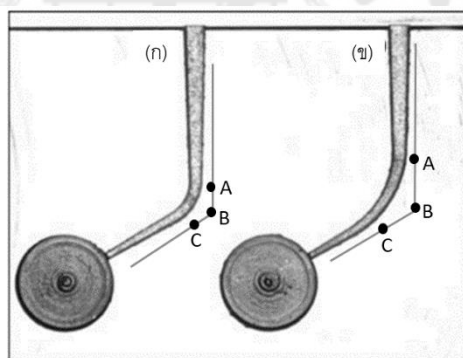
ภาพประกอบ 13 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Haikel และคณะ(65)



ภาพประกอบ 14 วิธีการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบของ Grande และคณะ (66)

การหมุนของเครื่องมือในร่อง (Grooved block and rod) ช่วงแรกเป็นการออกแบบให้เครื่องมือหมุนอยู่ในร่องของแท่งโลหะที่มีรูปร่างโค้ง (ภาพประกอบ 13) ความโค้งที่ได้จะเกิดจากผิวของไฟล์ที่โค้งไปตามแนวร่อง ทำให้ไฟล์ที่มีความยาวต่างกันมีมุมและรัศมีมีความโค้งที่แตกต่างกันได้ (61, 65) ต่อมาจึงมีการปรับเปลี่ยนเป็นร่องโค้งซึ่งมีลักษณะเป็นคลองรากฟันจำลอง (ภาพประกอบ 14) โดยไฟล์สามารถหมุนได้อย่างอิสระภายในร่องร่วมกับการใช้สารหล่อลื่น และมีแผ่นกระจกปิดทับเพื่อสามารถสังเกตการหักของไฟล์ได้ โดยรูปแบบแรกของคลองรากฟันจำลองนี้มีลักษณะเป็นร่องขนานกัน พบว่าจะทำให้ไฟล์เกิดการติดตัวหรือเหยียดตรงภายในร่องได้ จึงทำให้

เกิดมุมและรัศมีความโค้งไม่เป็นไปตามที่กำหนด ภายหลัง Grande และคณะ(67) ได้ออกแบบให้ คลองรากฟันจำลองมีขนาดและความผายตามแบบรูปร่างไฟล์ที่ทดสอบ และพบว่าสามารถ กำหนดให้ไฟล์แต่ละระบบมีมุมและรัศมีความโค้งเป็นไปตามต้องการได้ ซึ่งยืนยันจากการศึกษา ของ Plotino และคณะปี 2009(68) ที่เปรียบเทียบความโค้งของไฟล์ทั้ง 8 ระบบ ซึ่งมีขนาดและ ความผายเท่ากัน พบว่าความโค้งของไฟล์แต่ละระบบที่วัดได้นั้นจะมีมุมและรัศมีความโค้งเป็นไป ตามที่กำหนดโดยไม่แตกต่างกัน ต่อมาในปี 2010 Plotino และคณะ(66) ได้เปรียบเทียบลักษณะ คลองรากฟันจำลอง 3 แบบที่มีรูปร่างแตกต่างกันแต่มีมุมและรัศมีความโค้งและจุดกึ่งกลางส่วน โค้งเท่ากัน (ภาพประกอบ 14) พบว่า ลักษณะคลองรากฟันจำลองที่ต่างกันจะทำให้ไฟล์ที่มีสมบัติ การโก่งงอ (bending properties) ที่แตกต่างกัน เกิดการโค้งตัวด้วยมุมและรัศมีความโค้งไม่ เท่ากัน รวมทั้งมีระยะกึ่งกลางความโค้งที่แตกต่างกันด้วย แต่สำหรับคลองรากฟันจำลองที่ ออกแบบให้มีขนาดเป็นไปตามรูปร่างของไฟล์สามารถทำให้ไฟล์ทุกระบบในการทดลองมีมุมและ รัศมีความโค้งที่เท่ากันได้ รวมทั้งมีจุดกึ่งกลางส่วนโค้งในตำแหน่งเดียวกันด้วย



ภาพประกอบ 15 ตัวอย่างของคลองรากฟันจำลองตามแบบของ Grande และคณะ(67) ซึ่งมีค่า มุมความโค้ง 60 องศา โดย (ก) รัศมีความโค้ง 2 มิลลิเมตร (ข) รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร

การกำหนดปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบ ได้แก่ ค่ามุม ความโค้งและรัศมีความโค้งได้ ทำให้ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานความล้าจากการ หมุนรอบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ตัวอย่างการออกแบบคลองรากฟันจำลองในการศึกษาของ Grande และคณะ(67) (ภาพประกอบ 15) ได้กำหนดให้มีมุมความโค้ง(α) ขนาด 60 องศา รัศมี ความโค้ง(r) 2 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร มีจุดกึ่งกลางส่วนโค้งห่างจากปลายรากฟัน 6 มิลลิเมตร และระยะความยาวของคลองรากฟันจำลองเฉพาะส่วนโค้ง(A-B-C) มีความยาว 3 มิลลิเมตรและ 6 มิลลิเมตรตามลำดับ ความกว้างของคลองรากฟันจำลองจะผายไปตามขนาดของไฟล์ โดยมี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าไฟล์ 0.2 มิลลิเมตร ช่วยให้เครื่องมือสามารถหมุนได้อย่างอิสระ และลดความเค้นและแรงบิดที่จะมีผลต่อความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบขณะทดสอบ

นอกจากนั้น Grande และคณะ(67) ได้เปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟล์ พบว่า หากส่วนของไฟล์ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่โค้งที่สุดมีปริมาตรโลหะที่มากกว่าจะทำให้ไฟล์นั้นมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบลดลง ดังนั้นในทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบจึงจำเป็นต้องควบคุมระยะความยาวของไฟล์ในจุดที่โค้งที่สุดของคลองรากฟัน และตรวจสอบการหักว่าเป็นการหักจากความล้าจากการหมุนรอบที่ตำแหน่งที่โค้งมากที่สุดโดยการวัดความยาวของชิ้นไฟล์ส่วนที่หัก



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์

1. สารเคมี ได้แก่

- 1.1 น้ำมันหล่อลื่น (Super oil, Singer, Elizabethport, NJ, USA)

2. อุปกรณ์

2.1 ไฟลิ่งเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโปรเทเปอร์เน็กซ์ (Protaper Next, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ขนาดเอ็กซ์ทู (X2; 25/ .06)

ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 15 ตัว

2.2 ไฟลิ่งเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอดจ์เทเปอร์เ็นคอร์ด (EdgeTaper Encore, EdgeEndo, Albuquerque, NM, USA) ขนาดเอ็กซ์ทู (X2; 25/ .06)

ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 15 ตัว

2.3 กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว

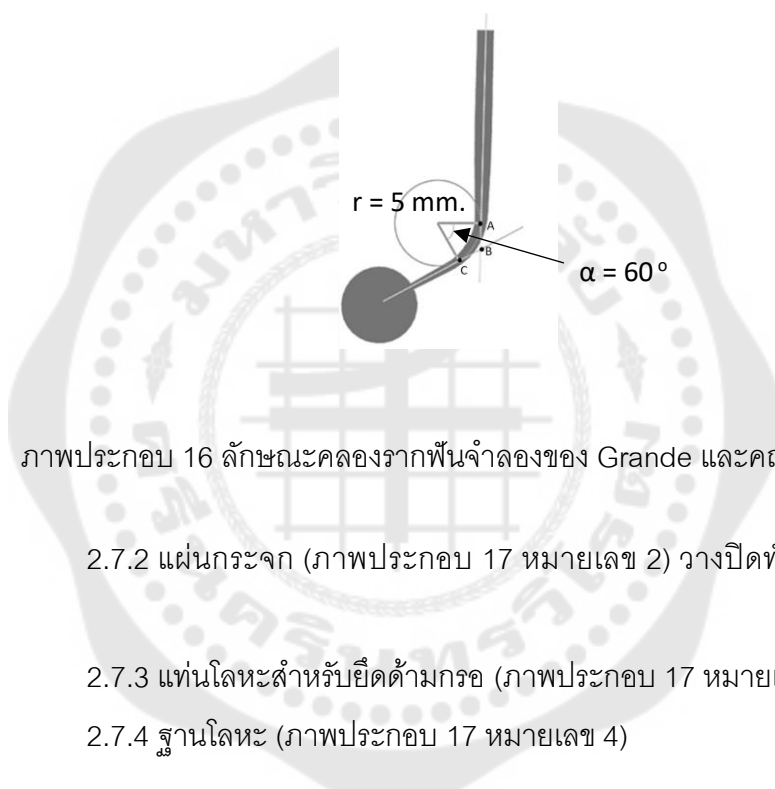
2.4 เครื่องควบคุมการทำงานของมอเตอร์ขยายคลองรากฟันและนาฬิกาหยุดเวลาด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

2.5 เครื่องมือวัดความยาว (Electronic calipers, ABSOLUTE Digimatic Caliper Series 500, Mitutoyo, Japan) ที่มีความละเอียดระดับมิลลิเมตร

2.6 มอเตอร์ขยายคลองรากฟัน (VDW.SILVER® RECIPROC® ,VDW, Germany)

2.7 เครื่องมือทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ ประกอบด้วย

2.7.1 คลองรากฟันจำลอง (ภาพประกอบ 17 หมายเลข 1) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่พัฒนาจากเครื่องมือทดสอบของ Grande และคณะ(67) (ภาพประกอบ 16) โดยมีลักษณะคลองรากฟันจำลองที่มีค่ามุมความโค้ง(α) 60 องศา รัศมีมีความโค้ง(r) 5 มิลลิเมตร จุดกึ่งกลางส่วนโค้งห่างจากปลายคลองรากฟันจำลอง 6 มิลลิเมตร ส่วนโค้งมีความยาว(A-B-C) 6 มิลลิเมตร คลองรากฟันจำลองมีความยาวทั้งหมด 25 มิลลิเมตร และมีความผายตามไฟล์ที่ใช้ทดลอง โดยกำหนดให้มีความกว้างและความลึกกว่าขนาดไฟล์ 0.2 มิลลิเมตร

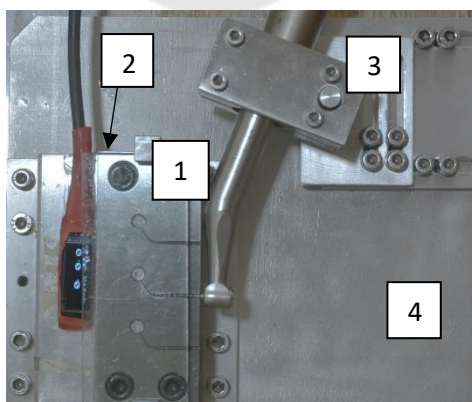


ภาพประกอบ 16 ลักษณะคลองรากฟันจำลองของ Grande และคณะ (67)

2.7.2 แผ่นกระจก (ภาพประกอบ 17 หมายเลข 2) วางปิดทับบนคลองรากฟันจำลอง

2.7.3 แท่นโลหะสำหรับยึดด้ามกรอ (ภาพประกอบ 17 หมายเลข 3)

2.7.4 สฐานโลหะ (ภาพประกอบ 17 หมายเลข 4)



ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์ทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ

ขั้นตอนการทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ

การตรวจสอบผิวเครื่องมือด้วยกล้องจุลทรรศน์

นำไฟล์ทั้งหมด 30 ตัว มาสำรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางทันตกรรม (dental operating microscope) ด้วยกำลังขยาย 10 เท่าเพื่อหารอยร้าวหรือจุดบกพร่องบนผิวเครื่องมือที่อาจเกิดจากกระบวนการผลิต (3, 7) ถ้าพบว่ามีรอยร้าวหรือจุดบกพร่องบนผิวไฟล์จะคัดออกจากกลุ่มตัวอย่างและเปลี่ยนไฟล์ชิ้นใหม่ที่ไม่มีจุดบกพร่องบนพื้นผิวมาทดแทนให้ครบจำนวน

การทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบความล้าจากการหมุนรอบ ตั้งค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ 300 รอบต่อนาที
2. ใส่น้ำมันหล่อลื่นไปในคลองรากฟันจำลอง ปริมาณ 1 หยดหรือประมาณ 0.05 มิลลิเมตร
3. สุ่มไฟล์ที่จะใช้ทดสอบด้วยตารางเลขสุ่ม โดยนำไฟล์ 2 ระบบมารวมกันก่อนทำการสุ่ม
4. นำไฟล์ที่สุ่มได้ต่อเข้ากับด้ามกรอ (handpiece) ใส่ไฟล์ลงในคลองรากฟันจำลอง ที่ความยาว 25 มิลลิเมตรและปิดทับด้วยแผ่นกระจก
5. เริ่มบันทึกภาพเคลื่อนไหว โดยกล้องจะจับภาพในมุมที่เห็นคลองรากฟันจำลอง
6. กดสั่งการผ่านเครื่องควบคุมการทำงานอัตโนมัติ เพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุน
7. เมื่อผู้สังเกตเห็นไฟล์หัก ให้กดหยุดการทำงานที่เครื่องควบคุมการทำงานทันที
8. บันทึกเวลาที่ไฟล์เริ่มหมุนจนถึงเวลาที่หัก จากภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้ นำมาลบกันเป็นเวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหักในหน่วยวินาที
9. หลังการทดสอบ เก็บชิ้นส่วนไฟล์ที่หักเพื่อนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
10. สุ่มไฟล์ขึ้นไปถัดไป และทำการทดสอบตามลำดับข้อ 4 -9 จนครบทุกตัว
11. คำนวณจำนวนรอบการหมุนก่อนหักของไฟล์ โดยนำค่าระยะเวลาการหมุนของไฟล์ก่อนหักจากข้อ 8. และความเร็วรอบในการหมุน คือ 300 รอบต่อนาที มาคำนวณด้วยสูตรดังนี้

จำนวนรอบการหมุนก่อนหัก (NCF)

$$= \text{ความเร็วในการหมุน (rpm)} \times \frac{\text{เวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหัก (s)}}{60}$$

การตรวจสอบไฟล์ภายหลังการทดสอบ

1. การวัดความยาวของส่วนที่หัก

นำส่วนปลายไฟล์ที่หักมาวัดความยาวด้วยเครื่องมือวัดความยาว ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ทางทันตกรรมกำลังขยาย 3.5 เท่า และจดบันทึก เพื่อตรวจสอบระยะความยาวของไฟล์ที่เกิดการหัก ซึ่งหากมีตำแหน่งที่แตกต่างกันจะมีผลต่อค่าความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่ต่างกันได้(67)

2. การตรวจสอบพื้นผิวส่วนที่หักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ภายหลังจากการทดสอบความล้า นำชิ้นส่วนที่หักทั้งหมด 30 ชิ้นมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM JEOL JSM-6510LV, Tokyo Japan) ด้วยกำลังขยาย 200 เท่าและ 2,500 เท่า(14, 69) เพื่อยืนยันลักษณะการหักของไฟล์ว่าเป็นผลมาจากการหักที่เกิดจากความล้าจากการหมุนรอบ ซึ่งเป็นกลไกการหักแบบเปราะ โดยมีลักษณะผิวรอยหักที่สามารถบ่งบอกได้ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (14) ในการตรวจสอบจะทำการเตรียมชิ้นส่วนของไฟล์ โดยการทำความสะดวกด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิกร่วมกับแอลกอฮอล์เป็นเวลา 120 วินาที (70, 71) จากนั้นนำส่วนของไฟล์ไปติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และทำการบันทึกภาพลักษณะพื้นผิวรอยหัก

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้เป็นจำนวนรอบการหมุนของไฟล์ก่อนการหักของไฟล์แต่ละระบบ จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อการแจกแจงข้อมูล โดยใช้สถิติ Shapiro-Wilk Test หากข้อมูลมีการแจกแจงปกติจะเปรียบเทียบความแตกต่างทั้งสองกลุ่มด้วยสถิติ Independent t-test แต่ถ้ามีการแจกแจงไม่ปกติจะใช้สถิติ Mann-Whitney U test และผลของการสำรวจพื้นผิวรอยหักภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะใช้สถิติเชิงพรรณนา

บทที่ 4

ผลการศึกษา

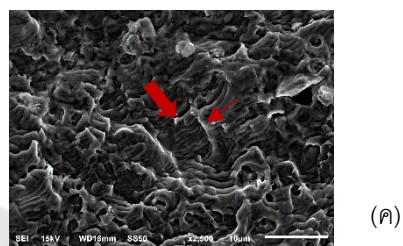
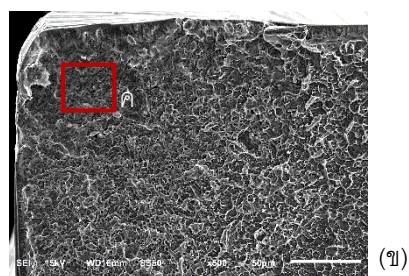
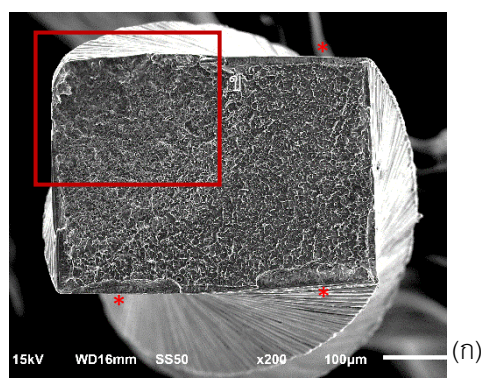
ตาราง 1 ค่าเฉลี่ยความยาวส่วนปลายของไฟล์ที่หัก

กลุ่ม	ค่าเฉลี่ยความยาวของไฟล์ที่หัก $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์	4.66 $\pm$ 0.42
ไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เน็กซ์	4.60 $\pm$ 0.56
P-value	0.74

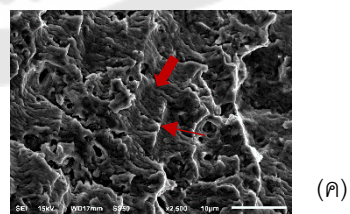
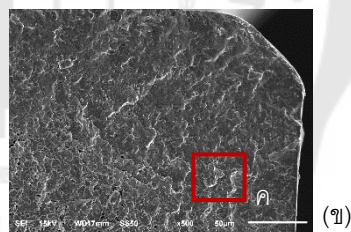
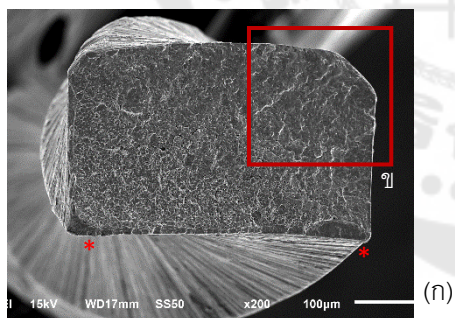
การทดสอบความต้านทานความล้มจากการหมุนรอบของไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เน็กซ์ พบว่าระยะการหักของไฟล์ทั้ง 2 ระบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตาราง 1) และค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการหมุนของไฟล์ก่อนหักของทั้ง 2 ระบบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยจำนวนรอบการหมุนก่อนหักของไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เน็กซ์มีค่าสูงกว่าไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ประมาณ 3 เท่า (ตาราง 2)

ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหัก และจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก

กลุ่ม	จำนวน	ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ไฟล์หมุนก่อนหัก $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (วินาที)	ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รอบ)
ไฟล์ระบบโพเทเปอร์เน็กซ์	15	102.49 $\pm$ 7.69	512.45 $\pm$ 38.47
ไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เน็กซ์	15	360.52 $\pm$ 104.97	1802.60 $\pm$ 524.84
P-value		<0.001	<0.001



ภาพประกอบ 18 (ก) ผิวหน้าตัดรอยหักของไฟลระบบโพเรปเปอร์เน็กซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข) ภาพมุมคมชัดและ (ค) ลักษณะรื้อขนานที่กำลังขยาย 2,500 เท่า



ภาพประกอบ 19 (ก) ผิวหน้าตัดรอยหักของไฟลระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข) ภาพมุมคมชัดและ (ค) ลักษณะรื้อขนานที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

การสำรวจพื้นผิวไฟล์ที่หักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์และระบบโพเทเพอร์เน็กซ์ทุกตัว ปรากฏลักษณะพื้นผิวแบบริ้วขนาน (striation pattern) (ภาพประกอบ 18 ค และภาพประกอบ 19 ค; ลูกศรหนา) ซึ่งแสดงถึงการเกิดความล้าจากการหมุนรอบ จากภาพกำลังขยายสูงพบว่าแนวริ้วขนานนี้อยู่ใกล้กับจุดเริ่มต้นรอยร้าว และเรียงตัวตั้งฉากกับทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว โดยรอยร้าวได้เริ่มต้นจากมุมของคมตัด และขยายเข้าหาส่วนกลางของเนื้อโลหะ บริเวณถัดจากริ้วขนานนี้จะปรากฏเป็นรอยบุ๋มขนาดเล็ก (dimple) จนถึงปลายขอบของหน้าตัดอีกฝั่ง ซึ่งแสดงถึงการขาดออกจากกันของโลหะอย่างรวดเร็ว



บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

สรุปผล

จากการทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบพบว่า ไฟล์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีจำนวนรอบการหมุนก่อนหักมากกว่าไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ประมาณ 3 เท่า

อภิปรายผล

การทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบในคลองรากฟันจำลอง ทำให้ไฟล์ที่ทดสอบมีแนวการโค้งตัวและตำแหน่งที่เกิดความล้าจากการหมุนรอบใกล้เคียงกัน(66) การศึกษาครั้งนี้พบว่าไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีระยะการหักที่ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าขณะทดสอบไฟล์ทั้ง 2 ระบบได้เกิดความเค้นสูงสุดในตำแหน่งเดียวกัน ขนาดหน้าตัดของไฟล์ที่รับความเค้นสูงสุดจึงใกล้เคียงกัน จากภาพประกอบ 20 ตำแหน่งที่ไฟล์หักอยู่ระหว่างจุด B และจุด C ซึ่งอยู่ในส่วนความโค้งและอยู่ได้ต่อจุดที่โค้งที่สุดของคลองรากฟันจำลอง เช่นเดียวกับในการศึกษาของ Jamleh และคณะ(72) และการศึกษาของ Uygun และคณะ(34)

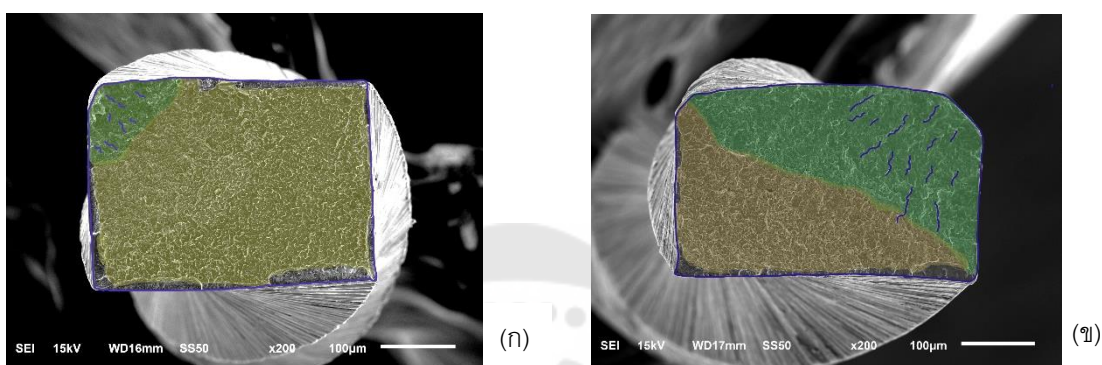


ภาพประกอบ 20 ตำแหน่งของไฟล์ที่หักในคลองรากฟันจำลอง

ทั้งนี้เครื่องทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบแบบคลองรากฟันจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Grande และคณะ(14, 73) ซึ่งสามารถควบคุมความโค้งของไฟล์แต่ละระบบให้เป็นไปตามที่กำหนด(68) จึงถูกนำมาใช้ทดสอบในการศึกษาปัจจุบันมากขึ้น สำหรับการศึกษานี้ได้ประดิษฐ์เครื่องทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบแบบคลองรากฟันจำลอง โดยมีรูปร่างคลองรากฟันจำลองเป็นไปตามการศึกษาของ Grande และคณะ(67) และมีขนาดเดียวกันกับหลายการศึกษาที่ผ่านมา ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบเพิ่มเติมให้คลองรากฟันจำลองมีความยาวเท่ากับความยาวของไฟล์ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือ 25 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมความยาวของไฟล์ที่วางลงในคลองรากฟันจำลองให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ จากการทดสอบครั้งนี้พบว่า เครื่องทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำมาทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบได้จริง

การหักของไฟล้นั้นเริ่มต้นจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะ โดยเป็นตำแหน่งที่มีความเค้นสะสมสูงสุด(74) หรืออาจมีจุดบกพร่องที่เกิดจากการผลิต (75, 76) ขณะที่ไฟล์กำลังหมุนอยู่ในคลองรากฟันโค้งอย่างต่อเนื่อง ผิวโลหะที่อยู่ในส่วนโค้งจะได้รับแรงบีบอัดและแรงดึงในทุกๆ รอบของการหมุน ทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นสามารถขยายตัวเข้ามาในเนื้อโลหะได้ลึกมากขึ้น ช่วงที่เกิดแรงดึงนั้นส่วนปลายของรอยร้าวจะถูกเปิดออก เนื้อโลหะที่อยู่รอบปลายรอยร้าวจะเกิดการเลื่อนไถล ส่วนช่วงที่เกิดแรงบีบอัด รอยร้าวจะชิดเข้าหากันและเนื้อโลหะบริเวณนั้นจะมีการเลื่อนไถลในทิศทางตรงกันข้าม จึงปรากฏเป็นลักษณะร้าวขนานเกิดขึ้น(77) สอดคล้องกับภาพรอยหักของไฟล์ระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์และระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (ภาพประกอบ 18 และ 19) พบว่าไฟล์ทั้ง 2 ระบบมีจุดเริ่มต้นรอยร้าวเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุมคมตัดของไฟล์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับผนังคลองรากฟันจำลอง และบริเวณใกล้เคียง พบลักษณะร้าวขนาน(ภาพประกอบ 18 ค และ 19 ค; ลูกศรหนา) ที่เกิดจากการขยายตัวของรอยร้าวโดยมีการเรียงตัวอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว(ภาพประกอบ 18 ค และ 19 ค; ลูกศรบาง) รอยร้าวนี้จะขยายตัวอย่างช้าๆ ทำให้เนื้อโลหะค่อยๆ แยกออกจากกัน เมื่อสังเกตจากภาพกำลังขยายต่ำ(ภาพประกอบ 18 ก และ 19 ก) พบว่าผิวรอยหักบริเวณนี้จะมีพื้นผิวเรียบเรียกบริเวณนี้ว่า พื้นที่ที่เสียหายจากการล้า (fatigue zone) ส่วนบริเวณถัดมาผิวหน้าตัดจะมีลักษณะขรุขระ ที่ประกอบด้วยรอยบุ๋มขนาดเล็กไปจนถึงขอบอีกฝั่งของหน้าตัด โดยเกิดภายหลังจากที่เนื้อโลหะเริ่มแยกออกจากกัน ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่เหลืออยู่นั้น ไม่สามารถทนรับแรงดึงได้ จึงเกิดการฉีกขาดออกจากกันอย่างรวดเร็ว ลักษณะพื้นผิวในบริเวณนี้เรียกว่า พื้นที่รับแรงเกินพิกัด (overload zone) (15, 78) นอกจากรอยร้าวจะเกิดที่ตำแหน่งมุมคมตัดแล้ว จะสังเกตเห็นได้ว่า

ขอบของหน้าตัดบางด้านมีลักษณะของรอยร้าวเกิดขึ้นหลายตำแหน่ง(ภาพประกอบ 18 กและ 19 ก; เครื่องหมายดอกจัน) อาจเกิดจากร่องลึกของผิวไฟลท์ที่มาจากการกลิ้ง(67, 76)



ภาพประกอบ 21 พื้นผิวหน้าตัดรอยหักบริเวณพื้นที่ที่เสียหายจากการล้า(สีเขียว)และพื้นที่รับแรงเกินพิกัด(สีเหลือง) ของไฟลท์ (ก) ระบบโพรเทปเปอร์เน็กซ์และ (ข) ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของไฟลท์ทั้ง 2 ระบบ(ภาพประกอบ 21) พบว่าไฟลท์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ มีสัดส่วนของพื้นที่ที่เสียหายจากการล้ากว้างกว่าภาพของไฟลท์ระบบโพรเทปเปอร์เน็กซ์ ซึ่งแสดงถึงการมีระยะเวลาที่โลหะทนต่อความล้านานกว่า โดยสอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า ไฟลท์ระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์มีจำนวนรอบการหมุนก่อนหักมากกว่าไฟลท์ระบบโพรเทปเปอร์เน็กซ์ ซึ่งแสดงถึงการมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่มากกว่าไฟลท์ระบบโพรเทปเปอร์เน็กซ์

ไฟลท์ทั้ง 2 ระบบที่นำมาเปรียบเทียบกันในการศึกษานี้มีการออกแบบรูปร่างหน้าตัดใกล้เคียงกัน ซึ่งช่วยลดความแตกต่างในการเปรียบเทียบได้ แต่ประเภทของโลหะที่ใช้กันมีความแตกต่างกัน เนื่องด้วยกระบวนการความร้อนที่ต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สมบัติทางกลของไฟลท์ทั้ง 2 ระบบเกิดความแตกต่าง โดยโลหะประเภทเอ็มไวร์เป็นโลหะที่ผ่านกระบวนการความร้อนก่อนการกลิ้งผิว(79) มีอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเตนไต์ประมาณ 43- 50 องศาเซลเซียส(25) เป็นกลุ่มโลหะวัฏภาคผสม มีวัฏภาคส่วนใหญ่เป็นออสเทนไต์ ซึ่งมีวัฏภาคมาร์เทนไซต์และอาร์เฟสเป็นส่วนประกอบ โลหะเอ็มไวร์จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง จึงมีความยืดหยุ่นและสามารถต้านทานความล้าได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับนิเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม แต่มีความแข็งของโลหะไม่แตกต่างกัน (80)

สำหรับโลหะประเภทไฟรีไวร์เป็นโลหะที่ผ่านกระบวนการความร้อนรูปแบบใหม่ ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการความร้อนประเภทนี้ ทั้งนี้ในการผลิตที่มีการให้ความร้อนแก่โลหะทั้งก่อนหรือหลังการกลึงต่างมีผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างและวิฤภาคของโลหะ กระบวนการความร้อนนี้สามารถปรับปรุงให้โลหะมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น ลดพลังงานความเครียดภายในโลหะ รวมถึงลดอัตราการเกิดและขยายตัวของรอยร้าวได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบให้มากขึ้น จากการสังเกตลักษณะไฟรีระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ พบว่าสีของโลหะมีความแตกต่างจากไฟรีระบบอื่น โดยมีสีเข้มเมื่อกระทบแสงจะเกิดสีสะท้อนที่แตกต่างกัน ส่วนปลายไฟรีพบการโค้งตัวเล็กน้อยก่อนใช้งานซึ่งสามารถดัดตรงได้ โลหะไฟรีไวร์เป็นโลหะนิเกิลไทเทเนียมที่มีสัดส่วนนิเกิลอยู่ระดับต่ำ ซึ่งมีนิเกิลร้อยละ 48 ไทเทเนียมร้อยละ 38 และสารประกอบออกไซด์ร้อยละ 14 (78) โลหะไฟรีไวร์มีการเปลี่ยนแปลงวิฤภาค 2 ช่วงเมื่อลดอุณหภูมิ จะเกิดการเปลี่ยนจากวิฤภาคออสเทนไนต์เป็นอาร์เฟสที่อุณหภูมิช่วง 35-15 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนจากวิฤภาคอาร์เฟสเป็นมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิ -33 - -47 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีการเปลี่ยนวิฤภาคจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิช่วงประมาณ 26- 35 องศาเซลเซียส จึงทำให้เมื่ออุณหภูมิลดลงที่ระดับอุณหภูมิห้องโลหะไฟรีไวร์จะมีวิฤภาคผสมระหว่างอาร์เฟสและออสเทนไนต์ หรือบางกรณีหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาจนถึงอุณหภูมิห้องโลหะจะมีวิฤภาคมาร์เทนไซต์เกิดขึ้น (81) ประกอบกับการศึกษาทางโลหะวิทยาของ Nasr และ Saber(78) พบว่าโลหะไฟรีไวร์พบส่วนประกอบของผลึกวิฤภาคมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับโลหะประเภทซีเอ็มไวร์

ทั้งนี้การมีวิฤภาคมาร์เทนไซต์เป็นส่วนประกอบจะช่วยให้โลหะมีความต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยร้าวที่ดีกว่า(78) เนื่องจากการจัดเรียงอะตอมของวิฤภาคมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (monoclinic crystal structure) ที่มีความสมมาตรน้อยกว่าวิฤภาคออสเทนไนต์ที่เป็นคิวบิก (cubic crystal structure) จึงสามารถต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวได้ (15, 82)

นอกจากไฟรีระบบเอ็ดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ ยังมีไฟรีหลายระบบที่ผลิตจากโลหะประเภทไฟรีไวร์ และมีการศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบกับไฟรีระบบอื่นๆที่ไม่ได้ผลิตจากโลหะไฟรีไวร์ อย่างเช่นการศึกษาของ Gambarini และคณะ(83) พบว่าไฟรีระบบเอ็ดจ์ไวร์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟรีระบบเวฟวันโกลด์ที่ผลิตจากโลหะประเภทโกลด์ไวร์ Khalil และคณะ(84) พบว่าไฟรีระบบเอ็ดจ์ไฟรีมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟรีระบบวันเคิร์ฟที่เป็นโลหะประเภทซีไวร์ Tanomaru-Filho และคณะ

(71) พบว่าไฟลระบบเอ็ดจ์ไฟล์มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟลระบบเอ็มทูที่ผลิตด้วยโลหะนิกเกิลไทเทเนียมแบบดั้งเดิม แต่น้อยกว่าไฟลระบบไฮเพล็กซ์ซีเอ็ม ระบบโพรดีไซน์เอส (Easy Dental Equipment, Belo Horizonte, Brazil) ที่ผลิตจากโลหะประเภทซีเอ็มไวร์ Bueno และคณะ(35)พบว่าไฟลระบบเอ็ดจ์ไฟล์เอ็กซ์วันที่หมุนแบบไปกลับ มีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟลระบบจีเนียสและเวฟวันโกลด์ที่มีการหมุนแบบไปกลับเช่นกัน Jamleh และคณะ(72)พบว่าไฟลระบบเอ็ดจ์เทเปอร์แพลตินัมมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟลระบบโพรเทเปอร์โกลด์ ทั้งนี้หากเปรียบเทียบในสถานะที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน Dosanjh และคณะ(85) พบว่าไฟลระบบเอ็ดจ์ไฟล์จะมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบสูงกว่าไฟลระบบวอร์เท็กซ์บลูและระบบเอ็นโดซีเควนซ์ไฟล์ (Brasseler, USA, Savannah, GA) ทุกระดับอุณหภูมิที่ทดสอบ โดยมีความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 60, 37 และ 22 องศาเซลเซียสตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงทำให้โลหะไฟลไวร์มีส่วนประกอบของวัฏภาคมาร์เทนไซต์มากขึ้น จากผลการศึกษาที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าไฟลที่ผลิตจากโลหะไฟลไวร์มีสมบัติความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับไฟลระบบอื่นๆ รวมถึงผลการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งเป็นไปตามที่บริษัทได้ระบุไว้(10)

อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Scott และคณะ(79)พบว่าผลการทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของไฟลระบบเอ็ดจ์ไฟล์เอ็กซ์วันที่ผลิตจากไฟลไวร์นั้นให้ค่าความเชื่อมั่น (reliability) ของผลการทดสอบน้อยกว่าไฟลระบบเวฟวันและเวฟวันโกลด์ ที่ผลิตจากเอ็มไวร์และโกลด์ไวร์ตามลำดับ โดยอาจเป็นผลมาจากการผลิตที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องบนผิวโลหะหรือจากตัวเนื้อโลหะประเภทไฟลไวร์ นอกจากนั้นการศึกษาของ Arias และคณะ(81)ได้สันนิษฐานไว้ว่า อาจเนื่องจากช่วงอุณหภูมิขณะทดสอบ โลหะไฟลไวร์จะอยู่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนวัฏภาคและเกิดการดูดกลืนพลังงานอย่างมาก

ข้อเสนอแนะ

การทดสอบความต้านทานความล้าจากการหมุนรอบของการศึกษานี้ เป็นข้อมูลที่แสดงถึงสมบัติทางกลของโลหะไฟลไวร์ สามารถช่วยในการตัดสินใจเพื่อเลือกใช้ไฟลสำหรับการเตรียมคลองรากฟันได้ โดยเฉพาะคลองรากฟันโค้งที่อาจเกิดการหักของไฟลเนื่องจากความล้าจากการหมุนรอบ การศึกษาต่อไปอาจศึกษาเพื่อทดสอบสมบัติทางกลด้านอื่นๆ เช่น การทดสอบความต้านทานแรงบิด ความสามารถในการตัด และความยืดหยุ่น ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบกับไฟลระบบอื่นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน

เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐาน จึงทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามหากเป็นการศึกษาที่ต้องประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมซึ่งผ่านกระบวนการความร้อน ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Versiani และคณะ (86) ที่เปรียบเทียบรูปร่างคลองรากฟันภายหลังการเตรียมคลองรากฟันระหว่างกลุ่มไฟล์ระบบอิเล็กทรอนิกส์เอ็นโดเซปเตอร์ ไอเรซ (iRaCe, FKG Dentaire SA, La Chaux-De-Fonds, Switzerland) และเอ็ดจ์ไฟล์ โดยมีการล้างคลองรากฟันด้วยน้ำยาไฮเดียมไฮโปคลอไรต์ที่มีอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทำงานของไฟล์ในลักษณะนี้เกี่ยวข้องกับสมบัติความยืดหยุ่น ซึ่งมาจากวัสดุภาคมาร์เทนไซต์ที่เป็นส่วนประกอบขณะนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบให้ใกล้เคียงระดับอุณหภูมิร่างกาย เพื่อให้การทดลองมีสภาวะใกล้เคียงกับการใช้งานทางคลินิกมากที่สุด

จากการสำรวจผิวไฟล์ระบบเอ็ดจ์เซปเตอร์เอ็นคอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางทันตกรรมพบว่า มีไฟล์จำนวนหนึ่งที่มีความขรุขระบนคมตัด จึงเสนอให้ผู้ผลิตควรเพิ่มขั้นตอนการควบคุมคุณภาพ (Quality control; QC) ของไฟล์ก่อนบรรจุและนำออกจำหน่าย เนื่องจากการใช้งานทางคลินิก ทันตแพทย์อาจไม่สามารถสำรวจพื้นผิวของเครื่องมือก่อนใช้งานได้ และอาจมีผลต่อโอกาสการแตกหักของไฟล์เนื่องจากการความล้าได้

บรรณานุกรม

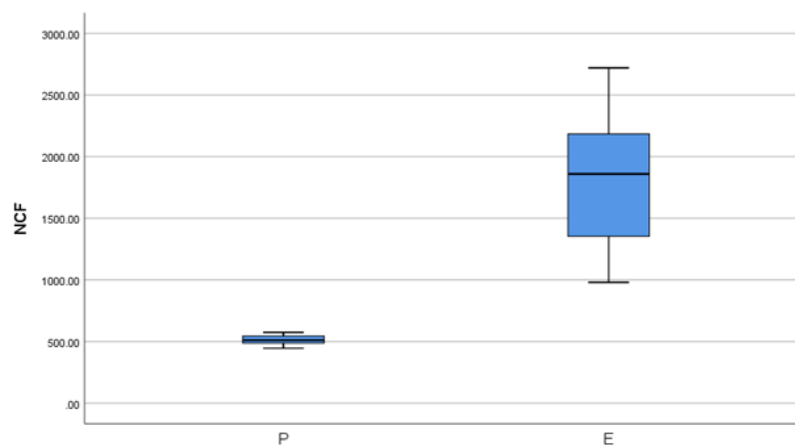




ภาคผนวก

ตาราง 3 ตารางบันทึกเวลาและจำนวนรอบก่อนหักของเครื่องมือ

No.	Group 1 (Protaper Next)		Group 2 (Edge Taper Encore)	
	Time(s)	NCF	Time(s)	NCF
1	102.17	510.85	434.95	2174.75
2	89.07	445.35	438.8	2194
3	114.96	574.8	255.91	1279.55
4	112.06	560.3	236	1180
5	91.99	459.95	434.02	2170.1
6	102.99	514.95	455.97	2279.85
7	100.19	500.95	196.08	980.4
8	102.15	510.75	285.9	1429.5
9	111.08	555.4	309.99	1549.95
10	110.02	550.1	412.84	2064.2
11	93.9	469.5	543.97	2719.85
12	97.01	485.05	371.81	1859.05
13	107.81	539.05	233.86	1169.30
14	97.93	489.65	324.80	1624.00
15	104.03	520.15	472.89	2364.45
Mean+/- SD	102.49±7.69	512.45±38.47	360.52±104.97	1802.60±524.84



ภาพประกอบ 22 แผนภูมิแสดงจำนวนรอบการหมุนก่อนหัก(NCF)ของไฟลระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ (P) และระบบเอดจ์เทเปอร์เอ็นคอร์ด(E)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วศินี แก้วอำไพ
วัน เดือน ปี เกิด	10 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	ประจวบคีรีขันธ์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2555 ทนตแพทยศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2555
ที่อยู่ปัจจุบัน	7/147 ซ.ชลประทาน 35 ต.หัวหิน อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110



1. Aji Markose D. Management of Separated Instruments from the root canal A Review 2016. 43-7 p.
2. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *Journal of endodontics*. 2000;26(3):161-5.
3. Fernandez-Pazos G, Martín-Biedma B, Varela-Patino P, Ruiz-Pinon M, Castelo-Baz P. Fracture and deformation of ProTaper Next instruments after clinical use. *Journal of clinical and experimental dentistry*. 2018;10(11):e1091-e5.
4. Keskin NB, Ozyurek T, Uslu G, Inan U. Cyclic fatigue resistance of new and used ProTaper universal and ProTaper next nickel-titanium rotary instruments. *Saudi Endodontic Journal*. 2018;8(2):82-6.
5. Parashos P, Gordon I, Messer HH. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *Journal of endodontics*. 2004;30(10):722-5.
6. Gavini G, Santos Md, Caldeira CL, Machado ME dL, Freire LG, Iglecias EF, et al. Nickel titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. *Brazilian Oral Research*. 2018;32.
7. Elnaghy AM. Cyclic fatigue resistance of ProTaper Next nickel-titanium rotary files. *International endodontic journal*. 2014;47(11):1034-9.
8. Elnaghy AM, Elsaka SE. Assessment of the mechanical properties of ProTaper Next Nickel-titanium rotary files. *Journal of endodontics*. 2014;40(11):1830-4.
9. Parashos P, Messer HH. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *Journal of endodontics*. 2006;32(11):1031-43.
10. Fire-Wire EEHT. Encore Performance. Enormous Profit [Available from: <https://web.edgeendo.com/edgetaperencore/>].
11. Alqedairi A, Alfawaz H, Rabba A, Almutairi A, Alnafaiy S, Mohammed MK. Failure Analysis and Reliability of Ni–Ti-Based Dental Rotary Files Subjected to Cyclic Fatigue. *Metals*. 2018;8:36.

12. Pereira ES, Singh R, Arias A, Peters OA. In vitro assessment of torque and force generated by novel ProTaper Next Instruments during simulated canal preparation. *Journal of endodontics*. 2013;39(12):1615-9.
13. Cheung GS, Peng B, Bian Z, Shen Y, Darvell BW. Defects in ProTaper S1 instruments after clinical use: fractographic examination. *International endodontic journal*. 2005;38(11):802-9.
14. Cheung GSP. Instrument fracture: mechanisms, removal of fragments, and clinical outcomes. *Endodontic Topics*. 2007;16(1):1-26.
15. Gao Y, Shotton V, Wilkinson K, Phillips G, Johnson WB. Effects of raw material and rotational speed on the cyclic fatigue of ProFile Vortex rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2010;36(7):1205-9.
16. Azimi S, Dds D, Delvari P, Cyrus Hajarian H, Saghiri MA, Bs M, et al. Cyclic Fatigue Resistance and Fractographic Analysis of Race and Protaper Rotary NiTi Instruments 2011. 80-6 p.
17. MODESTO TC, ACOSTA ECP, RESENDE PD, PEREIRA ÉSJ, PEIXOTO IFdC, BUONO VTL, et al. Cyclic flexural fatigue resistance of NiTi Controlled Memory and Blue Technology instruments after torsional preloading. *Journal of Applied Oral Science*. 2018;26.
18. Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL, Jr. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of endodontics*. 1997;23(2):77-85.
19. Zhang E-W, Cheung GSP, Zheng Y-F. Influence of Cross-sectional Design and Dimension on Mechanical Behavior of Nickel-Titanium Instruments under Torsion and Bending: A Numerical Analysis. *Journal of endodontics*. 2010;36(8):1394-8.
20. Ha J-H, Kwak SW, Versluis A, Lee C-J, Park S-H, Kim H-C. The geometric effect of an off-centered cross-section on nickel–titanium rotary instruments: A finite element analysis study. *Journal of Dental Sciences*. 2017;12(2):173-8.
21. Bennett J, Chung KH, Fong H, Johnson J, Paranjpe A. Analysis of Surface Characteristics of ProTaper Universal and ProTaper Next Instruments by Scanning Electron Microscopy. *J Clin Exp Dent*. 2017;9(7):e879-e85.

22. Kim HC, Cheung GS, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Kang SI. Comparison of forces generated during root canal shaping and residual stresses of three nickel-titanium rotary files by using a three-dimensional finite-element analysis. *Journal of endodontics*. 2008;34(6):743-7.
23. Anderson ME, Price JW, Parashos P. Fracture resistance of electropolished rotary nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of endodontics*. 2007;33(10):1212-6.
24. Ye J, Gao Y. Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. *Journal of endodontics*. 2012;38(1):105-7.
25. Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated NiTi alloys – a review. *International endodontic journal*. 2018;51(10):1088-103.
26. Bouska J, Justman B, Williamson A, DeLong C, Qian F. Resistance to cyclic fatigue failure of a new endodontic rotary file. *Journal of endodontics*. 2012;38(5):667-9.
27. Choi J, Oh S, Kim Y-C, Jee K-K, Kum K, Chang S. Fracture Resistance of K3 Nickel-Titanium Files Made from Different Thermal Treatments. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. 2016;2016:6374721.
28. Jain P. Rotary instruments. *Current Therapy in Endodontics*. p. 27-86.
29. Goo H-J, Kwak SW, Ha J-H, Pedulla E, Kim H-C. Mechanical Properties of Various Heat-treated Nickel-titanium Rotary Instruments. *Journal of endodontics*. 2017;43(11):1872-7.
30. Gao Y, Gutmann JL, Wilkinson K, Maxwell R, Ammon D. Evaluation of the impact of raw materials on the fatigue and mechanical properties of ProFile Vortex rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2012;38(3):398-401.
31. Nguyen HH, Fong H, Paranjpe A, Flake NM, Johnson JD, Peters OA. Evaluation of the Resistance to Cyclic Fatigue among ProTaper Next, ProTaper Universal, and Vortex Blue Rotary Instruments. *Journal of endodontics*. 2014;40(8):1190-3.
32. Elnaghy AM, Elsaka SE. Mechanical properties of ProTaper Gold nickel-titanium rotary instruments. *International endodontic journal*. 2016;49(11):1073-8.

33. Srivastava S. Current Strategies in Metallurgical Advances of Rotary NiTi Instruments: A Review. *Journal of Dental Health, Oral Disorders & Therapy*. 2018;9.
34. Uygun AD, Kol E, Topcu MK, Seckin F, Ersoy I, Tanriver M. Variations in cyclic fatigue resistance among ProTaper Gold, ProTaper Next and ProTaper Universal instruments at different levels. *International endodontic journal*. 2016;49(5):494-9.
35. Bueno CRE, Cury MTS, Vasques AMV, Sivieri-Araújo G, Jacinto RC, Gomes-Filho JE, et al. Cyclic fatigue resistance of novel Genius and Edgefile nickel-titanium reciprocating instruments. *Braz Oral Res*. 2019;33:e028.
36. Topcuoglu HS, Topcuoglu G, Kafdag O, Balkaya H. Effect of two different temperatures on resistance to cyclic fatigue of one Curve, EdgeFile, HyFlex CM and ProTaper next files. *Australian Endodontic Journal*. 2020;46(1):68-72.
37. Lopes HP, Ferreira AAP, Elias CN, Moreira EJJ, Machado de Oliveira JC, Siqueira JF. Influence of Rotational Speed on the Cyclic Fatigue of Rotary Nickel-Titanium Endodontic Instruments. *Journal of endodontics*. 2009;35(7):1013-6.
38. Daugherty DW, Gound TG, Comer TL. Comparison of Fracture Rate, Deformation Rate, and Efficiency Between Rotary Endodontic Instruments Driven at 150 rpm and 350 rpm. *Journal of endodontics*. 2001;27(2):93-5.
39. Yared GM, Dagher FE, Machtou P, Kulkarni GK. Influence of rotational speed, torque and operator proficiency on failure of Greater Taper files. *International endodontic journal*. 2002;35(1):7-12.
40. De-Deus G, Moreira EJJ, Lopes HP, Elias CN. Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement. *International endodontic journal*. 2010;43(12):1063-8.
41. Ferreira F, Adeodato C, Barbosa I, Aboud L, Scelza P, Zaccaro Scelza M. Movement kinematics and cyclic fatigue of NiTi rotary instruments: a systematic review. *International endodontic journal*. 2017;50(2):143-52.
42. Pedulla E, Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Rapisarda E. Influence of Continuous or Reciprocating Motion on Cyclic Fatigue Resistance of 4 Different Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of endodontics*. 2013;39(2):258-61.

43. Plotino G, Ahmed HM, Grande NM, Cohen S, Bukiet F. Current Assessment of Reciprocation in Endodontic Preparation: A Comprehensive Review--Part II: Properties and Effectiveness. *Journal of endodontics*. 2015;41(12):1939-50.
44. Ozyurek T, Gundogar M, Yılmaz K, Uslu G. Bending resistance and cyclic fatigue life of Reciproc Blue, WaveOne Gold, and Genius files in a double (S-shaped) curved canal. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*. 2017;11(4):241-6.
45. Moran A. Twisted-Files Adaptive: A Novel Approach to Endodontic NiTi Instrumentation 2017. Available from: https://www.dental-direct.no/files/Bilder_Forside_web/EN_Moran.pdf.
46. Capar ID, Arslan H. A review of instrumentation kinematics of engine-driven nickel–titanium instruments. *International endodontic journal*. 2016;49(2):119-35.
47. Peng C, Hui WU, Wang L, Xin HU, Deng S, Li C, et al. Cyclic fatigue resistance of two nickel-titanium instruments in different curving angles: a comparative study. *Brazilian oral research*. 2015;29:1-7.
48. Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F. ProTaper rotary root canal preparation: assessment of torque and force in relation to canal anatomy. *International endodontic journal*. 2003;36(2):93-9.
49. Svec TA, Powers JM. The deterioration of rotary nickel-titanium files under controlled conditions. *Journal of endodontics*. 2002;28(2):105-7.
50. Peng B, Shen Y, Cheung G, Xia T. Defects in ProTaper S1 instruments after clinical use: Longitudinal examination. *International endodontic journal*. 2005;38:550-7.
51. Gambarini G. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. *International endodontic journal*. 2001;34(5):386-9.
52. Shen Y, Haapasalo M, Cheung GS, Peng B. Defects in nickel-titanium instruments after clinical use. Part 1: Relationship between observed imperfections and factors leading to such defects in a cohort study. *Journal of endodontics*. 2009;35(1):129-32.

53. Berutti E, Negro AR, Lendini M, Pasqualini D. Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2004;30(4):228-30.
54. Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after clinical use. *International endodontic journal*. 2000;33(3):204-7.
55. Yared GM, Dagher FEB, Machtou P. Cyclic fatigue of Profile rotary instruments after simulated clinical use. *International endodontic journal*. 1999;32(2):115-9.
56. Darabara M, Bourithis L, Zinelis S, Papadimitriou GD. Susceptibility to localized corrosion of stainless steel and NiTi endodontic instruments in irrigating solutions. *International endodontic journal*. 2004;37(10):705-10.
57. Haikel Y, Serfaty R, Wilson P, Speisser JM, Allemann C. Mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments and the effect of sodium hypochlorite treatment. *Journal of endodontics*. 1998;24(11):731-5.
58. Ruddle CJ, Machtou P, West JD. The shaping movement: fifth-generation technology. *Dent Today*. 2013;32(4):94, 6-9.
59. Patnana AK, Chugh A. Endodontic Management of Curved Canals with ProTaper Next: A Case Series. *Contemporary clinical dentistry*. 2018;9(Suppl 1):S168-S72.
60. Revised American National Standards Institute/American Dental Association specification no. 28 for root canal files and reamers, type K. Council on Dental Materials, Instruments, and Equipment. *J Am Dent Assoc*. 1982;104(4):506.
61. Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2009;35(11):1469-76.
62. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1971;32(2):271-5.
63. Li U-M, Lee B-S, Shih C-T, Lan W-H, Lin C-P. Cyclic Fatigue of Endodontic Nickel Titanium Rotary Instruments: Static and Dynamic Tests. *Journal of endodontics*. 2002;28(6):448-51.

64. Cheung GSP, Shen Y, Darvell BW. Effect of Environment on Low-cycle Fatigue of a Nickel–Titanium Instrument. *Journal of endodontics*. 2007;33(12):1433-7.
65. Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of endodontics*. 1999;25(6):434-40.
66. Plotino G, Grande NM, Mazza C, Petrovic R, Testarelli L, Gambarini G. Influence of size and taper of artificial canals on the trajectory of NiTi rotary instruments in cyclic fatigue studies. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2010;109(1):e60-e6.
67. Grande NM, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Malagnino VA, Somma F. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of instruments from two nickel-titanium rotary systems. *International endodontic journal*. 2006;39(10):755-63.
68. Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. Measurement of the trajectory of different NiTi rotary instruments in an artificial canal specifically designed for cyclic fatigue tests. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2009;108(3):e152-e6.
69. Alapati SB, Brantley WA, Svec TA, Powers JM, Nusstein JM, Daehn GS. SEM observations of nickel-titanium rotary endodontic instruments that fractured during clinical Use. *Journal of endodontics*. 2005;31(1):40-3.
70. Cho O-I, Versluis A, Cheung GS, Ha J-H, Hur B, Kim H-C. Cyclic fatigue resistance tests of Nickel-Titanium rotary files using simulated canal and weight loading conditions. *Restorative dentistry & endodontics*. 2013;38(1):31-5.
71. Tanomaru-Filho M, Galletti Espir C, Carolina Venção A, Macedo-Serrano N, Camilo-Pinto J, Guerreiro-Tanomaru J. Cyclic Fatigue Resistance of Heat-Treated Nickel-Titanium Instruments. *Iranian endodontic journal*. 2018;13(3):312-7.
72. Jamleh A, Alghaihab A, Alfadley A, Alfawaz H, Alqedairi A, Alfouzan K. Cyclic Fatigue and Torsional Failure of EdgeTaper Platinum Endodontic Files at Simulated Body Temperature. *Journal of endodontics*. 2019;45(5):611-4.

73. Plotino G, Grande N, Sorci E, Malagnino VA, Somma F. A comparison of cyclic fatigue between used and new Mtwo Ni-Ti rotary instruments. *International endodontic journal*. 2006;39:716-23.
74. Lee M-H, Versluis A, Kim B-M, Lee C-J, Hur B, Kim H-C. Correlation between Experimental Cyclic Fatigue Resistance and Numerical Stress Analysis for Nickel-Titanium Rotary Files. *Journal of endodontics*. 2011;37(8):1152-7.
75. Kuhn G, Tavernier B, Jordan L. Influence of Structure on Nickel-Titanium Endodontic Instruments Failure. *Journal of endodontics*. 2001;27(8):516-20.
76. Pirani C, Cirulli PP, Chersoni S, Micele L, Ruggeri O, Prati C. Cyclic Fatigue Testing and Metallographic Analysis of Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of endodontics*. 2011;37(7):1013-6.
77. Fatigue and Fracture: ASM International; 1996. Available from: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v19.9781627081931>.
78. Nasr HMAE, editor *Metallurgical and Mechanical Properties of nickel titanium instruments Made of fire-Wire, controlled Memory Wire, M-Wire, and conventional superelastic Wires* 2014.
79. Scott R, Arias A, Macorra JC, Govindjee S, Peters OA. Resistance to cyclic fatigue of reciprocating instruments determined at body temperature and phase transformation analysis. *Aust Endod J*. 2019;45(3):400-6.
80. Pereira ES, Peixoto IF, Viana AC, Oliveira II, Gonzalez BM, Buono VT, et al. Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *International endodontic journal*. 2012;45(5):469-74.
81. Arias A, Hejlawy S, Murphy S, de la Macorra JC, Govindjee S, Peters OA. Variable impact by ambient temperature on fatigue resistance of heat-treated nickel titanium instruments. *Clin Oral Investig*. 2019;23(3):1101-8.
82. McKelvey AL, Ritchie RO. Fatigue-crack growth behavior in the superelastic and shape-memory alloy nitinol. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001;32(3):731-43.

83. Gambarini G, Galli M, Di Nardo D, Seracchiani M, Donfrancesco O, Testarelli L. Differences in cyclic fatigue lifespan between two different heat treated NiTi endodontic rotary instruments: WaveOne Gold vs EdgeOne Fire. *Journal of clinical and experimental dentistry*. 2019;11:e609-e13.
84. Khalil WA. EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CYCLIC FATIGUE, FLEXIBILITY AND PHASE TRANSFORMATION OF TWO CONTROLLED MEMORY NITI ROTARY INSTRUMENTS. *Egyptian Dental Journal*. 2019;65(Issue 2 - April (Fixed Prosthodontics, Dental Materials, Conservative Dentistry & Endodontics)):1463-8.
85. Dosanjh A, Paurazas S, Askar M. The Effect of Temperature on Cyclic Fatigue of Nickel-titanium Rotary Endodontic Instruments. *Journal of endodontics*. 2017;43(5):823-6.
86. Versiani MA, Carvalho KKT, Mazzi-Chaves JF, Sousa-Neto MD. Micro-computed Tomographic Evaluation of the Shaping Ability of XP-endo Shaper, iRaCe, and EdgeFile Systems in Long Oval-shaped Canals. *Journal of endodontics*. 2018;44(3):489-95.