



การเปรียบเทียบเพื่อดูความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า
ร่วมกับขยายคลองรากฟันระหว่างการรักษาคคลองรากฟันซ้ำเพื่อกำหนดความยาวทำงานที่
ตำแหน่ง 1 และ 0.5 บาร์

COMPARISON OF THE RELIABILITY AND ACCURACY OF THE 2 DIFFERENT
ELECTRONIC APEX-LOCATING HANDPIECES DURING ROOT CANAL RETREATMENT

ภมรฉัตร เกตุ ทราญแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2567

การเปรียบเทียบเพื่อดูความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า
ร่วมกับขยายคลองรากฟันระหว่างการรักษาคคลองรากฟันซ้ำเพื่อกำหนดความยาวทำงานที่
ตำแหน่ง 1 และ 0.5 บาร์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

COMPARISON OF THE RELIABILITY AND ACCURACY OF THE 2 DIFFERENT
ELECTRONIC APEX-LOCATING HANDPIECES DURING ROOT CANAL RETREATMENT
TO DETERMINE THE WORKING LENGTH AT 1 AND 0.5 BAR



PAMORNAUCKAKATE SAIKAEW

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

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2024

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า
ร่วมกับขยายคลองรากฟันระหว่างการรักษาคคลองรากฟันซ้ำเพื่อกำหนดความยาวทำงานที่
ตำแหน่ง 1 และ 0.5 บาร์

ของ

ภมรฉัตร เกตุ ทราญแก้ว

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ.สุวิทย์ วิมลจิตต์)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ทพ. ดร.ธีรเชษฐ นันทกীরติพัฒน์)

ชื่อเรื่อง	การเปรียบเทียบเพื่อดูความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าร่วมกับขยายคลองรากฟันระหว่างการรักษาคลองรากฟันซ้ำเพื่อกำหนดความยาวทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 0.5 บาร์
ผู้วิจัย	ภมรอัคเกต ทรายแก้ว
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2567
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. สุวิทย์ วิมลจิตต์

วัตถุประสงค์: เพื่อเปรียบเทียบหาความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอ็กซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ในการรักษาคลองรากฟันซ้ำวัสดุอุปกรณ์และวิธีการ: ใช้ฟันกรามน้อยบนที่ถูกถอนจำนวน 30 ซี่ รากตรงและมีคลองรากฟันสองรากแยกจากกัน ทำการขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์โพเทเปอร์เน็กซ์ถึงขนาดเอ็กซ์ 2 ที่ความยาวสั้น 0.5 มิลลิเมตรจากรูปลายรากฟัน หลังขยายคลองรากฟันวัดความยาวซ้ำโดยใส่เคไฟล์ขนาด 20 ให้ปลายไฟล์สิ้นสุดที่รูเปิดปลายรากฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง บันทึกค่าโดยหักลบ 0.5 มิลลิเมตรเป็นความยาวที่แท้จริง นำตัวอย่างทั้งหมดอุดคลองรากฟันด้วยกัตตาเปอร์ชาพร้อมกับเอเซพลัสและเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 หลังผ่านไป 7 วันนำขึ้นตัวอย่างติดตั้งในแบบจำลองที่มีอัลจินเตเป็นตัวกลาง แบ่งคลองรากฟันด้านกระพุ้งแก้มและด้านลิ้นในแต่ละตัวอย่างโดยการสุ่มตามเครื่องวัดแต่ละชนิด ได้แก่ เครื่องไทรออดโตซีเอ็กซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกตามลำดับ แต่ละกลุ่มทำการรีอ็อกกัตตาเปอร์ชาโดยใช้ไฟล์เอ็มทูรีทรีตเมนต์ขนาดอาร์ 2 จนเครื่องอ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ วัดความยาวไฟล์เพื่อใช้เป็นความยาวทำงานหลังรักษาคลองรากฟันซ้ำ นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มและใช้กราฟ Bland-Altman เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างความยาวจริงกับความยาวทำงาน และดูความแม่นยำของเครื่องวัดทั้ง 2 ตำแหน่งโดยดูการกระจายตัวเป็นค่าความแตกต่างของความยาวทำงานและความยาวจริง ผลการศึกษา: ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มของเครื่องวัดทั้ง 2 กลุ่ม มีค่าอยู่ระหว่าง 0.876-0.897 ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.670-0.692 ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องกับความยาวจริงมากกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ กราฟ Bland-Altman แสดงความยาวทำงานหลังรักษาคลองรากฟันซ้ำมีค่าเฉลี่ยความต่างระหว่างความยาวทำงานกับความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ ของเครื่องวัดทั้ง 2 กลุ่มเกินความยาวจริง โดยที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยความต่างน้อยกว่าตำแหน่ง 0.5 บาร์ ความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอ็กซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกพบว่า ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 100 และ 96.67 ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรคิดเป็นร้อยละ 23.33 และ 16.67 ตามลำดับ แต่ในช่วง ± 1 มิลลิเมตรคิดเป็นร้อยละ 100 ทั้งหมด อย่างไรก็ตามเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > .05$) สรุป: การใช้ตำแหน่ง 0.5 บาร์ในการวัดความยาวทำงานมีแนวโน้มทำให้ขยายคลองรากฟันเกินความยาวจริงในระหว่างการรักษาคลองรากฟันซ้ำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นตำแหน่ง 1 บาร์ เป็นตำแหน่งที่ควรพิจารณาใช้ในการรักษาคลองรากฟันซ้ำ

คำสำคัญ : เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า, การรักษาคลองรากฟันซ้ำ, เครื่องไทรออดโตซีเอ็กซ์ทู, เครื่องโกลด์เรซิพรอก, การวัดความยาวทำงาน



Title	COMPARISON OF THE RELIABILITY AND ACCURACY OF THE 2 DIFFERENT ELECTRONIC APEX-LOCATING HANDPIECES DURING ROOT CANAL RETREATMENT TO DETERMINE THE WORKING LENGTH AT 1 AND 0.5 BAR
Author	PAMORNAUCKAKATE SAIKAEW
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2024
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Suvit Vimoljit

Objective: The purpose of this study was to compare the reliability and accuracy of the Tri Auto ZX2 and VDW.GOLD®RECIPROC® at the “1” and “0.5” bar measurements during retreatment. Materials and Methods: Thirty extracted maxillary premolar teeth with straight and two separated root canals were selected. The canals were prepared 0.5 mm short of the apical foramen using the Protaper Next F2. Following preparation, a #20 K file was inserted until the tip was just visible at the apical foramen under operating microscope. The actual length (AL) was recorded by subtracting 0.5 mm from that length. The specimens were filled with gutta-percha/AH plus and stored in closed chamber with 100% humidity. After 7 days storage, the roots were mounted in an experimental model with alginate as the medium. Buccal and lingual canal in each specimen were randomly assigned according to the two types of endodontic motor equipment with EAL, Tri Auto ZX2 and VDW.GOLD®RECIPROC®. In either group, the root canal filling was removed by #R2 Mtwo Retreatment file until “1” and “0.5” bar blinked. The length at those determinant points was re-measured as “Retreatment working length (REWL)”. The data were statistically analyzed using the intraclass correlation coefficient (ICC) and the Bland-Altman plots to assess agreement between AL and REWL. Accuracy of each instrument at both bars was evaluated based on the distribution of differences of length between REWL and AL. Results: The ICC from both devices ranged from 0.876 – 0.897 at 1 bar and 0.670 – 0.692 at 0.5 bar, indicating that 1 bar showed better correlation to AL compared to 0.5 bar. The Bland-Altman plots showed that the mean differences between REWL values and AL at 1 and 0.5 bar of devices demonstrated less overestimation at 1 bar compared to 0.5 bar. For accuracy evaluation of Tri Auto ZX2 and VDW.GOLD®RECIPROC®, the value of difference both AL and REWL within ± 0.5 mm. was 100% and 96.67% at 1 bar and 23.33% and 16.67% at 0.5 bar but within ± 1 mm. from both devices were 100%. However, no statistically significant differences were found between the two devices ($p > .05$). Conclusions: Using 0.5 bar as a determinant point tends to result in overinstrumentation during root canal retreatment for both devices. Therefore, 1 bar at EAL should be the position of choice.

Keyword : Electronic apex locator, Retreatment, Tri Auto ZX2, Gold Reciproc, Working length determination

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาของคณาจารย์และบุคลากรหลายท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ทพ.สุวิทย์ วิมลจิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง แก้ไขปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยความใส่ใจเสมอมา รวมทั้งให้แหล่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและครบถ้วนในรายละเอียด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิทยาเอ็นโดไครอนต์ และคณาจารย์ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษและทันตกรรมประดิษฐ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่เมตตาสั่งสอน ให้องค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในงานวิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย จากคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่จัดสรรงบประมาณให้นำมาใช้ และก่อให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยมากที่สุด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และพื้นที่ที่ทำงานวิจัยดำเนินไปได้อย่างราบรื่น รวมทั้งให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือจนงานวิจัยผ่านไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณนางสาวกิตติภาส โสพันนา ซึ่งเป็นตัวแทนจากบริษัท แอ็คเตออน (ประเทศไทย) จำกัด นายอริวัฒน์ ภิญญวัฒน์ศิลป์ และนางสาวศิริพร ผดุงไทย ซึ่งเป็นตัวแทนจากบริษัท เอสดี ทันตเวช (1988) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ามาใช้ในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวและบุคคลรอบข้างที่อยู่ช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องที่มีปัญหาจนท้ายที่สุดทำให้ปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ประสบความสำเร็จตามที่คาดหวัง

ภมรอัคเกต ทรายแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความสำคัญของการวิจัย.....	5
คำถามงานวิจัย.....	6
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	6
ขอบเขตของการวิจัย.....	7
นิยามศัพท์เฉพาะ	7
กรอบแนวคิดการวิจัย.....	8
สมมติฐานการวิจัย	9
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
ความสำคัญในการวัดความยาวรากฟัน.....	10
การรักษาคลองรากฟันซ้ำกับความยาวทำงาน.....	10
ประวัติและหลักการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้า (electronic apex locator)	12
ชนิดของเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	12

ตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวทำงานเพื่อวัดความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า (63)	18
ประเภทของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าและการนำไปใช้ในการรักษาคงรากฟันซ้ำ	18
สื่อกลาง (media) ที่ใช้จำลองการทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าทางห้องปฏิบัติการ (in vitro model)	28
ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากรณีรักษาคงรากฟันซ้ำ	31
ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ (Mt two Retreatment file)	36
วิธีการศึกษาการวัดความยาวรากฟันจริงแบบต่างๆเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	41
วัสดุและอุปกรณ์	41
การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง	42
การเลือกฟัน	43
การเตรียมฟันและวัดความยาวทำงาน	43
การเตรียมคงรากฟัน	45
การอุดคงรากฟัน	46
การรีดักททาเพอร์ชาและวัดความยาวคงรากฟันซ้ำ	46
การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล	52
ผลต่างค่าความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดกับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์	55
ผลต่างค่าความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดกับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์	56

การวิเคราะห์ความสอดคล้องของความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ ในระหว่างการรีอัสดูดคลองรากฟันกับความยาวจริง.....	57
การทดสอบการกระจายตัวเพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องของความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ ในระหว่างการรีอัสดูดคลองรากฟันกับความยาวจริงด้วย	58
การวิเคราะห์เปรียบเทียบหาความแม่นยำระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตชีเอกซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกที่แตกต่างกับความยาวจริง	62
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ.....	65
การอภิปรายผลการวิจัย	65
สรุปผลการวิจัย	73
ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สรุปเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 6 (62).....	16
ตาราง 2 การทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในกรณีรักษาคอลงรากฟันซ้ำด้วยไหมวัดความยาวรากฟัน (EAL).....	21
ตาราง 3 ค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโทรออโตซีเอกซท์ูและโกลด์เรซีพรอกกับความยาวจริง	58
ตาราง 4 ค่าร้อยละกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามช่วงความต่างเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์	63
ตาราง 5 ค่าร้อยละกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามช่วงความต่างเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์	64
ตาราง 6 แสดงการอ่านค่าความยาวจริง ความยาวไฟล์ขณะรื้อกัตาเปอร์ซาที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ในกลุ่มโทรออโตซีเอกซท์ู.....	88
ตาราง 7 แสดงการอ่านค่าความยาวจริง ความยาวไฟล์ขณะรื้อกัตาเปอร์ซาที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ในกลุ่มโกลด์เรซีพรอก.....	89

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย	8
ภาพประกอบ 2 เครื่องมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์เพื่อใช้งานในคลินิกตามหลักการของ Sunada (57)	12
ภาพประกอบ 3 เครื่องมือแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอกซ์ (Root ZX) ของ Kobayashi และ Suda (9)	15
ภาพประกอบ 4 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอกซ์.....	19
ภาพประกอบ 5 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอกซ์ (ซ้าย) เมื่อใช้โหมดวัดความยาว รากฟัน (ขวา) เมื่อใช้โหมดโอทีอาร์ (OTR) วัดและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกัน	20
ภาพประกอบ 6 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเรย์เพกซ์ 5	21
ภาพประกอบ 7 เครื่องโทรออกโตซีเอกซ์.....	25
ภาพประกอบ 8 เครื่องเดนตาพอร์ทซีเอกซ์	26
ภาพประกอบ 9 เครื่องโกลด์เรซีพรอก	28
ภาพประกอบ 10 ไฟลีนิกเกิลไทเทเนียมระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ ขนาดอาร์ 1 (15/.05) และอาร์ 2 (25/.05)	36
ภาพประกอบ 11 การวัดความยาวรากฟันจริงโดยดูระยะห่างระหว่างปลายไฟล์กับจุดคอดปลาย รากฟันที่ตำแหน่ง 4 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน (ซ้าย) ปลายไฟล์อยู่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดคอด ปลายรากฟัน (ขวา) ปลายไฟล์อยู่สั้นกว่าตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน (112).....	37
ภาพประกอบ 12 การวัดความยาวรากฟันจริงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงตำแหน่งปลายไฟล์ที่ บริเวณขอบบนสุดของรูปลายรากฟัน (114)	38
ภาพประกอบ 13 การวัดความยาวรากฟันจริงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอกำลังขยาย 30 เท่า ภายหลังจากการทำฟันให้ใส (115).....	39
ภาพประกอบ 14 การวัดความยาวรากฟันจริงด้วยวิธีการถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ ระดับไมโครเมตร แสดงตำแหน่งปลายไฟล์ที่รูเปิดปลายรากฟัน (117)	40

ภาพประกอบ 15 การคำนวณกลุ่มตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม G* power	42
ภาพประกอบ 16 การเลือกฟันจากลักษณะทางคลินิกและภาพถ่ายรังสี	43
ภาพประกอบ 17 การกรอตัดปุ่มฟันเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงด้วยหัวกรอเร็วปลายสอบเคลือบากเพชร	44
ภาพประกอบ 18 บริเวณปลายรากฟัน ลูกศรสีดำแสดงตำแหน่งปลายไฟล์บริเวณด้านบนของรูปลายรากฟัน.....	44
ภาพประกอบ 19 แสดงการวัดความยาวของไฟล์เพื่อใช้เป็นความยาวทำงาน (initial working length; iWL) โดยใช้โปรแกรม ImageJ ลากเส้นตั้งแต่ปลายไฟล์ถึงขอบล่างของรับเบอร์สตอป .	45
ภาพประกอบ 20 ภาพรังสีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของการอุดหลังการขยายและอุดคลองรากฟัน ด้วยวิธีเวดดิคัลคอนเดนเซชัน (Vertical condensation).....	46
ภาพประกอบ 21 ตัวอย่างแบบจำลองฟันในห้องปฏิบัติการ	47
ภาพประกอบ 22 ภาพจำลองขณะทำการขยายและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอมิเตอร์แสดงไฟสีส้มที่ตำแหน่ง 1 บาร์ของ Tri Auto ZX2	48
ภาพประกอบ 23 ภาพจำลองขณะทำการขยายและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอมิเตอร์แสดงไฟสีส้มที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์หรือแสดงสัญลักษณ์รูป ของ Tri Auto ZX2.....	48
ภาพประกอบ 24 ภาพจำลองขณะทำการขยายคลองและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอมิเตอร์แสดงไฟสีเขียวขีดที่ 1 ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ของ Gold Reciproc	49
ภาพประกอบ 25 ภาพจำลองขณะทำการขยายคลองและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอมิเตอร์แสดงไฟสีเขียวขีดที่ 3 ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ของ Gold Reciproc	50
ภาพประกอบ 26 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงและที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทู (มิลลิเมตร).....	53
ภาพประกอบ 27 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยผลต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูและค่าความยาวจริง (มิลลิเมตร).....	53
ภาพประกอบ 28 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงและที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอค(มิลลิเมตร).....	54

ภาพประกอบ 29 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยผลต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกและค่าความยาวจริง (มิลลิเมตร).....	54
ภาพประกอบ 30 แผนภูมิแท่งแสดงผลต่างความยาวรากฟัน (มิลลิเมตร) ที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์ในรูปแบบการแจกแจงความถี่.....	55
ภาพประกอบ 31 แผนภูมิแท่งแสดงผลต่างความยาวรากฟัน (มิลลิเมตร) ที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ในรูปแบบการแจกแจงความถี่.....	56
ภาพประกอบ 32 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตชีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 1 บาร์และความยาวจริง	59
ภาพประกอบ 33 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตชีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์และความยาวจริง	60
ภาพประกอบ 34 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์และความยาวจริง	61
ภาพประกอบ 35 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์และความยาวจริง	62

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ความสำเร็จของการรักษาคคลองรากฟันมีจุดเริ่มต้นจากการทำความสะอาดและตกแต่งคลองรากฟันเพื่อลดจำนวนเชื้อภายในคลองรากฟัน และการอุดปิดระบบคลองรากฟันให้แน่นเพื่อป้องกันการกลับมาติดเชื้อซ้ำ (1) การมีความยาวรากฟันที่ถูกต้องเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จตามที่กล่าว หากความยาวทำงาน (working length) สั้นกว่าปลายรากฟันจะมีส่วนของคลองรากฟันไม่ได้รับการทำความสะอาด ทำให้มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ในคลองรากฟัน และหากความยาวทำงานเกินกว่าปลายรากฟันย่อมทำให้เกิดการระคายเคืองและการอักเสบ (inflammation) ต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน อาจทำให้เคาะเจ็บหรือปวดเกิดขึ้น (2) Sjogren และคณะ (3) รายงานผลสำเร็จในการรักษาคคลองรากฟันครั้งแรก การอุดคลองรากฟันที่พอดีปลายรากพบอัตราความสำเร็จร้อยละ 94 การอุดเกินปลายรากพบอัตราความสำเร็จร้อยละ 76 แต่หากอุดสั้นกว่าปลายรากมากกว่า 2 มิลลิเมตรพบอัตราความสำเร็จลดลงเหลือร้อยละ 68 ส่วน Chugal และคณะ (4) พบว่าความยาวรากฟันที่สั้นลงทุก 1 มิลลิเมตรในฟันที่มีรอยโรครอบปลายราก อัตราความสำเร็จจะลดลงทุกร้อยละ 14 ดังนั้นการกำหนดความยาวทำงานที่ถูกต้องจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะนำไปสู่ความสำเร็จของการรักษา

จุดสิ้นสุดในการอุดคลองรากฟันที่นิยมที่สุดในการกำหนดความยาวทำงาน คือจุดคอดปลายรากฟัน (apical constriction) เนื่องจากลักษณะทางกายวิภาคเป็นตำแหน่งที่แคบที่สุดของคลองรากฟัน จึงเป็นตำแหน่งที่ลดการทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อล้อมรอบรากฟัน (periapical tissue) ควรเป็นตำแหน่งสิ้นสุดในการทำความสะอาดและอุดคลองรากฟัน (5, 6) การหาตำแหน่งดังกล่าวในทางคลินิกมีหลายวิธี ได้แก่ การถ่ายภาพรังสี การใช้ความรู้สึกสัมผัส การตอบสนองของผู้ป่วย การดูความขึ้นจากการใช้กระดาษขั้บรูปกรวยแหลมซึ่งมีความแม่นยำต่างกันไปขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ทำการรักษา จึงมีการพัฒนาเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า (electronic apex locators; EALs) ขึ้นมาซึ่งพบว่าเป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันได้อย่างถูกต้อง ถึงแม้ว่าตำแหน่งดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปจากการเกิดพยาธิสภาพรอบปลายรากฟันก็ตาม (7)

เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในปัจจุบันอาศัยหลักการคำนวณค่าเชิงสัดส่วน (the ratio method) ของอิมพีแดนซ์ในไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่ ซึ่งค่าความถี่ไฟฟ้าที่ใช้มีความแตกต่างกันไปในแต่ละเครื่องวัดความยาวรากฟัน ทำให้ค่าสัดส่วนนี้มีความแตกต่างกันด้วย แต่

พบว่ามีค่าคงที่เสมอในเครื่องวัดความยาวรากฟันในเครื่องเดียวกันในแต่ละบริษัท ปัจจุบันเครื่องมือที่นิยมใช้คือ เครื่องรูทซีเอกซ์ (Root ZX) ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเครื่องดังกล่าวสามารถบอกความยาวรากฟันได้แม่นยำโดยไม่ขึ้นกับสารละลายภายในคลองรากฟัน (8, 9) มีหลายการศึกษาที่ทดสอบความแม่นยำของเครื่องรูทซีเอกซ์ที่ตำแหน่งรูปลายรากฟัน (apical foramen) หรือ 0 บาร์ (10, 11) พบว่าให้ความแม่นยำคิดเป็นร้อยละ 100 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตรและมากกว่าร้อยละ 80 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตร ส่วนที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันหรือ 0.5 บาร์ (12, 13) ให้ความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 90 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรตามลำดับ อย่างไรก็ตามการวัดค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามกายภาพและสิ่งที่อยู่ภายในคลองรากฟันในสภาวะต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าแต่ละรุ่นที่แตกต่างกัน (14, 15) ยกตัวอย่างเช่น การขยายคลองรากฟันส่วนต้น (16) ขนาดของไฟล์ที่ใช้ในคลองรากฟัน (7) การละลายของปลายรากฟัน (17) ความมีชีวิตของโพรงประสาทฟัน (18) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (19) ชนิดของโลหะที่ใส่ลงในคลองรากฟัน (20) และตำแหน่งที่เครื่องอ่านค่าเพื่อใช้กำหนดความยาวรากฟัน (21) เป็นต้น

กรณีการรักษาคลองรากฟันซ้ำ (nonsurgical endodontic retreatment) การเข้าไปหาจุดคอดปลายรากฟันจะมีกัตตาเปอร์ชา (gutta percha) ร่วมกับซิลิโคนชนิดต่างๆ ขัดขวางอยู่ภายในคลองรากฟัน ทั้งเป็นการเพิ่มความหนาให้กับเนื้อฟัน และการมีส่วนประกอบ (content) ภายในคลองรากฟันที่เปลี่ยนไปทำให้การวัดค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย (22) Mancini และคณะ (23) และ Alves และคณะ (24) พบว่าการมีกัตตาเปอร์ชาอุดปิดอยู่ภายในคลองรากฟัน ทำให้วงจรไฟฟ้าไม่ทำงานจนกว่าไฟล์จะแทรกผ่านเนื้อกัตตาเปอร์ชาไปสัมผัสเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันได้ ส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าลดลง

ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันกรณีรักษาคลองรากฟันซ้ำนั้นพบว่ามีค่าลดลงจากการทำงานที่มีค่ามากกว่าความยาวจริง (25-29) โดยมีความแม่นยำต่ำสุดที่ร้อยละ 80 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน (25-28) และมีบางการศึกษาที่มีความแม่นยำต่ำสุดได้ถึงร้อยละ 58 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตร และร้อยละ 31 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟัน (29) โดยการมีช่วงความแม่นยำที่ค่อนข้างกว้างนั้นขึ้นกับความแตกต่างของวิธีการศึกษาและเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ต่างกัน ซึ่งการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเนื่องมาจากการขัดขวางการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในคลองรากฟันของส่วนประกอบอื่นที่อยู่ในคลองรากฟัน ไม่ว่าจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) กัตตาเปอร์ชา

และซีลเลอร์ (16, 30, 31) ดังนั้นการวัดความยาวเกินรูปลายรากฟันจะนำไปสู่การขยายคลองรากฟันทะลุออกไปทางปลายรากฟัน (over-instrumentation) และอุดคลองรากฟันเกินความยาวทำงาน (over-filled root canal) รวมทั้งเป็นการดันเอาเชื้อโรคภายในคลองรากฟันออกไปนอกปลายรากฟันและทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน จากการศึกษาของ Bergenholtz และคณะ (32) พบว่าเมื่อทำการติดตามการรักษาคลองรากฟันซ้ำย้อนหลังเป็นเวลา 2 ปี พบว่าการอุดคลองรากฟันเกินความยาวทำงานเป็นสาเหตุให้อัตราความสำเร็จในการรักษาลดลงเหลือร้อยละ 36 ขณะที่การศึกษาของ Sjogren และคณะ (3) พบอัตราความสำเร็จลดลงเหลือร้อยละ 50 ส่วนการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (systematic review) ของ Ng และคณะ (33) พบว่าอัตราความสำเร็จโดยรวมลดลงอยู่ที่ร้อยละ 54 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

การทะลุออกไปนอกรูปลายรากฟัน (perforation) ระหว่างการรื้อกัตตาเปอร์ซาร์ร่วมกับการใช้เครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า นั้นเกิดจากความสามารถของไฟล์ในการกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์ซึ่งมีความแตกต่างกัน ทำให้ปริมาณกัตตาเปอร์ซาร์ที่หลงเหลือภายในคลองรากฟันแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์ของเครื่องเปลี่ยนแปลงไป และทำให้ความแม่นยำในการวัดลดลง หากมีการใช้สารละลายกัตตาเปอร์ซาร์ (solvent) ร่วมด้วยจะส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ โดยพบว่ามีความยาวสั้นลงกว่าความยาวจริง (34, 35) ส่วนการศึกษาของ Hülsmann และ Stotz (36) เปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องมือที่ใช้ในการกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์ในคลองรากฟันหลายชนิด พบว่าไม่มีวิธีใดกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์ได้สะอาดทั่วทั้งผนังคลองรากฟัน แต่การใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องใช้เวลาในการกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์และเข้าไปถึงความยาวทำงานได้เร็วกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นการวัดความยาวรากฟันในสถานการณ์ที่สามารถกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์ได้เร็ว น่าจะสนับสนุนให้ความแม่นยำในการวัดค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

ปัจจุบันการใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องในการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันเป็นที่นิยมในการรักษามากยิ่งขึ้น (37-40) แต่เนื่องจากไฟล์ส่วนใหญ่ถูกออกแบบให้มีความผาย (taper) มาก จะตัดกัตตาเปอร์ซาร์ได้มากทั้งส่วนต้นและส่วนกลางแต่คงไว้ที่ส่วนล่างของคลองรากฟัน รวมทั้งตัดเนื้อฟันบริเวณรอบคอฟันได้มาก ทำให้ความแข็งแรงของรากฟันลดลง (37) ร่วมกับไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบทั่วไปการออกแบบปลายของเครื่องมือมักไม่มีความคม (non-cutting tip) ทำให้การกำจัดกัตตาเปอร์ซาร์ต้องใช้แรงกด มีโอกาสทำให้ไฟล์หักและเกิดความร้อนจากการเสียดสีของไฟล์ (41) จึงมีการออกแบบไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมสำหรับรื้อวัสดุอุดคลองรากฟัน (Nickel-Titanium Rotary Retreatment File) โดยมีลักษณะที่มีความคมที่ปลายไฟล์ (cutting tip) และมีความผายที่ลดลงเพื่อลดการตัดเนื้อฟัน แต่เน้นการตัดที่กัตตาเปอร์ซาร์ตลอดคลองรากฟันทำ

ให้คงไว้ซึ่งความแข็งแรงของฟันหลังรักษา โดยมีวิธีการใช้งานที่ง่ายและมีจำนวนไฟล์น้อยกว่าระบบไฟล์ที่ใช้ขยายคลองรากฟันตามปกติ เป็นการลดเวลาในการกำจัดวัสดุในคลองรากฟันให้ถึงปลายรากและลดความเมื่อยล้าต่อทันตแพทย์มากยิ่งขึ้น ในประเทศไทยมีจัดจำหน่ายระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ไฟล์ (Mtwo Retreatment files) เป็นไฟล์ที่มีให้เลือก 2 ขนาดตามความกว้างของคลองรากฟัน ถูกออกแบบมาให้ใช้เป็นไฟล์เพียงตัวเดียวในการรื้อกัตตาเปอร์ชา ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการรื้อที่ดี (42-44)

การใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบดังกล่าวหากต้องการใช้ร่วมกับเครื่องวัดความยาวรากฟัน จำเป็นต้องทำการวัดความยาวรากฟันก่อนในขณะหยุดนิ่ง (static measurement) หลังจากมีการกำจัดกัตตาเปอร์ชาไปบ้างแล้ว โดยการศึกษาของ Chhabra และคณะ (45) เปรียบเทียบการใช้เครื่องมือรูทซีเอกซ์ และเครื่องเอเพ็กซ์ไอดี (Apex ID) ร่วมกับโพเทเปอร์รีทรีตเมนต์ไฟล์ (Protaper retreatment files) และเอ็มทูรีทรีตเมนต์ไฟล์ และการศึกษาของ Pandey และคณะ (46) เปรียบเทียบการใช้เครื่องมือรูทซีเอกซ์และไอรูท (i-Root) ร่วมกับโพเทเปอร์รีทรีตเมนต์ไฟล์และอาร์เอ็นโดรีทรีตเมนต์ไฟล์ (R-Endo retreatment files) พบว่าการใช้โรตารีไฟล์เฉพาะสำหรับการรักษาคลองรากฟันซ้ำและเครื่องวัดความยาวรากฟันที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดกัตตาเปอร์ชาและเนื้อฟันของไฟล์แต่ละระบบไม่เท่ากัน รวมทั้งวงจรไฟฟ้าของเครื่องวัดความยาวรากฟันแต่ละรุ่นมีความแตกต่างกัน จึงเป็นปัจจัยที่ทำให้การวัดความยาวรากฟันมีความคลาดเคลื่อน

ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องวัดความยาวรากฟันร่วมกับเครื่องมือขยายคลองรากฟัน ย่อมทำให้การวัดความยาวรากฟันสามารถกระทำได้ในระหว่างการรักษาหรือมีการเคลื่อนที่ของไฟล์ (dynamic measurement) เครื่องมือดังกล่าวที่พบในประเทศไทย ได้แก่ เครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทู (Tri Auto ZX 2) และเครื่องโกลด์เรซิพรอก (VDW.GOLD®RECIPROC®) โดยที่ไทรออโตซีเอกซ์ทู 2 เป็นการรวมกันระหว่างเครื่องมือรูทซีเอกซ์ และเครื่องมือขยายคลองรากฟันแบบหมุนต่อเนื่อง (continuous motion) ส่วนเครื่องโกลด์เรซิพรอกเป็นการรวมกันระหว่างเครื่องเรย์เพกซ์ 5 (Raypex 5) และเครื่องมือขยายคลองรากฟันแบบหมุนต่อเนื่อง (continuous motion) หรือหมุนไปกลับ (reciprocating motion) ทำให้สามารถวัดความยาวรากฟันและขยายคลองรากฟันได้พร้อมกัน การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสามารถวัดความยาวรากฟันขณะขยายคลองรากฟันในกรณีการรักษาคลองรากฟันครั้งแรกได้แม่นยำที่จุดคอดปลายรากฟันทั้งในเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ (47, 48) และเครื่องโกลด์เรซิพรอก (49, 50)

ในกรณีที่รักษาคล่องรากฟันซ้ำจากการศึกษาของ Uzun และคณะ (51) พบว่าเครื่องไทรออตซีเอกซ์เมื่อทำการรีอัสตูดคล่องรากฟันร่วมกับไฟล์ฮีโร่ 642 (Hero 642) เมื่อใช้โหมดวัดและขยายคล่องรากฟันไปพร้อมกันแบบหมุนกลับอัตโนมัติ (auto-reverse function) พบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 100 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตรและร้อยละ 80 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 60 มีไฟล์เกินออกไปนอกรูเปิดปลายรากฟัน ส่วนเครื่องโกลด์เรซิพรอกนั้นยังไม่มีการศึกษาที่ใช้ร่วมกับการรักษาคล่องรากฟันซ้ำ แต่จากความรู้ที่ผ่านมามีโอกาสที่ไฟล์จะเกินระหว่างการรักษได้สูงเมื่อทำการวัดที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งที่ใช้วัดน่าจะมีส่วนช่วยลดการเกิดรูทะลุที่ปลายรากฟันได้หากกำหนดตำแหน่งวัดให้สั้นลงที่ 1 บาร์ และหากใช้ตำแหน่งดังกล่าวเปรียบเทียบกับตำแหน่ง 0.5 บาร์ในกรณีรีอัสตูดคล่องรากฟันโดยใช้วิธีที่หมุนที่ไฟล์ร่วมกับการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไปพร้อมกันนั้นจะมีความแม่นยำแตกต่างกันหรือไม่ และลดโอกาสที่ไฟล์จะเกินออกจากรูปลายรากฟันได้มากน้อยเพียงใด

ความสำคัญของการวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมามีการวัดความยาวรากฟันในกรณีรักษาคล่องรากฟันซ้ำนั้นมีความแม่นยำลดลงมากกว่าการรักษาคล่องรากฟันครั้งแรก โดยความแม่นยำที่ลดลงมีค่าแตกต่างกันในแต่ละการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวรากฟันจริง เนื่องจากไม่สามารถระบุตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันได้ทั้งหมดเมื่อกำหนดจุดสิ้นสุดที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ และมีการศึกษาส่วนหนึ่งพบว่าไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟันระหว่างการรีอัสตูดคล่องรากฟัน ก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน ส่งผลทำให้อัตราการความสำเร็จในการรักษาคล่องรากฟันซ้ำยิ่งลดลง อีกทั้งเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเมื่อนำมาใช้ในสถานการณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องรีเซ็ตตาเปอร์ชาออกมาได้หมดก่อนเพื่อให้ไฟล์สามารถสัมผัสเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านและทำงานครบวงจร ดังนั้นจึงมีการเสนอให้ใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าร่วมกับเครื่องมือขยายคล่องรากฟันระหว่างการรีอัสตูดคล่องรากฟันมากขึ้น เช่น ไทรออตซีเอกซ์ที่ตัวเครื่องมีระบบหยุดหมุนอัตโนมัติหรือหมุนย้อนกลับเมื่อตรวจพบว่าไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟัน โดยมุ่งหวังให้สามารถวัดความยาวทำงานได้แม่นยำในขณะที่รีเซ็ตตาเปอร์ชาไปพร้อมกัน อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่พบว่าการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันดังกล่าวเมื่อกำหนดจุดสิ้นสุดที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ และไม่ว่าจะใช้ร่วมกับเครื่องมือใดในการกำจัดตาเปอร์ชาก็ยังพบว่าไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟัน

ปัจจุบันประเทศไทยนอกจากเครื่องมือไทรออโตซีเอกซ์ทู (TriAuto ZX2, J. Morita, Tokyo, Japan) ยังมีการเสนอให้ใช้เครื่องโกลด์เรซิพรอก (Gold Reciproc, VDW GmbH, Munich, Germany) ซึ่งทั้ง 2 เครื่องมีหลักการทำงานที่คล้ายกันแต่มีโปรแกรมที่ใช้วัดความยาวรากฟันและมีโหมดการใช้งานที่แตกต่างกันเฉพาะตัว จึงเป็นที่น่าสนใจว่าหากใช้เครื่องมือทั้ง 2 รุ่นในกรณีรักษาคลองรากฟันซ้ำโดยกำหนดจุดสิ้นสุดในการวัดที่สั้นกว่าที่เคยกำหนดเป็นมาตรฐานคือ ตำแหน่ง 1 บาร์ จะมีความแม่นยำมากขึ้นหรือไม่โดยที่ไฟล์ยังคงอยู่ภายในคลองรากฟัน เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่ง 0.5 บาร์ที่ใช้วัดตามปกติ และที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีความแตกต่างจากความยาวรากฟันจริงมากน้อยเพียงใดหากกำหนดค่าความแม่นยำในช่วง ± 0.5 และ ± 1 มิลลิเมตรซึ่งเป็นช่วงที่ยอมรับได้ทางคลินิก โดยยังไม่มีการศึกษาประเด็นดังกล่าวที่ผ่านมาและเพื่อให้การวัดความยาวในการรักษาคลองรากฟันซ้ำทำได้แม่นยำมากขึ้น จึงศึกษาร่วมกับการใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ (Mtwo retreatment, VDW, Munich, German) ที่ออกแบบมาใช้ในการกำจัดตาเปอร์ซาลาโดยที่ไม่ต้องออกแรงกดไฟล์ ในขณะที่การศึกษาที่ผ่านมาใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบปกติสำหรับเตรียมคลองรากฟัน ทางคณะผู้จัดทำจึงสนใจทำการศึกษาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติม หากผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำมากกว่าการศึกษาที่ผ่านมาจะเป็นแนวทางในการหาวิธีและเครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความสำเร็จในการรักษาคลองรากฟันซ้ำมากยิ่งขึ้น

คำถามงานวิจัย

1. เครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในระหว่างทำการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ มีความสอดคล้องกับความยาวจริงหรือไม่
2. เครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าต่างชนิดกันมีผลต่อความแม่นยำในการกำหนดความยาวทำงานที่แตกต่างกันหรือไม่

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อหาความสอดคล้องของความยาวที่วัดจากเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ ในระหว่างทำการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันกับความยาวจริง
2. เพื่อเปรียบเทียบหาความแม่นยำระหว่างเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกที่แตกต่างกับความยาวจริงในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตร

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Laboratory experimental research) โดยจำลองสถานการณ์การใช้เครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ูและโกลด์เรซีพรอกเพื่อนำมาใช้วัดความยาวรากฟันในระหว่างการรื้อกัตาเปอร์ชาด้วยไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรต้น ได้แก่ ชนิดของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกับการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟัน
2. ตัวแปรตาม ได้แก่ ความยาวที่วัดได้จากเครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ูและโกลด์เรซีพรอกที่อ่านค่าตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์

นิยามศัพท์เฉพาะ

เครื่องขยายพร้อมวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า (Electronic apex locator-integrated endodontic handpiece) หมายถึง เครื่องขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนติดตั้งร่วมกับโปรแกรมวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า

ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่อง (Nickel-titanium rotary file) หมายถึง เครื่องมือสำหรับเตรียมคลองรากฟันที่ผลิตจากโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม มีการหมุนโดยเครื่องกล

การรักษาคลองรากฟันซ้ำ (Root canal retreatment) หมายถึง การรักษาคลองรากฟันในพื้นที่เคยรักษาคลองรากฟันมาก่อน

กัตาเปอร์ชา (Gutta-percha) หมายถึง วัสดุอุดคลองรากฟันที่ทำมาจากยางไม้ชนิดหนึ่ง มีส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์ (zinc-oxide) กัตาเปอร์ชา สารทึบแสง และสารที่ทำให้เกิดสี มีลักษณะเป็นแท่งเรียวยาว

ความแม่นยำ (Accuracy) หมายถึง ความสามารถของการวัดที่จะวัดให้ได้ค่าสังเกตที่ใกล้เคียงค่าที่แท้จริง

ความแม่นยำของเครื่องขยายคลองรากฟันพร้อมวัดความยาวรากฟันที่ยอมรับได้ หมายถึง ความยาวฟันที่วัดด้วยเครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ู และเครื่องโกลด์เรซีพรอก เทียบกับความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ความยาวทำงาน (initial working length; iWL) หมายถึง ความยาวคลองรากฟันจริง วัดจากจุดอ้างอิงฟันด้านตัวฟันถึงบริเวณด้านบนของรูปลายรากฟัน (most coronal part of apical foramen) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์จุสโตรีโอใกล้ขยาย 2.5 เท่า และลบ 0.5 มิลลิเมตร

ความยาวคลองรากฟันจริง (actual canal length; AL) หมายถึง ความยาวคลองรากฟันจริงที่วัดหลังจากผ่านการขยายคลองรากฟันโดยมีหลักการวัดเหมือนความยาวทำงาน

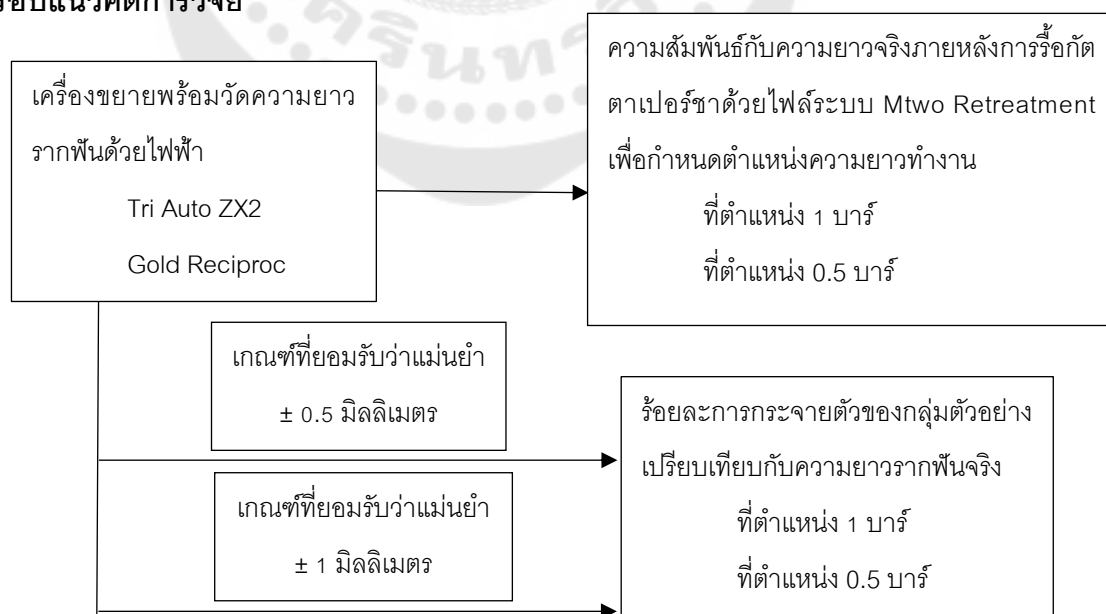
ความยาวไฟล์ หมายถึง ระยะตั้งแต่ตั้งของขอบล่างของรับเบอร์สตอปจนถึงปลายไฟล์ โดยอ่านค่าความยาวไฟล์จากการนำไฟล์ออกมาวางบนแผ่นกระดานดีเส้นกริดขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ถ่ายภาพและวัดความยาวด้วยโปรแกรม ImageJ

ความยาวหลังรักษาคลองรากฟันซ้ำที่ตำแหน่ง 1 บาร์ (Retreatment working length: REWL at 1 mark) หมายถึง ความยาวทำงานขณะรีอ็อกัดตาเปอร์ชาโดยวัดจากจุดอ้างอิงด้านตัวฟันถึงตำแหน่งที่เครื่องวัดอ่านค่าที่ “1 บาร์”

ความยาวหลังรักษาคลองรากฟันซ้ำที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ (Retreatment working length: REWL at 0.5 mark) หมายถึง ความยาวทำงานขณะรีอ็อกัดตาเปอร์ชาโดยวัดจากจุดอ้างอิงด้านตัวฟันถึงตำแหน่งที่เครื่องวัดอ่านค่าที่ “0.5 บาร์”

ผลต่างความยาว (Different length) หมายถึง ค่าผลต่างระหว่างความยาวจริงและความยาวขณะรีอ็อกัดตาเปอร์ชา (Δ REWL; AL - REWL)

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

สมมติฐานหลัก: การกำหนดความยาวทำงานของเครื่องไทรออดโตชีเอกซ์ทูและโกลด์เรซีพรอก เมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ ไม่มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริง

สมมติฐานรอง: การกำหนดความยาวทำงานของเครื่องไทรออดโตชีเอกซ์ทูและโกลด์เรซีพรอก เมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริง

สมมติฐานหลัก: ความแม่นยำในการวัดความยาวทำงานที่ตำแหน่งเดียวกันระหว่างเครื่องไทรออดโตชีเอกซ์ทูและโกลด์เรซีพรอก ไม่มีความแตกต่างกัน

สมมติฐานรอง: ความแม่นยำในการวัดความยาวทำงานที่ตำแหน่งเดียวกันระหว่างเครื่องไทรออดโตชีเอกซ์ทูและโกลด์เรซีพรอก มีความแตกต่างกัน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

ความสำคัญในการวัดความยาวรากฟัน

การวัดความยาวรากฟันมีวัตถุประสงค์เพื่อจะกำหนดความยาวที่จะใช้ในการเตรียมคลองรากฟัน (working length) ซึ่งการวัดความยาวรากฟันได้ถูกต้องมีส่วนสำคัญที่จะทำให้การทำความสะอาด การขยายและการอุดคลองรากฟันทำได้สมบูรณ์ สามารถฆ่าเชื้อโรคที่หลงเหลือให้ได้มากที่สุดและลดการทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อล้อมรอบรากฟัน (periapical tissue) การวัดความยาวรากฟันสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้ภาพรังสี การใช้ความรู้สึกสัมผัส (tactile sense) เมื่อถึงจุดคอดปลายราก (apical constriction) การใช้ความไวต่อสิ่งกระตุ้นของอวัยวะปริทันต์ที่ปลายราก (apical periodontal sensitivity) การวัดจากกระดาษชุบรูป กรวยแหลม (paper point measurement) และการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้า (electronic apex locator) อย่างไรก็ตามไม่มีวิธีใดทำได้ถูกต้องและแม่นยำโดยไม่มีคามผิดพลาด แต่การใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าใช้ได้ดีในหลายสถานการณ์ซึ่งพบว่ามีคามแม่นยำสูงถึงร้อยละ 90-100 (10, 11) และเป็นวิธีเดียวที่วัดความยาวถึงตำแหน่งรูปลายรากฟันได้จริง ทำได้ง่ายและรวดเร็ว แต่ยังคงต้องใช้ภาพถ่ายรังสีช่วยยืนยันเพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกายวิภาคของรากฟัน ความโค้งและความสัมพันธ์ของปลายรากกับอวัยวะอื่นร่วมด้วย

การรักษาคลองรากฟันซ้ำกับความยาวทำงาน

เป้าหมายในการรักษาคลองรากซ้ำ คือการกำจัดการติดเชื้ออีกครั้งหลังจากมีจุลชีพหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟันที่ทำให้เกิดโรคของเนื้อเยื่อในและเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน (pulp and periapical diseases) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่พบได้บ่อยที่สุดจากความล้มเหลวในการรักษาคลองรากฟันครั้งแรก การติดเชื้อซ้ำอาจมาจากการติดเชื้อยืดเยื้อ (persistent infection) หรือการติดเชื้อทุติยภูมิ (secondary infection) (1) ทำให้จุลชีพสามารถแพร่กระจายหรือเพิ่มจำนวนมากขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการติดเชื้อซ้ำ ได้แก่ รูปร่างของคลองรากฟันที่มีความสลับซับซ้อน การมีคลองรากฟันที่ไม่ได้รับการรักษา (missed canal) การรั่วซึมของวัสดุอุดตัวฟัน การเปิดทางเข้าสู่คลองรากฟันที่ไม่เหมาะสมทำให้การทำความสะอาดและตกแต่งคลองรากฟันทำได้

ไม่ดีพอ การเกิดรอยทะลุ (perforations) หรือการหักของเครื่องมือในระหว่างทำการรักษา รวมทั้ง การอุดคลองรากฟันที่ไม่มีคุณภาพทำให้มีจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่ในคลองรากฟันจนเกิดการเพิ่มจำนวนและก่อโรคได้เมื่อเวลาผ่านไป (52, 53)

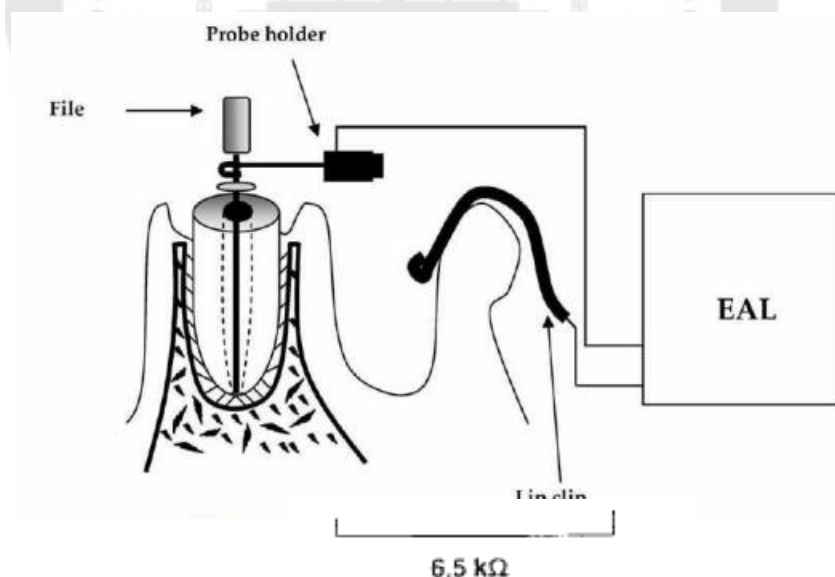
การรักษาคลองรากฟันซ้ำด้วยวิธีอนุรักษ์มีกระบวนการรักษาที่ยุ่งยากกว่าการรักษาคลองรากฟันปกติ ต้องใช้เครื่องมือ ความรู้และความชำนาญของทันตแพทย์ผู้ทำการรักษา หากขาดความระมัดระวังอาจนำไปสู่การสูญเสียฟันในที่สุด ดังนั้นก่อนการรักษาจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งทางคลินิกและภาพรังสี การศึกษาของ Slowey (54) แนะนำสิ่งที่ควรพิจารณาเมื่ออ่านภาพรังสีเริ่มต้นก่อนการรักษาคลองรากฟันซ้ำ คือ 1. กายวิภาคของคลองรากฟัน ควรพิจารณาถึงความโค้ง ความตีบหรือความแปรปรวนของคลองรากฟัน 2. ลักษณะของวัสดุอุดคลองรากฟันเดิม ควรประเมินความแน่น ระดับของวัสดุอุดคลองรากฟันและชนิดของวัสดุอุดคลองรากฟัน 3. ภาวะแทรกซ้อนที่เกิดขึ้น (complication) จากการรักษาคลองรากฟันครั้งก่อนได้แก่ การมีเครื่องมือหักค้างอยู่ รอยทะลุ การเกิดขึ้นในคลองรากฟัน (ledge formation)

จากการทบทวนวรรณกรรมเชิงระบบ (systematic review) การรักษาคลองรากฟันซ้ำด้วยวิธีอนุรักษ์มีอัตราความสำเร็จร้อยละ 74-98 ในขณะที่การรักษาคลองรากฟันซ้ำด้วยวิธีศัลยกรรม (surgical endodontic treatment) มีอัตราความสำเร็จร้อยละ 60-78 (55) จะเห็นได้ว่าอัตราความสำเร็จของการรักษาคลองรากฟันซ้ำด้วยวิธีอนุรักษ์จะสูงกว่าการรักษาด้วยวิธีศัลยกรรมเนื่องจากวิธีศัลยกรรมไม่ได้เข้าไปทำความสะอาดภายในคลองรากฟันแต่การมีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟันส่วนหนึ่งมาจากการมีความยาวทำงาน (working length) ที่ไม่เหมาะสม ความยาวทำงานที่สั้นกว่าปลายรากฟันจะมีส่วนของคลองรากฟันที่ไม่ได้รับการทำความสะอาด ทำให้มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟัน และหากความยาวทำงานเกินกว่าปลายรากฟันย่อมทำให้เกิดการระคายเคืองและการอักเสบ (inflammation) ต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน อาจทำให้เคาะเจ็บหรือปวดเกิดขึ้น และเป็นการดันเอาเชื้อโรคในคลองรากฟันออกไปนอกปลายรากฟันในระหว่างการขยายคลองรากฟัน ส่งผลให้มีเชื้อโรคอยู่นอกคลองรากฟัน (extraradicular infection) ทำให้อัตราความสำเร็จลดลง การศึกษาของ Ng และคณะ (33) ทำ systematic review พบว่าอัตราความสำเร็จโดยรวมของการรักษาคลองรากฟันซ้ำอยู่ที่ร้อยละ 77 โดยปัจจัยที่มีผลต่อการรักษา คือการปรากฏของรอยโรคล้อมรอบปลายรากฟันก่อนการรักษา คุณภาพของวัสดุบูรณะ รวมทั้งความยาวของวัสดุอุดคลองรากฟัน ส่วนการศึกษาของ Bergenholtz และคณะ (32) ทำการติดตามการรักษาคลองรากฟันซ้ำย้อนหลังเป็นเวลา 2 ปี พบว่าการอุดคลองรากฟันเกินความยาวทำงาน (over-filled root canal) ส่งผลให้อัตรา

ความสำเร็จในการรักษาลดลงเหลือร้อยละ 36 ส่วนการอุดคลองรากฟันที่ความยาวทำงานมีอัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 62 สอดคล้องกับ Sjogren และคณะ (3) ที่อัตราความสำเร็จในการรักษาลดลงเหลือร้อยละ 50 หากอุดเกินความยาวทำงานและเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 67 เมื่ออุดที่ระดับความยาวทำงาน

ประวัติและหลักการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้า (electronic apex locator)

Suzuki ในปี 1942 (56) ศึกษาการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในฟันสุนัขพบว่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างเนื้อเยื่อปริทันต์ (periodontal membrane) และขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่เยื่อบุผิวช่องปากของสุนัข (oral mucosa) ทุกตัวมีค่าเท่ากัน ต่อมา Sunada ในปี 1962 (57) ได้นำหลักการนี้มาพัฒนาเครื่องมือวัดความยาวรากฟันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง มีหลักการคือความต้านทานไฟฟ้าระหว่างเยื่อช่องปากและเนื้อเยื่อปริทันต์มีค่าเท่ากับ 6.5 กิโลโอห์ม ค่านี้มีค่าคงที่ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งใดของเนื้อเยื่อปริทันต์ รอยทะเล หรือไม่ว่าจะเป็นฟันที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิตก็ตาม โดยไม่ขึ้นกับอายุของผู้ป่วย รูปร่างและชนิดของซี่ฟัน (ภาพประกอบ 2)



ภาพประกอบ 2 เครื่องมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์เพื่อใช้งานในคลินิกตามหลักการของ Sunada (57)

ชนิดของเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้า

แบ่งตามลักษณะการทำงานของเครื่องมือ ได้แก่

1. หลักการซีสแทนซ์ (Resistance-Type Apex Locators)

เนื่องจากเครื่องมือวัดความยาวในยุคนั้นมีความแม่นยำต่ำจึงเปลี่ยนมาใช้ไฟฟ้า กระแสสลับในการวัดความต้านทานไฟฟ้า (resistance) และความจุไฟฟ้า (capacity) โดยยังใช้หลักการทำงานของ Sunada (57) คือข้างหนึ่งของวงจรไฟฟ้าของเครื่องวัดความยาวรากฟันจะต่อกับเยื่อปริซึมช่องปากด้วยตัวคล้องริมฝีปาก (lip clip) และอีกข้างคือไฟล์ เมื่อนำไฟล์ใส่เข้าไปในคลองรากฟันและไฟล์สัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์กระแสไฟฟ้าจะครบวงจร ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 2 ตำแหน่งเท่ากัน คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของเครื่องวัดความยาวรากฟันและค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างไฟล์กับเยื่อปริซึมช่องปาก (8)

ข้อดี: ใช้งานได้ง่าย ค่าที่วัดสามารถแสดงตำแหน่งของปลายรากในรูปแบบเสียง แสง หรือตัวเลขบนเครื่องวัด สามารถใช้ร่วมกับการทดสอบความมีชีวิตของฟัน และการวัดจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับสารหล่อลื่นที่ไม่มีสี่อนกระแสไฟฟ้า (8)

ข้อด้อย: วัตถุประสงค์ทำให้ผู้ป่วยรู้สึกเจ็บหรือเสียใจได้ ต้องมีการปรับมาตรฐานการวัด (calibrate) ก่อนการใช้งาน คลองรากฟันต้องแห้ง หากไฟล์สัมผัสกับโลหะ น้ำลาย เลือดหนอง เนื้อเยื่อประสาทฟันจะทำให้อ่านค่าผิดพลาดได้ lip clip ต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีโอกาสปนเปื้อนของเชื้อโรคมาจากคนไข้ได้ หลีกเลี่ยงการใช้ในผู้ป่วยโรคหัวใจที่ใส่ตัวควบคุมจังหวะ (cardiac pacemaker) รวมทั้งค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือต่ำเมื่อเทียบกับภาพรังสี

2. หลักอิมพีแดนซ์ (Impedance-Type Apex Locators)

หลักการคือบริเวณที่กว้างจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณที่แคบทำให้ความต้านทานไฟฟ้าต่ำบริเวณด้านบน (coronal) และความต้านทานไฟฟ้าสูงบริเวณปลายราก (apical) ดังนั้นเมื่อเครื่องมือผ่านจุดยอดปลายรากฟันซึ่งเป็นส่วนที่แคบที่สุดของคลองรากฟัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะสูงสุดซึ่งพบว่ามีทรานซแพเร็นท์ เดนติน (transparent dentin) มากที่สุดบริเวณปลายรากฟันและน้อยที่สุดบริเวณด้านบน และเมื่อเครื่องมือเลยส่วนแคบที่สุดของคลองรากฟันออกไปที่รูเปิดปลายรากฟันนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว (8, 58) โดยตัวเครื่องจะใช้กระแสไฟฟ้าความถี่สูง 400 กิโลเฮิร์ตซ์

ข้อดี: คนไข้ไม่ไวต่อสิ่งกระตุ้น โพรบที่ใช้วัดความยาวรากฟันมีฉนวนเคลือบไว้ที่ผิวด้านนอกยกเว้นบริเวณส่วนปลาย ทำให้วัดความยาวรากฟันได้แม้ในสถานะที่มีสารละลายและเนื้อเยื่อประสาทอยู่ภายในคลองรากฟัน (58) สามารถหาตำแหน่งคลองรากฟันด้านข้าง รอยทะลุได้ (8) ใช้ขั้วไฟฟ้า (electrode) แบบมือจับแทน lip clip ทำให้กระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยลดข้อผิดพลาดที่ lip clip สัมผัสริมฝีปากไม่ดีและลดโอกาสปนเปื้อนเชื้อโรคที่มาจากคนไข้

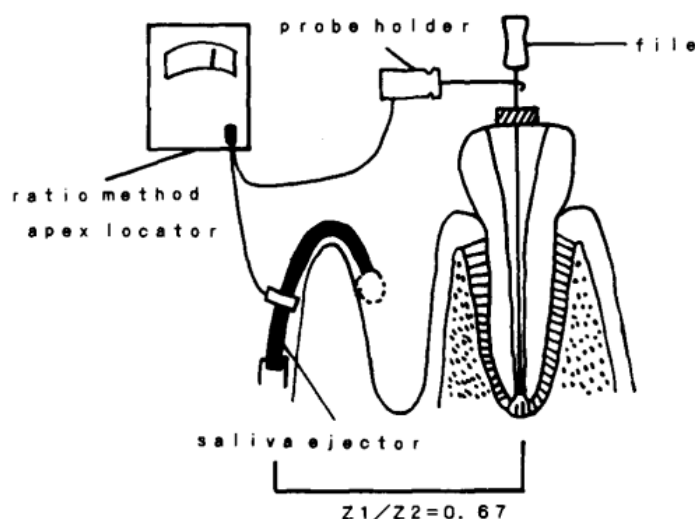
ข้อด้อย: ต้องมีการปรับมาตรฐานการวัดก่อนการใช้งาน ฟันปลายรากเปิด (immature tooth) หรือฟันในผู้ป่วยอายุน้อย transparent dentin จะยังสร้างไม่สมบูรณ์ทำให้ค่าที่วัดมีความแปรปรวน และฉนวนที่เคลือบบนผิวด้านนอกของโพรงทำให้โพรงมีความหนาซึ่งขัดขวางการใส่เครื่องมือลงไปในการวัดฟันโดยเฉพาะในคลองรากที่แคบและโค้ง ทำให้ยากต่อการใช้งาน รวมทั้งการหลุดลอกของฉนวนขณะใช้งาน ทั้งหมดส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดลดลง

3. หลักความถี่ (Frequency-Dependent Apex Locators)

Ushiyama ในปี 1983 (59) ได้นำเสนอหลักการนี้ คือให้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ 400 เฮิร์ตซ์ผ่านขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว (bipolar electrode) แล้ววัดความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ ของคลองรากฟัน ซึ่งค่าที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานไฟฟ้า ความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของทั้ง 2 ขั้วไฟฟ้า (voltage gradient) จะมีค่าคงที่บริเวณด้านบนและเพิ่มขึ้นบริเวณปลายราก โดยให้ค่าสูงสุดเมื่อปลายขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่งแคบสุดของคลองรากฟัน และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อออกไปที่รูเปิดปลายราก

Yamaoka ในปี 1984 นำเสนอเครื่องวัดความยาวรากฟันซึ่งมีหลักการคล้าย Ushiyama แต่ต่างกันตรงที่ใช้ความต่างศักย์คงที่และให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่แตกต่างกัน 2 ความถี่ (5 และ 1 กิโลเฮิร์ตซ์) แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น พบว่าความแตกต่างของความต้านทานไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดเมื่อปลายเครื่องมืออยู่ที่ตำแหน่งแคบสุดของคลองรากฟัน นำไปสู่การพัฒนาเครื่องเอพิต (Apit) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเครื่องจะวัดได้ไม่แม่นยำเมื่ออยู่ในคลองรากฟันที่แห้งเนื่องจากจำเป็นต้องมีอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ในการใช้งานและจำเป็นต้องปรับมาตรฐานการวัดก่อนการใช้งาน

Kobayashi และ Suda ในปี 1994 (9) นำเสนอหลักการเดียวกับ Apit โดยใช้หลักไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่แต่มีความถี่ 8 และ 0.4 กิโลเฮิร์ตซ์แล้ววัดค่าเป็นอัตราส่วน (the ratio method/ division method) ของความแตกต่างความต้านทานไฟฟ้าทั้ง 2 ความถี่ภายในคลองรากฟัน สัดส่วนดังกล่าวมีค่าคงที่เสมอคือ 0.67 เมื่อปลายเครื่องมือผ่านส่วนแคบที่สุดของคลองรากฟันเข้าสู่รูเปิดปลายรากฟันซึ่งต่อมาถูกพัฒนาเป็นเครื่องรูทซีเอกซ์ (Root ZX) ที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน รูทซีเอกซ์เหนือกว่าเครื่องรุ่นอื่นๆ คือความถี่ อิเล็กโทรไลต์ เนื้อเยื่อที่หลงเหลืออยู่ในคลองรากฟันไม่มีผลต่อความแม่นยำ ไม่จำเป็นต้องปรับมาตรฐานการวัดเครื่องก่อนใช้งาน รวมทั้งสามารถอ่านค่าบนหน้าจอมิเตอร์ได้ง่าย (ภาพประกอบ 3)



ภาพประกอบ 3 เครื่องมือแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอ็กซ์ (Root ZX) ของ Kobayashi และ Suda (9)

ข้อดี: ใช้งานได้ง่าย เครื่องแสดงผลบนหน้าจอมิเตอร์และมีเสียงปรากฏออกมา ใช้ได้ร่วมกับเคไฟล์และสารหล่อลื่นที่ไม่มีสีื่อนำกระแสไฟฟ้า

ข้อด้อย: หากมีของเหลวมากเกินไปหรือมีการรั่วซึมของน้ำลายจะทำให้ค่าที่วัดมีความแปรปรวน และถ้าไฟล์สัมผัสกับวัสดุที่เป็นโลหะจะทำให้ความแม่นยำลดลงโดยอ่านค่าได้สั้นกว่าความเป็นจริง lip clip ต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีโอกาสปนเปื้อนของเชื้อโรคมาจากคนไข้ได้

4. หลักความถี่แยกกัน (Two separate frequency-type)

เป็นเครื่องที่ใช้หลายความถี่ (2-5 ความถี่) แต่จะใช้ความถี่ทีละค่าในขณะวัดเพื่อวัดความแตกต่างความต้านทานไฟฟ้าและคำนวณอัตราส่วนของแต่ละความถี่โดยใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุด ต่างจากเครื่องรุ่นที่ 3 ที่ใช้ความถี่ทั้งสองค่าพร้อมกัน โดยบริษัทผู้ผลิตอ้างว่าการใช้ค่าความถี่เดียวขณะวัดจะให้ผลการวัดความยาวคลองรากฟันที่แม่นยำกว่า (60)

5. หลักความจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าแยกกัน (Capacitance and resistance separate)

เป็นเครื่องที่ใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าแยกกันแล้วนำไปเปรียบเทียบกับสถิติที่ได้จากลักษณะทางไฟฟ้าของคลองรากฟัน และพัฒนาการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยมีความแม่นยำการอ่านค่าในคลองรากฟันสภาพเปียกหรือมีอิเล็กโทรไลต์สูง (61)

6. หลักอแดพทีฟ (Adaptive apex locators)

เป็นการนำข้อดีของเครื่องรุ่นที่ 4 และ 5 คือสามารถอ่านค่าและใช้งานได้ในทุกสภาวะที่แห้งและเปียกโดยเครื่องสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วในแต่ละสภาวะ ใช้ความถี่ 2 ค่าแยกกัน โดยบริษัทอ้างว่าการใช้ความถี่เดียวในขณะวัดและใช้ความยาวเฉลี่ยจะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น เนื่องจากการใช้ความถี่ค่าเดียวจะลดการเกิดสัญญาณรบกวนไฟฟ้า (electronic noise) (61)

ตาราง 1 สรุปเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 6 (62)

Generation	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อด้อย	ชื่อการค้า
1 st generation	ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหลักรีซิสแทนซ์ (Resistance-based type)	-สามารถแสดงตำแหน่งปลายราก ในรูปเสียง แสง หรือตัวเลข	-ไวต่อสิ่งกระตุ้น -คลองรากฟันต้อง แห้ง -lip clip ต้องอยู่ใน ตำแหน่งที่เหมาะสม -ต้อง calibrate เครื่องก่อนใช้งาน	-The Root Canal Meter -Endodontic meter -Dentometer -Endo radar -Neosono -Forameter
2 nd generation	ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหลักอิมพีแดนซ์ (Impedance-type)	-ไม่ไวต่อสิ่งกระตุ้น -ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบมือ จับแทน lip clip	-ไม่แสดงค่าวัดบน เครื่อง -ใช้งานยาก -คลองรากฟันต้อง แห้ง -ต้องมีฉนวนเคลือบ ด้านนอกโพรบ -ต้อง calibrate เครื่องก่อนใช้งาน	-Sono-Explorer -Endocater -Digipex -Formatron IV -Endodontic meter S II -Apex finder -Exact-A-Pex
3 rd generation	ใช้หลักไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่ พร้อมกัน เพื่อวัดความแตกต่าง ความต้านทานไฟฟ้าเป็นอัตราส่วน ของทั้ง 2 ความถี่ (Two different frequency-type at the same time / Ratio type)	-ใช้งานง่าย -แสดงค่าวัดบน เครื่องและมีเสียง ปรากฏออกมา -ใช้ได้ทุกสภาวะ คลองรากเปียกหรือ	-lip clip ต้องอยู่ใน ตำแหน่งที่เหมาะสม -ไม่สามารถใช้งานใน คลองรากที่มีเลือด หรือสารหลังจำนวน มากได้	-Root ZX -Endex or Apit -Dentaport ZX -Endod -Mini apex locators

ตาราง 1 (ต่อ)

Generation	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อด้อย	ชื่อการค้า
		มีสารอิเล็กทรอนิกส์. -ไม่ต้อง calibrate เครื่องก่อนใช้งาน		-Endy -Justwo -Mark V plus
4 th generation	ใช้หลักไฟฟ้ากระแสสลับหลาย ความถี่แยกกัน เพื่อวัดความ แตกต่างความต้านทานไฟฟ้าและ คำนวณอัตราส่วนของแต่ละ ความถี่ โดยใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุด (Two or more different nonsimultaneous continuous frequency-type/ Ratio type)	-ให้ความแม่นยำใน คลองรากฟันที่แห้ง ไม่ต้อง calibrate เครื่องก่อนใช้งาน	-ไม่สามารถใช้งาน ในคลองรากฟันที่ เปียก มีเลือดหรือ สารหลังจำนวน มากได้	-Element Dianostic Unit & Apex Locator -Bingo 1020 -Raypex 4 -Raypex 5 -Propex apex locators -Novapex -Ipex -Apex DSP
5 th generation	ใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้า และ ความต้านทานไฟฟ้าแยกกัน (The capacitance and resistance of the circuit separately)	-ใช้ได้ในสถานะ คลองรากเปียกหรือ มีความชื้น เช่น เลือด หนอง น้ำลาย และ น้ำยาล้าง คลองรากฟัน	-ใช้งานยากใน คลองรากฟันที่แห้ง	-Propex II -Apex locator -joypex 5 -I-Root
6 th generation	ใช้หลักไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่ แยกกันโดยรวมข้อดีของเครื่องรุ่นที่ 4 และรุ่นที่ 5 โดยสามารถทำงาน ในสถานะที่แห้งและชื้นภายใน คลองรากฟัน เรียก Adaptive devices	-ใช้ได้ในคลองราก ฟันที่แห้งและชื้น		-Raypex 6

ตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวทำงานเพื่อวัดความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า (63)

1. ปลายรากฟันทางภาพรังสี (radiographic apex) คือ ตำแหน่งที่อยู่ปลายสุดของรากฟันในภาพรังสี
2. จุดคอดปลายรากฟัน (apical constriction) คือ ตำแหน่งบริเวณปลายรากฟันที่คลองรากฟันมีเส้นผ่านศูนย์กลางแคบที่สุด
3. รูปลายรากฟัน (apical foramen) คือ ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันที่ผิวรากฟันด้านนอกสัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์โดยไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกันกับปลายรากทางกายวิภาคหรือปลายรากทางภาพรังสี

ประเภทของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าและการนำไปใช้ในกรณีรักษาลงรากฟันซ้ำ

แบ่งได้ 2 ประเภท

1. เครื่องวัดความยาวคลองรากฟันขณะหยุดนิ่ง (static measurement)

เครื่องวัดความยาวคลองรากฟันขณะหยุดนิ่งมีการพัฒนาดังแต่รุ่นที่ 1 จนถึงรุ่นที่ 6 ถูกออกแบบให้อ่านค่าเมื่อโพล์ผ่านรูปลายรากฟันออกไปสัมผัสกับอวัยวะปริทันต์ หลักการคือเมื่อเชื่อมต่อครบวงจรความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงต่ำและกระแสไฟฟ้าครบวงจรเครื่องจะแสดงค่าด้วยเสียง แสงแฟลชบนหน้าจอดิจิทัล ซึ่งรูทซีเอกซ์เป็นเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและมีหลายการศึกษาที่พบว่าให้ผลแม่นยำแต่เป็นขั้นตอนที่ควรทำก่อนการขยายคลองรากฟัน

รูทซีเอกซ์

รูทซีเอกซ์ (Root ZX, J Morita, Tokyo, Japan) เป็นเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นที่ 3 (Third generation) ที่นิยมใช้มากที่สุด มักถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นอื่นๆ โดย Kobayashi และ Suda ในปี 1994 (9) ได้คิดค้นประดิษฐ์เครื่องรูทซีเอกซ์เพื่อกำหนดตำแหน่งปลายคลองรากฟันด้วยไฟฟ้า มีหลักการทำงานคือ การใช้ค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์ (the ratio method/division method) จากไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่ได้แก่ 8 และ 0.4 กิโลเฮิร์ตซ์พร้อมกัน ค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์จะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.67 เมื่อปลายเครื่องมือผ่านตำแหน่งแคบที่สุดของคลองรากฟันหรืออัตราค่าอิมพีแดนซ์จะลดลงอย่างมากที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน ทำให้สามารถประมาณตำแหน่งที่ปลายรากฟันได้ (ภาพประกอบ 4)



ภาพประกอบ 4 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอกซ์

ตัวเครื่องมีให้เลือกอ่านค่าได้ คือ 0.5 บาร์ เป็นตำแหน่งแคบสุดของรูเปิดปลายรากฟัน และเอเพกซ์ (apex) เป็นตำแหน่งขอบบนสุดของรูเปิดปลายรากฟัน แต่ตามคำแนะนำของ Kobayashi ในปี 1995 (64) ให้อ่านค่าที่ 0.5 บาร์และหักลบอีก 0.5 มิลลิเมตรเป็นค่าความยาวทำงานในคลินิกสำหรับฟันแท้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเครื่องรูทซีเอกซ์ให้ความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 80 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรและร้อยละ 100 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตรจากรูเปิดปลายรากฟัน (10, 11) และให้ความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 90 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดยอดปลายรากฟัน (12, 13) ตามลำดับ ต่อมาพัฒนาเป็นเครื่องรูทซีเอกซ์ทู (Root ZX II, J.Morita, Tokyo, Japan) โดยตัวเครื่องสามารถต่อกับเครื่องขยายแบบหมุน (rotary handpiece) ทำให้สามารถวัดความยาวรากฟันและขยายคลองรากฟันได้พร้อมกัน มีโหมด OTR (Optimum Torque Reverse) เพื่อใช้ขยายคลองรากฟันโดยเป็นการหมุนไฟล์ถอยกลับหากแรงที่ใช้ขยายคลองรากฟันเกินค่าทอร์กที่ตั้งไว้ เพื่อลดความเมื่อยล้าให้กับไฟล์และช่วยป้องกันการเกิดไฟล์หัก สามารถใช้งานได้ทั้งในสภาวะที่แห้งหรือมีความชื้น ระบบหน้าจอเป็นแอลอีดี (LED) ขนาดใหญ่มองเห็นได้ชัด ใช้แสดงระดับสีเพื่อบอกตำแหน่งปลายรากฟัน ไม่ต้องปรับปรับมาตรฐานการวัดของเครื่องมือก่อนใช้งาน (ภาพประกอบ 5)

กรณีรักษาคลองรากฟันซ้ำเครื่องรูทซีเอกซ์ให้ความแม่นยำตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไป ที่ระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรและมากกว่าร้อยละ 90 ที่ระยะ ± 1 มิลลิเมตรจากจุดยอดปลายรากฟัน (25, 27, 65) ในขณะที่การศึกษาของ Mancini และคณะ (23) พบว่าเครื่องรูทซีเอกซ์วัดความยาวคลองรากฟันเกินภายในระยะ 1 มิลลิเมตรจากรูปลายรากฟันเป็นส่วนใหญ่หลังวิธีวัสดุอุดคลอง

รากฟัน และมากกว่าก่อนอุดคลองรากฟันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งส่งผลให้เกิดความล้มเหลวในการรักษามากยิ่งขึ้น



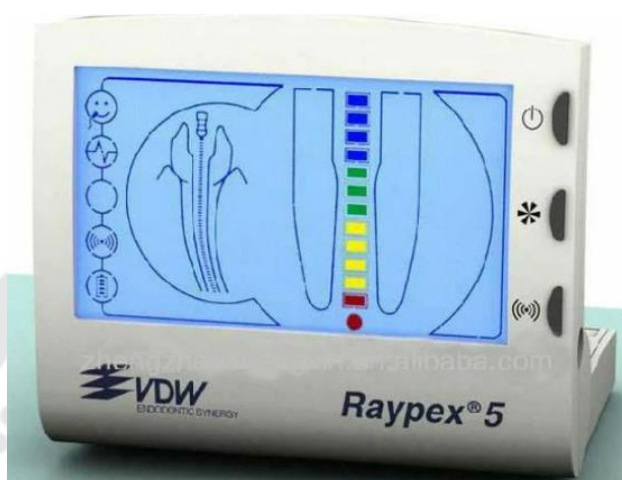
ภาพประกอบ 5 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทีเอกซ์ทู (ซ้าย) เมื่อใช้โหมดวัดความยาวรากฟัน (ขวา) เมื่อใช้โหมดโอทีอาร์ (OTR) วัดและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกัน

เรย์เพกซ์ 5

เรย์เพกซ์ 5 (Raypex 5, VDW, Munich, Germany) เป็นเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นที่ 4 (Fourth generation) และใช้ค่าความถี่ 2 ค่าในการวัดคือ 8 และ 0.4 กิโลเฮิร์ตซ์เช่นเดียวกับรุ่นที่ 3 แต่แตกต่างกันที่ใช้ค่าความถี่ที่ละค่าในขณะวัดซึ่งต่างจากเครื่องรุ่นที่ 3 ที่ใช้ความถี่ 2 ค่าพร้อมกัน ระบบหน้าจอเป็นแอลอีดี (LED) แสดงระดับสีเพื่อบอกตำแหน่งปลายรากฟัน ได้แก่ สีฟ้าสีขีดแสดงตำแหน่งส่วนต้นของปลายรากฟัน สีเขียวสามขีดแสดงตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน สีเหลืองสีขีดแสดงตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันจนถึงตำแหน่งใกล้รูปปลายรากฟัน สีแดงหนึ่งขีดแสดงตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟัน และสีแดงหนึ่งจุดแสดงตำแหน่งเกินออกนอกรูปปลายรากฟัน (ภาพประกอบ 6) โดยมีการศึกษาที่พบว่าของ Wrbas และคณะ (66) ได้ทดลองวัดความแม่นยำของเครื่องเรย์เพกซ์ 5 ในทางคลินิกพบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 80 มิลลิเมตรภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่จุดคอดปลายรากฟันโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเครื่องรูทีเอกซ์ ส่วนการศึกษาของ Gomes และคณะ (67) ทดลองวัดในห้องปฏิบัติการพบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 71.7 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรและร้อยละ 88.4 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตรที่จุดคอดปลายรากฟัน และการศึกษาของ Stober และคณะ (68) ทดลองวัดในทางคลินิกพบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 75 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรและร้อยละ

100 ภายในระยะ ± 1 มิลลิเมตรจากรูปลายรากฟันโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเครื่องเดนทาพอร์ทซีเอกซ์ (Dentaport ZX)

กรณีรักษาลองรากฟันพบว่ายังไม่มีการศึกษาที่ทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำร่วมกับเครื่องเรย์เพกซ์ 5



ภาพประกอบ 6 เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเรย์เพกซ์ 5

ตาราง 2 การทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในกรณีรักษาลองรากฟันด้วยโหมดวัดความยาวรากฟัน (EAL)

การศึกษา	เครื่องวัดความยาวรากฟัน	ร้อยละความแม่นยำตรง (±ระยะทางที่ยอมรับ)	ตำแหน่งที่อ่านค่า	เปรียบเทียบกับ	วิธีที่ศึกษา	สีฟัน	จำนวน
Goldberg และคณะ (25)	Root ZX NovApex Propex	-Root ZX 95% (± 0.5), 100% (± 1) -NovApex 85% (± 0.5), 95% (± 1) -Propex 80% (± 0.5), 95% (± 1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน - 0.5 มม.	Direct view	ฟันรากเดี่ยว	20

ตาราง 2 (ต่อ)

การศึกษา	เครื่องมือวัด ความยาว รากฟัน	ร้อยละความแม่นยำ ตรง (±ระยะทางที่ ยอมรับ)	ตำแหน่ง ที่อ่านค่า	เปรียบเทียบกับ	วิธีที่ศึกษา	ซี่ฟัน	จำนวน
Tufenkci และ Kalayci (26)	-Dentaport ZX -Propex Pixi -iPex II	-Dentaport ZX 83.3% (±0.5), 86.6% (±1) -Propex Pixi 83.4% (±0.5), 93.4% (±1) -iPex II 80% (±0.5), 90% (±1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน – 0.5 มม.	Direct view (microscope)	ฟันตัด หน้าซี่ กลางและ ซี่ข้างล่าง	90
จำนวนที่เกินปลายรากฟัน: Dentaport ZX 63.3%, Propex Pixi 73.3% และ iPex II 76.7%							
Aggarwal และคณะ (27)	-Root ZX	Root ZX -Gutta percha + ZOE sealer 70% (±0.5), 90% (±1) -Gutta percha + AH plus sealer 80% (±0.5), 10% (±1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน ที่รูปลายราก ฟัน	Direct view (magnification)	ฟันกราม น้อยล่าง รากเดียว	60
Cimilli และคณะ (28)	-Dentaport ZX	-Dentaport ZX 93.3% (±0.5), 100% (±1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน ที่รูปลายราก ฟัน	Direct view (magnification)	คลองราก ฟันใกล้ กลางและ ไกลกลาง ของฟัน กรามล่าง ซี่ที่ 1	15

ตาราง 2 (ต่อ)

การศึกษา	เครื่องมือวัด ความยาว รากฟัน	ร้อยละความแม่นยำ (±ระยะทางที่ยอมรับ)	ตำแหน่ง ที่อ่านค่า	เปรียบเทียบกับ	วิธีที่ศึกษา	ซี่ฟัน	จำนวน
Ebrahim และคณะ (29)	-Dentaport ZX -Propex -Formatron D10 -Apex NRG -Apit 7	-Dentaport ZX 93% (±0.5), 100% (±1) -Propex 81% (±0.5), 92% (±1) -Formatron D10 73% (±0.5), 85% (±1) -Apex NRG 58% (±0.5), 69% (±1) -Apit 7 31% (±0.5), 58% (±1)	เอเพ็กซ์	ความยาวฟัน - 0.5 มม.	Direct view (microscope)	ฟันรากเดี่ยว	32
จำนวนที่เกินปลายรากฟัน: Dentaport ZX 8%, Propex 4%, Formatron D10.4%, Apex NRG 0% และ Apit 7.4%							
Pandey และคณะ (50)	-Root ZX -iRoot	-Root ZX 72.5% (±0.5), 95% (±1) -iRoot 30% (±0.5), 72.5% (±1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน - 1 มม.	Direct view	ฟันกรามน้อยรากเดี่ยว	40
จำนวนที่เกินปลายรากฟัน: Root ZX 92.5% และ iRoot 92.5%							
Maghaireh และคณะ (65)	-Root ZX II -Mini Apex Locator	-Root ZX II 97% (±0.5), 100% (±1) -Mini Apex Locator 97% (±0.5), 100% (±1)	0.5 บาร์	ความยาวฟัน - 0.5 มม.	Direct view (magnification)	ฟันตัดหน้าซี่กลางและซี่ข้าง ฟันเขี้ยว และ ฟันกรามน้อยบนและล่าง	47

2. เครื่องวัดความยาวคลองรากฟันร่วมกับการใช้เพื่อเตรียมคลองรากฟัน (dynamic measurement)

ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ามาใช้ร่วมกับระบบโรตารีไฟล์ (rotary files) ที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเพื่อช่วยควบคุมความยาวทำงานขณะขยายคลองรากฟัน และขณะรีดวัสดุอุดคลองรากฟันในการรักษาคคลองรากฟันซ้ำ โดยมุ่งหวังให้สามารถคงความยาวทำงานได้ตลอดขณะขยายคลองรากฟัน ลดโอกาสขยายเกินออกไปนอกปลายรากฟัน จัดจำหน่ายออกมาหลายยี่ห้อ ได้แก่ ไทรออโตซีเอกซ์ (TriAuto ZX, J. Morita, Tokyo, Japan), เดนตาพอร์ทซีเอกซ์ (Dentaport ZX, Morita Co, Japan) และโกลด์เรซิพรอก (Gold Reciproc, VDW GmbH, Munich, Germany)

ไทรออโตซีเอกซ์

ไทรออโตซีเอกซ์ (TriAuto ZX, J. Morita, Tokyo, Japan) เป็นเครื่องมือที่ใช้รูทซีเอกซ์ร่วมกับเครื่องขยายคลองรากฟันแบบหมุนชนิดไร้สาย สามารถวัดความยาวคลองรากฟันร่วมกับขยายคลองรากฟันไปพร้อมกัน และสามารถใช้งานแยกส่วนได้ มีระบบ Auto-Apical-Reverse เมื่อปลายไฟล์ถึงปลายรากฟันในตำแหน่งที่กำหนดไว้ไฟล์จะหมุนย้อนกลับอัตโนมัติ ระบบ Auto-Apical-Stop เมื่อปลายไฟล์ถึงปลายรากฟันในตำแหน่งที่กำหนดไว้ไฟล์จะหยุดหมุนอัตโนมัติเพื่อป้องกันการขยายเกินความยาวปลายรากฟัน ระบบ Auto Torque Reverse เมื่อมีแรงบิดกระทำกับผนังคลองรากฟันเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้จะหมุนย้อนกลับอัตโนมัติเพื่อป้องกันไฟล์หัก รวมทั้งระบบ Auto-Start, Auto-Stop ให้เครื่องมือหมุนเมื่อไฟล์สัมผัสกับเนื้อฟันและหยุดหมุนเมื่อดึงไฟล์ออกจากคลองรากฟันโดยอัตโนมัติ ปัจจุบันมีการพัฒนาเป็นรุ่นใหม่ คือ ไทรออโตซีเอกซ์ทู (Tri Auto ZX2) (ภาพประกอบ 7) สามารถวัดความยาวรากฟันเพียงอย่างเดียวหรือวัดความยาวพร้อมกับการเตรียมคลองรากฟันด้วยการหมุนต่อเนื่อง (continuous rotation) โดยเพิ่มโหมด OGP (Optimum Glide Path) เพื่อใช้สำรวจคลองรากฟัน (negotiation) และสร้างช่องทางนำ (glide path) ก่อนขยายคลองรากฟัน และโหมด OTR (Optimum Torque Reverse) เพื่อใช้ขยายคลองรากฟันโดยหมุนต่อเนื่องตามปกติแต่เมื่อมีแรงต้านเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้จะหมุนกลับอัตโนมัติแล้วเมื่อไฟล์มีความต้านทานลดลงไฟล์จะกลับมาหมุนต่อเนื่องเช่นเดิม เป็นการลดความล้าและความเครียดให้กับไฟล์ และทำให้ตัดและกำจัดเศษเนื้อฟันได้ดีขึ้น นอกจากนี้ทั้ง 2 โหมดยังมีระบบ OAS (Optimum Apical Stop) เป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกาอัตโนมัติ $\frac{1}{2}$ -1 รอบ และหยุดหมุนเมื่อปลายไฟล์ตรวจพบว่าอยู่ตำแหน่งใกล้ปลายรากฟันเพื่อป้องกันปลายไฟล์เกินปลายรากฟัน โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเครื่องไทรออโตซีเอกซ์มีความแม่นยำในการวัดความยาวคลองรากฟันเมื่อเทียบกับความยาวรากฟันที่แท้จริงร้อยละ 92.86 เมื่อใช้โหมดวัดความยาวรากฟัน (EMR)

(69) ร้อยละ 85 เมื่อใช้ระบบหมุนกลับอัตโนมัติ (auto-reverse function) (47) และร้อยละ 100 ทั้งสองโหมด (70) ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดกดปลายรากฟัน

กรณีรักษาลองรากฟันซี่ Alves และคณะ (24) ใช้โหมดวัดความยาวรากฟัน (EMR) หลังรื้อกั๊ตตาเปอร์ชาพบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 81 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟัน โดยเกือบครึ่งหนึ่งของตัวอย่างทั้งหมดมีไฟล์เกินออกไปนอกรูเปิดปลายรากฟัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Uzun และคณะ (71) เมื่อใช้โหมด EMR มีความแม่นยำร้อยละ 90 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟัน แต่ความแม่นยำลดลงเมื่อใช้โหมด auto-reverse function เพื่อทำการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันร่วมกับไฟล์ฮีโร่ 642 (Hero 642) เหลือเพียงร้อยละ 80 ซึ่งมีความแม่นยำลดลงเมื่อเทียบกับความยาวฟันที่แท้จริงและความยาวโหมด EMR อย่างมีนัยสำคัญ และตัวอย่างทั้งหมดมีไฟล์เกินออกไปนอกรูเปิดปลายรากฟัน ส่วนการศึกษาของ Uzun และคณะ (51) ในปีถัดมาใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันและไฟล์ระบบเดียวกันเมื่อทำการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟัน เมื่อใช้โหมด EMR มีความแม่นยำร้อยละ 90 และโหมด auto-reverse function เหลือเพียงร้อยละ 80 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งจุดกดปลายรากฟัน โดยตัวอย่างร้อยละ 60 มีไฟล์เกินออกไปนอกจุดกดปลายรากฟัน ดังนั้นการใช้เครื่องโทรออกโตซีเอกซ์รุ่นแรกวัดความยาวรากฟันในกรณีรื้อวัสดุอุดเพื่อรักษาลองรากฟันซี่นั้น แสดงให้เห็นการเกินของไฟล์ออกนอกปลายรากฟันได้สูงกว่าปกติ อาจเป็นเพราะเครื่องมือตรวจจับตำแหน่งความยาวได้ก็ต่อเมื่อไฟล์เคลื่อนผ่านกั๊ตตาเปอร์ชาไปแล้ว หรือแรงกดของผู้ทำการทดลองที่ควบคุมได้ไม่ดี จึงควรใช้เครื่องมืออย่างระมัดระวังและแนะนำอ่านค่าความยาวรากฟันโดยกำหนดตำแหน่งให้สั้นกว่าปกติ



ภาพประกอบ 7 เครื่องโทรออกโตซีเอกซ์รุ่นแรก

เดนตาพอร์ทซีเอกซ์

เดนตาพอร์ทซีเอกซ์ (Dentaport ZX, Morita Co, Japan) มีหลักการทำงานเหมือนเครื่องรูทซีเอกซ์และเป็นเครื่องที่พัฒนามาจากไทรออตซีเอกซ์ สามารถวัดความยาวรากฟันและขยายคลองรากฟันพร้อมกัน โดยตัวเครื่องสามารถต่อกับเครื่องขยายแบบหมุน (rotary handpiece) และสามารถใช้งานแยกส่วนได้ มีโหมด OTR (Optimum Torque Reverse) เพื่อใช้ขยายคลองรากฟัน ตัวเครื่องปรับปรุงให้ควบคุมการใช้งานได้ง่ายขึ้น มีความเร็วรอบในการหมุนลดลง เครื่องมือจึงเกิดการตัดช้าลงเป็นการป้องกันการหักของไฟล์และป้องกันการขยายเกินออกนอกรูปลายรากฟัน สามารถวัดความยาวภายในคลองรากฟันทั้งสภาวะเปียกหรือแห้งได้ (ภาพประกอบ 7) การศึกษาของ Duh และคณะ (72) พบว่าเครื่องเดนตาพอร์ทซีเอกซ์มีความแม่นยำในการวัดความยาวคลองรากฟันเมื่อเทียบกับความยาวรากฟันที่แท้จริงมากกว่าร้อยละ 95 เมื่อใช้โหมดวัดความยาวรากฟันภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดคอดปลายรากฟัน โดยมีความแม่นยำเทียบเท่ากับเครื่องรูทซีเอกซ์

ในกรณีรักษาคลองรากฟันซ้ำ การศึกษาของ Ebrahim และคณะ (29) พบว่าเมื่อใช้โหมดวัดความยาวรากฟันมีความแม่นยำร้อยละ 92 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดเปิดปลายรากฟัน สอดคล้องกับ Cimilli และคณะ (28) ที่ให้ความแม่นยำไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดเปิดปลายรากฟัน แต่กลับมีความแม่นยำลดลงเมื่อวัดที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันโดยพบว่ามีค่าความยาวทำงานสั้นกว่าปกติ



ภาพประกอบ 8 เครื่องเดนตาพอร์ทซีเอกซ์

โกลด์เรซิพรอก

โกลด์เรซิพรอก (Gold Reciproc, VDW GmbH, Munich, Germany) เป็นเครื่องขยายและวัดความยาวคลองรากฟันในเครื่องเดียวกัน ใช้โปรแกรมวัดความยาวคลองรากฟันจากเครื่องเรย์เพกซ์ 5 มีโหมดหยุดปลายรากอัตโนมัติ (Apical Auto Stop) เครื่องจะหยุดหมุนอัตโนมัติเมื่อปลายไฟล์อยู่บริเวณปลายรากฟันเพื่อช่วยลดโอกาสการขยายออกนอกรูเปิดปลายรากฟัน มีแป้นเหยียบในการบังคับ สามารถปรับค่าแรงบิด (torque) ความเร็ว (speed) และรองรับไฟล์ระบบหมุนรอบต่อเนื่องและหมุนไปกลับ โหมดหมุนแบบต่อเนื่องจะมีระบบความปลอดภัยอัตโนมัติโดยโปรแกรม ANA ช่วยลดแรงบิดเกินกำหนดระหว่างขยายคลองรากฟันที่ซับซ้อน และโปรแกรม ASR (Auto-Stop-Reverse) ช่วยหมุนย้อนกลับอัตโนมัติเมื่อเครื่องพบว่าเกิดค่าแรงบิดเกินกำหนดเพื่อช่วยลดการเกิดไฟล์หัก ระบบหน้าจอเป็นแอลอีดี (LED) แสดงระดับสีเพื่อบอกตำแหน่งปลายรากฟัน ได้แก่ สีฟ้าสามขีดแสดงตำแหน่งส่วนต้นของปลายรากฟัน สีเขียวสามขีดแสดงจุดคอดปลายรากฟัน สีส้มหนึ่งขีดแสดงรูปลายรากฟัน และสีแดงหนึ่งขีดแสดงตำแหน่งเกินออกนอกรูปลายรากฟัน (ภาพประกอบ 8) โดยการศึกษาของ Wigler และคณะ (49) ทำการศึกษาความแม่นยำของเครื่องโกลด์เรซิพรอกโดยวัดและขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์ระบบเรซิพรอกซึ่งหมุนแบบไปกลับพบว่าสามารถวัดความยาวคลองรากฟันขณะขยายคลองรากฟันได้แม่นยำเทียบเท่าเครื่องวัดความยาวคลองรากฟันชนิดรูทซีเอกซ์โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่จุดคอดปลายรากฟัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Christofzik และคณะ (50) ใช้เครื่องโกลด์เรซิพรอกวัดและขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์ระบบเอ็มทูซึ่งหมุนแบบต่อเนื่องพบว่าสามารถวัดความยาวคลองรากฟันได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่จุดคอดปลายรากฟันเมื่อเทียบกับเครื่องวัดความยาวด้วยไฟฟ้าชนิดเอนโดไพลอต (EndoPilot) และเรย์เพกซ์ซิกซ์ แต่พบว่าเครื่องโกลด์เรซิพรอกมีค่าเฉลี่ยความยาวเกินจุดคอดปลายรากเล็กน้อยเพียง 22.70 ไมโครเมตร

อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการใช้เครื่องโกลด์เรซิพรอกในกรณีรักษาคอนกรกฟันซ้ำในห้องปฏิบัติการหรือในมนุษย์ แต่มีรายงานทางคลินิกที่พบว่าเครื่องโกลด์เรซิพรอกสามารถวัดและขยายคลองรากฟันซ้ำได้ถึงความยาวทำงานและให้ผลการรักษาที่ดีหลังติดตามการรักษา (73, 74)



ภาพประกอบ 9 เครื่องโกลด์เรซิพรอก

**สื่อกลาง (media) ที่ใช้จำลองการทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟัน
ด้วยกระแสไฟฟ้าทางห้องปฏิบัติการ (in vitro model)**

หลักการวัดความยาวฟันในทางคลินิก (in vivo) จะอาศัยรูปลายรากฟันเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าโดยมีไฟล์ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าผ่านรูปลายรากฟันออกไปสัมผัสกับเอ็นยึดปริทันต์รวมทั้งเยื่อเมือกช่องปากที่มี lip clip ติดอยู่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงต่ำและกระแสไฟฟ้าของเครื่องวัดความยาวรากฟันครบวงจร ซึ่งจะแสดงค่าด้วยเสียง แสงแฟลชหรือค่าบนหน้าจอดิจิทัล กรณีการศึกษาความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันในห้องปฏิบัติการ (in vitro) การศึกษาของ Huang (15) พบว่าเมื่อจำลองฟันให้อยู่ในสภาวะเหมือนช่องปากโดยนำฟันที่ถูกถอนวางบนแผ่นเวกซ์ที่สัมผัสกับภาชนะใส่น้ำเกลือ และให้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงติดอยู่ที่ผนังด้านซ้ายของภาชนะและสัมผัสน้ำเกลือเสมือนการวาง lip clip บนเยื่อเมือกช่องปาก เมื่อสอดไฟล์ที่ติดกับโพรบลงไปในคลองรากฟันผ่านรูปลายรากฟันไปสัมผัสกับน้ำเกลือจะอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้คงที่ คือ $40 \mu A$ สอดคล้องกับสภาวะจริงทางคลินิก ดังนั้นสรุปได้ว่าการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าจะใช้หลักการของกระแสไฟฟ้า (principles of electricity) ไม่ใช่คุณสมบัติทางชีววิทยาของเนื้อเยื่อ (biological properties of tissue) ตามทฤษฎีของ Sunada (57) นอกจากนี้การศึกษาทางคลินิกอาจมีเลือดหรือซีรัมในคลองรากฟันทำให้มีผลต่อการอ่านค่าแต่ในขณะการศึกษาในห้องปฏิบัติการจะใช้ฟันจุ่มลงในสื่อกลาง (media) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อเยื่อปริทันต์และควบคุมองค์ประกอบที่อยู่ภายในคลองรากฟันให้เหมือนกัน ทำให้มีความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันโดยสอดคล้องกับความยาวรากฟันจริง

มากยิ่งขึ้น หลายการศึกษา มีการเลือกใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าเป็นสื่อกลางมาล้อมรอบรากฟันที่แตกต่างกัน ได้แก่

1. อัลจิเนต (alginate)

อัลจิเนตเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี โดยได้รับความนิยมใช้มากที่สุด หลายการศึกษาแสดงให้เห็นว่าให้ผลเหนือกว่าตัวกลางชนิดอื่นและให้ผลสอดคล้องกับความยาวรากฟันจริงมากที่สุด (75-78) ถึงแม้ผู้ที่ไม่มีประสบการณ์ในการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าแต่เมื่อใช้กับแบบจำลองที่มีอัลจิเนตเป็นตัวกลางพบว่าสามารถระบุตำแหน่งปลายรากฟันโดยให้อัตราความแม่นยำที่สูงถึงร้อยละ 95 ในเครื่องรูทชีเอกซ์ (79) และยังคงให้ความแม่นยำในการวัดความยาวแม้ผ่านการขัดขวางนานถึง 6 สัปดาห์ (80)

ข้อดี คือมีความคงตัว (stability) มีความยืดหยุ่น (elasticity) และความหนืด (viscosity) สูง ด้านทานแรงได้ดีเมื่อแข็งตัวทำให้อยู่ล้อมรอบรากฟันได้ดีและมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะยึดฟัน สามารถขยายคลองรากฟันได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงที่ทำการทดลอง (81) มีลักษณะแน่น (firm) แต่ยังคงลักษณะคล้ายเจลทำให้ไอออนหมุนเวียนได้ดี ความชื้นภายในตัวอัลจิเนตช่วยทำให้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จึงมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ มีพื้นผิวที่เรียบ ไม่เหนียว ติดมือ ทำให้ใช้งานได้ง่าย หาซื้อได้ง่าย ราคาถูก รวมทั้งผู้ทำการทดลองไม่สามารถมองเห็นตำแหน่งปลายไฟล์ที่อยู่ภายในคลองรากฟัน

2. วุ้น (agar)

วุ้นถูกใช้เป็นตัวกลางชนิดแรกในแบบจำลองทางห้องปฏิบัติการ (82) รวมทั้งในหลายการศึกษา (16, 83, 84) บางการศึกษาพบว่าวุ้นช่วยให้การอ่านค่าความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับกับความยาวรากฟันจริงโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอัลจิเนตถึงแม้จะมีความแม่นยำที่น้อยกว่า (77, 85) และมีการศึกษาที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางร่วมกับเครื่องโทรออกโตชีเอกซ์ในระหว่างที่วัดและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกัน (86, 87) ซึ่งต้องออกแรงในระหว่างทำการทดลองโดยให้เหตุผลที่ถูกนำมาใช้ คือใช้งานได้ง่าย มีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นและคงตัว และจะไม่ยอมให้ของเหลวภายในตัวมันเองหรือวุ้นเกิดการรั่วไหลเข้าไปในรูปลายรากฟัน ทำให้โอกาสวัดความยาวรากฟันได้แม่นยำมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัลจิเนต (88)

ข้อดี คือมีความแน่น คงตัวได้ดีแม้อุณหภูมิจะร้อนขึ้น มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ใช้งานได้ง่าย สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ราคาถูก มองเห็นตำแหน่งปลายไฟล์ได้ง่ายและง่ายต่อการถ่ายภาพรังสีเพื่อดูตำแหน่งไฟล์ในคลองรากฟัน

3. เจลาติน (gelatin)

เจลาตินถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางช่วงระยะเวลาเดียวกันกับอัลจิเนต (89) โดยมีการศึกษาที่พบว่าเจลาตินให้ผลเหนือกว่าตัวกลางที่ใช้ฟองน้ำชุบโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (90) และอัลจิเนต (75) อย่างมีนัยสำคัญ และบางการศึกษาพบว่าให้ผลเหนือกว่าอัลจิเนตและตัวกลางชนิดอื่น (85) หรือให้ผลต่ำกว่าอัลจิเนต (77) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุที่การศึกษาให้ผลไม่สอดคล้องกันเนื่องจากการออกแบบการทดลองที่ไม่เหมือนกัน การใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้ารุ่นที่แตกต่างกัน การใช้น้ำยาล้างคลองรากฟันคนละชนิดกัน และการใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของเจลาตินที่แตกต่างกัน

ข้อดี คือมีความแม่นยำ ให้ความน่าเชื่อถือที่ดี สามารถนำมาละลายและกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีความแน่น คงตัวน้อยกว่าวุ้น และมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มกว่าทำให้ละลายได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ต้องใช้ความเย็นถึงจะแข็งตัว

4. สารละลายน้ำเกลือ

สารละลายน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 0.9 ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางหลายการศึกษา (9, 11, 59, 91) บางการศึกษาพบว่าให้ผลที่แม่นยำต่ำกว่าอัลจิเนตโดยอ่านค่าได้สั้นกว่ารูปลายรากฟันตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรขึ้นไป แต่ผลโดยรวมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (77) และบางการศึกษาให้ผลที่แม่นยำต่ำกว่าอัลจิเนตอย่างมีนัยสำคัญ (75)

5. ฟองน้ำชุบสารละลายน้ำเกลือ

ฟองน้ำที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ชุบสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 0.9 ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในหลายการศึกษา (77, 78, 85, 90) บางการศึกษาพบว่าให้ผลที่แม่นยำต่ำกว่าอัลจิเนตอย่างมีนัยสำคัญ (78) หรือให้ผลต่ำกว่าตัวกลางชนิดอื่นๆมากที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าเป็นตัวกลางชนิดเดียวที่ทำให้วัดความยาวเกินรูปลายรากฟันมากที่สุดถึง 3.5 มิลลิเมตรเกินกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ทางคลินิก และเกินรูปลายรากฟันมากที่สุดถึงร้อยละ 20 (77) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปได้ง่าย ไม่มีความคงตัวหรือรักษาเสถียรภาพที่ดี และพบว่าบางตัวอย่างมีเศษฟองน้ำเข้าไปอุดตันในรูปลายรากฟันซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนฉนวนไฟฟ้า ทำให้มีโอกาสที่จะวัดความยาวไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟันเพื่อให้ไปสัมผัสกับสื่อไฟฟ้า เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าจึงจะทำงานครบวงจร

ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากรณีรักษาลงรากฟันซ้ำ

1. วัสดุอุดคลองรากฟัน

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราความสำเร็จของการรักษาลงรากฟันซ้ำ คือการรีอัสตูดคลองรากฟันเพื่อให้สามารถเข้าไปทำความสะอาดคลองรากฟันและอุดคลองรากฟันได้แน่นแน่นในความยาวที่เหมาะสม กัตตาเปอร์ชาเป็นวัสดุอุดคลองรากฟันที่นิยมใช้ในปัจจุบัน การศึกษาของ Al-bulushi และคณะ (22) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าค่อยๆลดลงเมื่อปลายไฟล์เข้าใกล้รูเปิดปลายรากฟันและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงจุดรูเปิดปลายรากฟัน แต่การมีกัตตาเปอร์ชาบางส่วนหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟันทำให้ไปอุดปิดท่อน้ำโพรงคลองรากฟันย่อยและรูเปิดบริเวณปลายรากฟัน เป็นการเพิ่มความหนาให้กับเนื้อฟันซึ่งเป็นเหมือนฉนวนไฟฟ้า จึงลดการนำของกระแสไฟฟ้า (canal conductivity) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้ความแม่นยำในการวัดความยาวคลองรากฟันลดลง

การศึกษาของ Alves และคณะ (24) พบว่าการมีกัตตาเปอร์ชาภายในคลองรากฟันทำให้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ามีโอกาสอ่านค่าความยาวรากฟันเกินรูปลายรากฟันได้สูงกว่าปกติเนื่องจากปลายไฟล์ต้องผ่านเนื้อกัตตาเปอร์ชาก่อนที่จะสัมผัสเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านและทำงานครบวงจร เป็นการดันกัตตาเปอร์ชาบางส่วนออกนอกรูปลายรากฟัน นำไปสู่การขยายคลองรากฟันทะลุออกไปทางปลายรากฟัน (over-instrumentation) และอุดคลองรากฟันเกินความยาวทำงาน (over-filled root canal) อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Mancini และคณะ (23) พบว่าวัสดุอุดคลองรากฟันที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า และการมีสิ่งอุดตันภายในคลองรากฟันส่งผลให้วัดความยาวทำงานเกินกว่ารูปลายรากฟันเมื่อเทียบกับความยาวรากฟันที่แท้จริงอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน

2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นยาที่นิยมใช้ใส่ในคลองรากฟัน มีคุณสมบัติต้านจุลชีพ ช่วยสลายเนื้อเยื่อ ลดสิ่งซึมซับปลายราก ยับยั้งการสลายของรากฟัน เหนียวน้ำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง และทำให้เกิดสภาพที่เหมาะสมต่อการหายของเนื้อเยื่อปลายราก (92) แต่การมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อุดตันอยู่ในคลองรากฟันทำให้ขาดช่องทางการติดต่อระหว่างคลองรากฟันกับเนื้อเยื่อปริทันต์ ส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าลดลง จากการศึกษาของ Ustun และคณะ (93) พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เครื่องมินิรูทซีเอกซ์ (Mini Root ZX) มีความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันลดลงในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากรูเปิดปลายรากฟันและจุด

คอดปลายรากฟันเมื่อเทียบกับความยาวรากฟันจริง โดยกลุ่มที่มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หลงเหลือมากที่สุด คือ 4 มิลลิเมตรจากความยาวทำงานมีความแม่นยำลดลงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หลงเหลือ 1 และ 2 มิลลิเมตรจากความยาวทำงาน สอดคล้องกับการศึกษาของ Uzunoglu และคณะ (31) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันต่อการส่งผลกับความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารูทซีเอกซ์ โดยพบว่ากลุ่มที่มีประสิทธิภาพกำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้มากที่สุด ได้แก่ กลุ่มที่ล้างด้วย 5.25% NaOCL ร่วมกับเอ็มเอเอฟไฟล์ (MAF file) และกลุ่มที่ล้างด้วย 17% EDTA ร่วมกับเอ็มเอเอฟไฟล์มีความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันมากที่สุดในระยะ ± 1 มิลลิเมตรจากจุดคอดปลายรากฟันโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นๆ อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ใช้ NaOCL มีความแม่นยำมากกว่ากลุ่มที่ใช้ EDTA เนื่องจาก NaOCL อาจเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าลดลง ในขณะที่กลุ่มควบคุม (control group) ไม่ได้กำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากคลองรากฟันพบว่ามีความแม่นยำน้อยที่สุด และกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดวัดความยาวรากฟันได้สั้นกว่าความยาวรากฟันจริง

นอกจากนี้การศึกษาของ Shojaee และคณะ (94) พบว่าหลังจากกำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากคลองรากฟัน น้ำยาล้างคลองรากฟัน (irrigation) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ กลุ่มที่ใช้น้ำเกลือและกลุ่มที่ใช้ NaOCL ร่วมกับ EDTA และเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูทซีเอกซ์และเรย์เพกซ์ซิกซ์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการวัดความแม่นยำของความยาวรากฟันทั้งในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตร และ ± 1 มิลลิเมตรจากจุดคอดปลายรากฟัน

3. ตัวทำละลาย (solvents)

การใช้ตัวทำละลายทำให้เกิดตาเปอร์ชาและซีลเลอร์เกิดการอ่อนตัว ทำให้ไฟล์มีอชนิดเอช (H-files) แทรกผ่านได้ง่ายขึ้น ควรใช้สารละลายในคลองรากฟันที่อุดไว้แน่นโดยพิจารณาใช้เฉพาะกรณีวัสดุอุดสั้นหรือคลองรากฟันมีความโค้ง (95) มีการศึกษาที่พบว่าการใช้และไม่ใช้ตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดกัตาเปอร์ชาไม่แตกต่างกันโดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่อง (96) กรณีนำมาใช้เพื่อดูผลความแม่นยำต่อเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า มีหลายการศึกษาที่ให้ผลไปในทิศทางที่ต่างกัน โดยการศึกษาของ Er และคณะ (34) พบว่าการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันโดยเฉพาะ Resosolv ส่งผลให้ความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าชนิดมินิรูทซีเอกซ์ลดลงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ

โดยมีความยาวสั้นกว่าความยาวรากฟันเดิม ส่วนการศึกษาของ Ustun และคณะ (35) ให้ผลสอดคล้องกันเมื่อใช้ Resosolv กับ Tri Auto ZX โหมดวัดความยาวรากฟัน แต่เมื่อใช้ Tri Auto ZX โหมดวัดและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกันพบว่ามีความยาวใกล้เคียงกับความยาวรากฟันเดิมที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันและกับทุกตัวทำละลายโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แตกต่างจากการศึกษาของ Uzun และคณะ (51) กลับพบว่าการใช้ Tri Auto ZX โหมดวัดและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกันที่ตำแหน่งเดียวกันโดยใช้ร่วมกับตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (chloroform) มีความแม่นยำลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมีจำนวนตัวอย่างร้อยละ 60 พบไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟัน ซึ่งยังหาข้อสรุปไม่ได้ว่าทำไมผลการทดลองของทั้ง 2 การศึกษามีความขัดแย้งกัน อาจเป็นเพราะตัวทำละลายที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Al-Hadlaq (97) พบว่าตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ chloroform, orange solvent และ eucalyptol ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 4 รุ่น คือ Root ZX mini, Mini Apex Locator, Root ZX และ Elements Diagnostic Unit and Apex Locator อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Jain และคณะ (98) ที่พบว่าตัวทำละลาย ได้แก่ Endosolv R, RC solve, Eucalyptus oil และ chloroform ไม่ส่งผลเช่นเดียวกันกับเครื่อง Propex II และ Root ZX mini

4. ขนาดของไฟล์และขนาดของรูปลายรากฟัน

ขนาดของไฟล์ไม่มีผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า แต่เมื่อขนาดรูปลายรากฟันใหญ่ขึ้นการใช้ไฟล์ที่ขนาดพอดีกับขนาดรูปลายรากฟันให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ไฟล์ขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ หลายการศึกษาพบว่าการใช้ไฟล์ขนาดเล็กกว่าขนาดรูปลายรากฟันทำให้วัดความยาวรากฟันได้สั้นกว่าความยาวรากฟันจริงแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อขนาดรูปลายรากฟันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร (เท่ากับขนาดเคไฟล์เบอร์ 60) (7, 99-101) แต่มีการศึกษาที่พบว่าเมื่อขนาดรูปลายรากฟันใหญ่ขึ้นมากกว่า 0.6 มิลลิเมตร ขนาดของไฟล์ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ (84, 99, 101) เนื่องจาก Huang และคณะ (15) ให้เหตุผลว่ารูปลายรากฟันที่กว้างขึ้นไฟล์ที่ใช้วัดขนาดเล็กจะไม่ได้สัมผัสกับเดนตินที่ผนังคลองรากฟันส่วนปลายราก โอกาสที่ไฟล์สัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์จะเกิดขึ้นได้เร็วและมากขึ้น มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์จึงลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าอ่านค่าได้สั้นกว่าความเป็นจริง ส่วน Tamarut และคณะ (102) อธิบายปรากฏการณ์รอยต่อการเปลี่ยนแปลง (transitional ion concentration zone) เกิดจากภาวะสมดุลของการแพร่ระหว่างสารละลาย

ภายในคลองรากฟันและภายนอกคลองรากฟันซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่รอบปลายรากฟันและเป็นตำแหน่งที่มีความต้านทานสูงที่สุด หากเราเปิดปลายรากฟันมีขนาดไม่เกิน 0.7 มิลลิเมตรรอยต่อการเปลี่ยนแปลงจะคงอยู่ที่ตำแหน่งรูปปลายรากฟัน แต่ถ้าเราเปิดปลายรากฟันมีขนาดกว้างกว่า 0.7 มิลลิเมตรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของอิเล็กโทรไลต์ ทำให้รอยต่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ไม่ตรงตำแหน่งเดิม จึงอ่านค่าจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไม่ได้

นอกจากนี้ Ebrahim และคณะ (84) ยังพบว่าเมื่อใช้ไฟล์ขนาดเล็กในฟันที่มีรูปลายรากฟันขนาดใหญ่ การใช้เครื่องรูทีเอ็กซ์จะยังให้ความแม่นยำมากกว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดย Nguyen และคณะ (7) สนับสนุนว่าเครื่องรูทีเอ็กซ์สามารถหาตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันถึงแม้ว่าตำแหน่งดังกล่าวจะถูกกำจัดไปก็ตาม นอกจากนี้การมีน้ำยา NaOCL อยู่ภายในคลองรากฟัน การใช้ไฟล์ขนาดเล็กกว่าความกว้างของขนาดคลองรากฟันและรูปลายรากฟันจะอ่านค่าได้แม่นยำมากกว่าการใช้ EDTA, CHX และ RC prep อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน (100) ดังนั้นเพื่อให้สามารถวัดความยาวรากฟันได้แม่นยำที่สุดควรให้ขนาดของไฟล์ที่จะใช้วัดความยาวรากฟันแน่นพอดี (fit) กับคลองรากฟันและช่วยให้สามารถปรับรับเบอร์สโตปได้ถูกต้องโดยที่ไฟล์ไม่มีการขยับขณะใช้งาน

5. ชนิดของไฟล์

การศึกษาของ Thomas และคณะ (103) ศึกษาความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้ไฟล์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ สเตนเลสสตีลไฟล์และนิกเกิลไทเทเนียมไฟล์ พบว่าการใช้เครื่องรูทีเอ็กซ์ให้ความแม่นยำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยไฟล์ทุกประเภทเครื่องจะอ่านค่าได้แม่นยำในช่วง ± 0.1 มิลลิเมตร สอดคล้องกับการศึกษาของ Sadeghi และคณะ (104) ที่ใช้เครื่องเรย์เพกซ์ 5 และ Gehlot และคณะ (105) ที่ใช้เครื่องเอเลเมนต์ไดแอกโนสติกยูนิต แอนด์เอเพกซ์โลเคเตอร์ (Elements diagnostic unit and apex locator) และเครื่องโปรเพกซ์พิกซ์ (Propex pixi) ตามลำดับ แต่การศึกษาของ Siu และคณะ (106) พบว่าการใช้สเตนเลสสตีลไฟล์ให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้นิกเกิลไทเทเนียมไฟล์ชนิดหมุนด้วยเครื่องในเครื่องรูทีเอ็กซ์, เอเพกซ์เอนอาร์จีเอ็กซ์เอฟอาร์ (Apex NRG XFR) และมินิเอเพกซ์โลเคเตอร์ (Mini Apex Locator) อย่างมีนัยสำคัญ

กรณีรักษาคคลองรากฟันซ้ำ การใช้นิกเกิลไทเทเนียมไฟล์ชนิดหมุนด้วยเครื่องในการรีโวลต์อุดคลองรากฟันระบบที่แตกต่างกันส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าแตกต่างกัน การศึกษาของ Chhabra และคณะ (45) เปรียบเทียบการใช้เครื่องรูทีเอ็กซ์และเครื่องเอเพกซ์ไอดี (Apex ID) ร่วมกับโปรเทเปอร์รีทรีตเมนต์ไฟล์ (Protaper retreatment files)

และเอ็มทูรีทรีตเมนต์ไฟล์ พบว่าการใช้เครื่องมือรูทชีเอกซ์ร่วมกับโพเทเปอริทรีตเมนต์ไฟล์ให้ความมั่นใจในการวัดความยาวรากฟันมากกว่าการใช้เครื่องมือเพ็คชไฮด์ร่วมกับเอ็มทูรีทรีตเมนต์ไฟล์อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Pandey และคณะ (46) เปรียบเทียบการใช้เครื่องมือรูทชีเอกซ์ และไอรูท (i-Root) ร่วมกับโพเทเปอริทรีตเมนต์ไฟล์และอาร์เอ็นโดรีทรีตเมนต์ไฟล์ (R-Endo retreatment files) พบว่าการใช้เครื่องมือรูทชีเอกซ์ร่วมกับโพเทเปอริทรีตเมนต์ไฟล์ให้ความมั่นใจในการวัดความยาวรากฟันมากกว่าการใช้เครื่องมือไอรูทร่วมกับอาร์เอ็นโดรีทรีตเมนต์ไฟล์อย่างมีนัยสำคัญที่ร้อยละ 65 และร้อยละ 22.5 ภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตรจากจุดคอดปลายรากฟัน เนื่องจากระบบนิกเกลไทเทเนียมไฟล์ที่แตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกัตาเปอร์ชาแตกต่างกันและทำให้ประสิทธิภาพในการตัดเนื้อฟันแตกต่างกัน โดยเนื้อฟันบริเวณรากฟันที่ถูกตัดออกไปผ่านการขยายคลองรากฟันทำให้ความหนาของเนื้อฟันลดลง ค่าอิมพีแดนซ์จึงลดลง (22) ร่วมกับเครื่องมืออาจไปทำลายตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันเดิมระหว่างการรีอัสดุดคลองรากฟัน รวมทั้งวงจรไฟฟ้าของเครื่องวัดความยาวรากฟันแต่ละรุ่นมีความแตกต่างกันทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำแตกต่างกัน

6. น้ำยาล้างคลองรากฟัน

มีหลายการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายที่แตกต่างกันส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า แต่ปัจจุบันเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นต่างๆถูกพัฒนามากขึ้นทำให้น้ำยาล้างคลองรากฟันที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า โดยการศึกษาของ Kaufman และคณะ (107) พบว่าการมีคลองรากฟันที่แห้งและมีของเหลวภายในคลองรากฟันได้แก่ NaOCL, EDTA, saline, CHX และ xylol เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ารุ่นรูทชีเอกซ์ และ Bingo 1020 ให้ความแม่นยำในการวัดความยาวรากฟันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สภาวะคลองรากฟันที่แห้งและการมี NaOCL, EDTA, saline และ Xylol ทำให้เครื่อง Bingo 1020 อ่านค่าได้ใกล้เคียงความยาวรากฟันจริงมากกว่ารูทชีเอกซ์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Jenkins และคณะ (19) พบว่าการใช้สารละลายน้ำเกลือ, 2% lidocaine, 5.25% NaOCL, RC prep, EDTA, 3% H₂O₂ และ Peridex ให้ความแม่นยำไม่แตกต่างกันของเครื่องมือรูทชีเอกซ์ที่รู้เปิดปลายรากฟัน ส่วนการศึกษาของ Tinaz และคณะ (108) พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOCL ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5.25%, 2.65%, 1.00% และ 0.50% รวมทั้งน้ำเกลือไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องมือรูทชีเอกซ์ที่ตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟันอย่างมีนัยสำคัญ

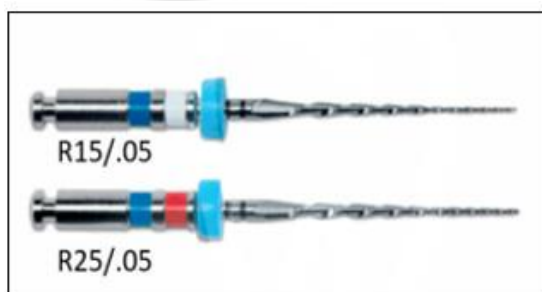
ดังนั้นน้ำยาล้างคลองรากฟันไม่มีผลต่อเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า โดยเฉพาะรูทชีเอกซ์ซึ่งการศึกษาของ Kobayashi และ Suda (9) กล่าวว่าเครื่องรูทชีเอกซ์สามารถใช้ได้กับน้ำยาล้างคลองรากฟันทุกชนิด ส่วน Ebrahim และคณะ (109) พบว่า NaOCL เป็นสารละลายที่นำกระแสไฟฟ้าได้สูง สามารถซึมผ่านเข้าไปในท่อเนื้อฟันทำให้ลดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของผนังคลองรากฟัน ส่งผลให้นำกระแสไฟฟ้าเมื่อไฟล์สัมผัสกับเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันได้ดีขึ้น จึงควรมีน้ำยาล้างคลองรากฟันระหว่างการวัดความยาวรากฟันเพื่อให้อ่านค่าได้แม่นยำมากขึ้น

ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ (Mtwo Retreatment file)

ไฟล์ชนิดนี้ใช้สำหรับการรีดวัสดุอุดคลองรากฟัน มีหน้าตัดเป็นลักษณะรูปตัวเอส (cross-section) มีความยาวของพิทช์ (pitch) สั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำจัดวัสดุอุดคลองรากฟัน และมีลักษณะเป็น two cutting edges เพื่อเพิ่มความสามารถในการตัดเนื้อฟัน ความเร็วในการหมุน 280-300 รอบต่อนาที (rpm) และค่าแรงบิด 1.2-2 นิวตันเซนติเมตร (Ncm) ประกอบด้วยไฟล์ 2 ตัว ได้แก่ (ภาพประกอบ 9)

อาร์ 1 (R1) จุดปลายเครื่องมือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร ความผาย 5% (15/.05) มีความยาว 21 มิลลิเมตร ความยาวส่วนตัด 16 มิลลิเมตร ปลายไฟล์มีความคม (cutting tip) ใช้สำหรับคลองรากฟันที่มีขนาดเล็กและแคบ

อาร์ 2 (R2) จุดปลายเครื่องมือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ความผาย 5% (25/.05) มีความยาว 21 มิลลิเมตร ความยาวส่วนตัด 16 มิลลิเมตร ปลายไฟล์มีความคม (cutting tip) ใช้สำหรับคลองรากฟันที่มีขนาดปานกลางหรือกว้าง



ภาพประกอบ 10 ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ ขนาดอาร์ 1 (15/.05)

และอาร์ 2 (25/.05)

วิธีการศึกษาการวัดความยาวรากฟันจริงแบบต่าง ๆเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า

1. การตัดฟันตามแนวยาวแล้ววัดระยะปลายไฟล์ที่ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันหรือจุดคอดปลายรากฟัน

ใส่ไฟล์ลงไปในคลองรากฟัน ปรับตำแหน่งรับเบอร์สโตปและยึดด้วยวัสดุทางทันตกรรม จากนั้นตัดฟันตามแนวยาว 3-5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟันจนเห็นส่วนของไฟล์แล้วนำมาส่องดูให้ปลายไฟล์อยู่ที่ตำแหน่งรูปลายรากฟันหรือจุดคอดปลายรากฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่างๆ นำไฟล์ออกมาเพื่อทำการถ่ายภาพแล้วนำภาพเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัดความยาวรากฟันจริง กรณีเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าหลังใส่ไฟล์ที่ตำแหน่งที่ต้องการ ให้ถ่ายภาพในตำแหน่งเดียวกันแล้ววัดระยะห่างระหว่างปลายไฟล์กับตำแหน่งที่ใช้เป็นจุดอ้างอิง หากปลายไฟล์สั้นกว่าตำแหน่งที่อ้างอิงให้ค่าที่ได้เป็นลบ (-) หากปลายไฟล์ยาวกว่าตำแหน่งที่อ้างอิงให้ค่าที่ได้เป็นบวก (+) (ภาพประกอบ 10) วิธีการนี้ทำให้สามารถมองเห็นตำแหน่งกายวิภาคของคลองรากฟันได้ชัดเจน แต่เป็นวิธีการที่ยุ่งยาก มีการทำลายตัวอย่างของฟัน และในกรณีคลองรากฟันที่มีความโค้งอาจมีการบิดของไฟล์ออกมานอกคลองรากฟันในระหว่างการรอฟัน (110, 111)



ภาพประกอบ 11 การวัดความยาวรากฟันจริงโดยวัดระยะห่างระหว่างปลายไฟล์กับจุดคอดปลายรากฟันที่ตำแหน่ง 4 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน (ซ้าย) ปลายไฟล์อยู่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดคอดปลายรากฟัน (ขวา) ปลายไฟล์อยู่สั้นกว่าตำแหน่งจุดคอดปลายรากฟัน (112)

2. การวัดความยาวรากฟันจริงโดยตรงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Direct view with microscope)

ทำการใส่ไฟล์ขนาดเล็กลงไปในคลองรากฟันจนถึงรูเปิดปลายรากฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่างๆ จากนั้นขยับไฟล์ขึ้นลงจนปลายไฟล์อยู่ที่บริเวณขอบบนสุดของรูปลาย

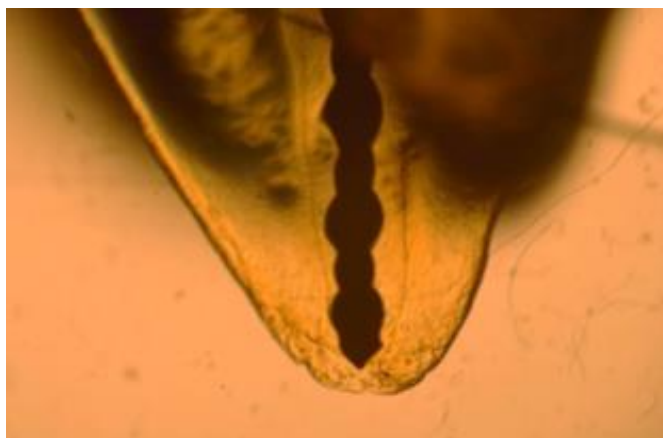
รากฟัน ปรับตำแหน่งรับเบอส์ตอปและยึดด้วยวัสดุทางทันตกรรมแล้วนำไฟล์ออกมาวัดความยาวหรืออาจหักลบ 0.5 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นความยาวรากฟันจริง (ภาพประกอบ 11) กรณีนี้เปรียบเทียบกับความยาวไฟล์ที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโดยความยาวไฟล์ที่ได้สามารถวัดโดยตรงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ทำการถ่ายภาพ แล้วนำภาพวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (10, 50) การใช้ไม้บรรทัด (49) และการใช้คาลิเปอร์แบบดิจิตอล (digital caliper) ที่มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (72, 113) เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และไม่มีการทำลายตัวอย่างของฟัน



ภาพประกอบ 12 การวัดความยาวรากฟันจริงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงตำแหน่งปลายไฟล์ที่บริเวณขอบบนสุดของรูปลายรากฟัน (114)

3. การวัดความยาวรากฟันจริงโดยวิธีการทำฟันใส

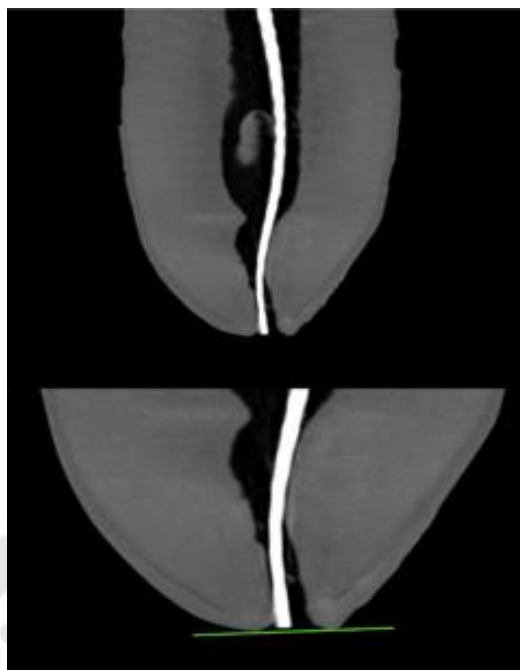
เป็นวิธีการทำฟันให้ใสแล้วใส่ไฟล์ขนาดเล็กลงไปในคลองรากฟันจนถึงตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่างๆ ปรับตำแหน่งรับเบอส์ตอปและยึดด้วยวัสดุทางทันตกรรมแล้วนำไฟล์ออกมาวัดความยาวรากฟันจริงด้วยคาลิเปอร์แบบดิจิตอลที่มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (ภาพประกอบ 12) เปรียบเทียบกับความยาวไฟล์ที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ไม่มีการทำลายตัวอย่างของฟัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายวิภาคของฟัน ทำให้เห็นตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันได้ชัดเจนและได้ค่าความยาวรากฟันจริงที่แม่นยำ (115, 116)



ภาพประกอบ 13 การวัดความยาวรากฟันจริงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอกำลังขยาย 30 เท่า ภายหลังจากการทำฟันให้ใส (115)

4. การวัดความยาวรากฟันจริงโดยวิธีการถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร (micro-computed tomography)

นำฟันที่ถูกถอนก่อนการทดลองมาถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ค่าต่างๆ ได้แก่ พื้นที่ในการถ่ายภาพ (Field of view) ขนาดจุดภาพสามมิติ (Voxel size) และระยะเวลาในการถ่ายภาพรังสี (Exposure time) เพื่อหาตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันหรือจุดคอดปลายรากฟัน นำภาพเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัดความยาวรากฟันจริง (ภาพประกอบ 13) กรณีเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าหลังใส่ไฟล์ที่ตำแหน่งที่ต้องการ ให้ถ่ายภาพรังสีอีกรอบและวัดระยะห่างระหว่างปลายไฟล์กับตำแหน่งที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงในตำแหน่งเดียวกันโดยตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องถ่ายภาพรังสีค่าเดียวกับการถ่ายภาพก่อนการทดลอง เป็นวิธีการที่ไม่มีการทำลายตัวอย่างของฟัน สามารถระบุตำแหน่งจุดอ้างอิงต่างๆได้แม่นยำ แต่มีข้อเสียคือ หากมีสิ่งแปลกปลอมหรือมีโลหะจะเกิดการกระเจิงของแสงทำให้รบกวนการแปลผลของภาพ กรณีทดลองในมนุษย์อาจได้รับรังสีปริมาณมากกว่าปกติ (117, 118)



ภาพประกอบ 14 การวัดความยาวรากฟันจริงด้วยวิธีการถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์
ระดับไมโครเมตร แสดงตำแหน่งปลายไฟล์ที่รู้เปิดปลายรากฟัน (117)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์วัดและเตรียมคลองรากฟัน

- 1.1 กล้องจุลทรรศน์ทันตกรรม (ZEISS EXTARO 300)
- 1.2 กล้องถ่ายภาพดิจิทัล (Digital camera)
- 1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับวัดและประมวลผลด้วยโปรแกรม ImageJ
- 1.4 แผ่นกระดานดีเส้นกริด ขนาดเส้นกริดเท่ากับ 10 มม.
- 1.5 หัวกรอเร็วปลายสอบเคีลบากเพชรดี 8 (D8: Taper Diamond bur)
- 1.6 หัวกรอช้าเหล็กกล้าไร้สนิมรูปกลม
- 1.7 เกตส์กลัดเดนดริลล์ เบอร์ 2 (Gates glidden drill no. 2)
- 1.8 ไฟล์ชนิดเค (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ขนาดเบอร์ 10, 15 และ 20
- 1.9 ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่องระบบโพรเทเปอร์เน็กซ์ (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) เอ็กซ์โอ โอเพ่นเนอร์ (19/.04) ขนาดเอ็กซ์ 1 (17/.04) และ เอ็กซ์ 2 (25/.06)
- 1.10 ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่องระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ (VDW, Munich, Germany) ขนาดอาร์ 2 (25/.05)
- 1.11 มอเตอร์เอกซ์สแมร์ทพลัส (X-Smart Plus motor, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)
- 1.12 เครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทู (Tri Auto ZX2, J. Morita, Tokyo, Japan)
- 1.13 เครื่องโกลด์เรซิพรอก (Gold Reciproc, VDW GmbH, Munich, Germany)
- 1.14 สารหล่อลื่นอาร์ซีเพร็พ (RC-Prep, Premier, PA, USA)
- 1.15 กระดาษขั้บรูปกรวยแหลม (paper points)
- 1.16 วัสดุบูรณะชั่วคราวเควิตอน (Cavition, GC, Tokyo, Japan)
- 1.17 ฟิลเทค ซี350 โฟลเอบิล (Filtek Z350 flowable, 3M ESPE, USA)
- 1.18 เครื่องฉายแสง
- 1.19 ฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ขนาด 2
- 1.20 สารละลายไทมอลความเข้มข้นร้อยละ 0.1

1.21 วัสดุพิมพ์ปากอัลจิเนต (Alginate)

1.22 บล็อกพลาสติกใส่ฟันขนาด 3x3x3 เซนติเมตร

2. อุปกรณ์ล้างคลองรากฟัน

2.1 กระบอกฉีดยาและเข็มเกจ 30 (Ultradent, South Jordan, UT, USA)

2.2 สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5

2.3 สารละลายอีดีทีเอ (EDTA) ความเข้มข้นร้อยละ 17

3. วัสดุและอุปกรณ์อุดคลองรากฟัน

3.1 กัททาเพอร์ชา (FKG, La-Chaux-de-Fonds, Switzerland)

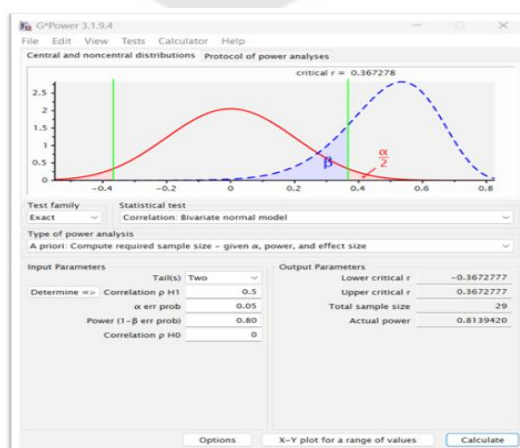
3.2 ซีลเลอร์โอเอสพลัส (AH Plus; Dentsply, DeTrey, Konstanz, Germany)

3.3 เครื่องตัดและฉีดคลองรากฟันเอเลเมนต์ (elements™ IC Obturation System)

3.4 เควิต (Cavit™; DeTrey Dentsply, Konstanz, Germany)

การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง

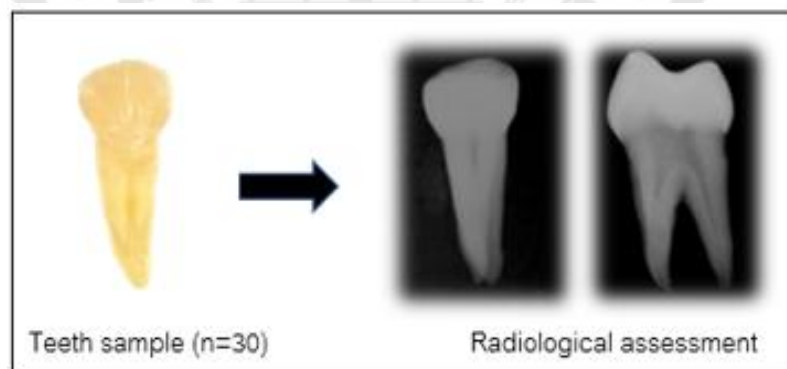
กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณด้วยโปรแกรม G* power version 3.1.9.4 โดยอ้างอิงผลการศึกษาของ Jung และคณะ (119) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดอย่างน้อย 29 ซึ่งแต่เงื่อนไขของการใช้สถิติการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ข้อมูลแต่ละกลุ่มต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อยเท่ากับ 30 เป็นต้นไปตามการศึกษาของ Serdar และคณะ (120) ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ใช้กลุ่มตัวอย่างฟันทั้งหมด 30 ซึ่งรวมทั้งหมด 60 คลองรากฟัน โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 30 คลองรากฟัน เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูงขึ้น (ภาพประกอบ 15)



ภาพประกอบ 15 การคำนวณกลุ่มตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม G* power

การเลือกฟัน

ทำการศึกษาในฟันกรามน้อยบนที่มี 2 รากของมนุษย์ซึ่งถูกถอนจำนวน 30 ที่ ไม่จำกัดเพศและช่วงอายุ โดยผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ แล้ว ฟันที่นำมาศึกษาจะถูกเก็บในสารละลายไทมอล (thymol) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิห้องเพื่อคงความชื้นของฟัน ฟันทุกซี่จะถูกนำไปถ่ายภาพรังสีในแนวใกล้แก้ม-ใกล้ลิ้นและใกล้กลาง-ไกลกลาง เพื่อตรวจลักษณะของคลองรากฟันให้ตรงตามเกณฑ์การเลือกฟัน โดยคุณสมบัติในการตัดเข้าของกลุ่มตัวอย่าง คือ เป็นฟันที่มีคลองรากฟันแบบเวทูดซี่ประเภท 1 (Vertucci type I) คือมีอย่างละ 1 คลองรากฟันแยกออกจากกัน (121) ลักษณะรากตรงหรือโค้งไม่เกิน 7 องศาเมื่อประเมินด้วยวิธีของ Schneider (122) จากภาพรังสี มีการสร้างรากฟันสมบูรณ์ มีขนาดคลองรากฟันเริ่มต้นเท่ากับเคโฟล์เบอร์ 10 หรือ 15 ฟันที่ถูกคัดออก คือ มีรอยผุได้ต่อรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน (cemento-enamel junction) มีวัสดุบูรณะบนตัวฟันที่เป็นโลหะหรือครอบฟัน มีคลองรากฟันอุดตันไม่สามารถใส่ไฟล์ขนาดเล็กสุดในคลองรากฟันได้ มีรอยร้าวหรือแตกหักที่ตัวฟันหรือรากฟัน มีการสูญเสียของรากฟันทั้งภายในและภายนอก และฟันที่เคยได้รับการรักษาคลองรากฟัน รวมฟันที่ผ่านการคัดเลือกทั้งหมดจำนวน 30 ซี่ 60 คลองรากฟัน (ภาพประกอบ 16)

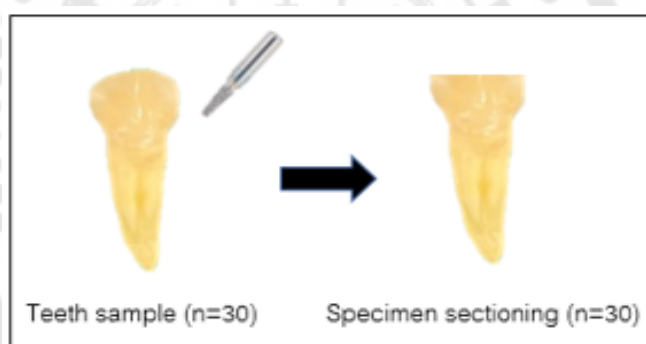


ภาพประกอบ 16 การเลือกฟันจากลักษณะทางคลินิกและภาพถ่ายรังสี

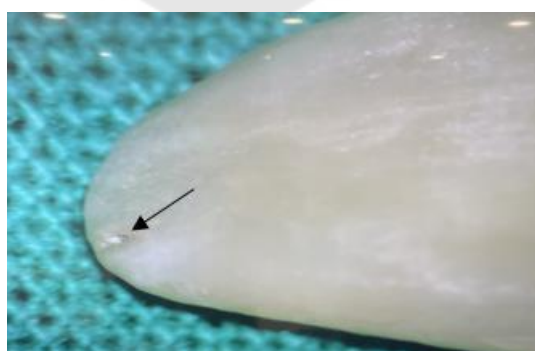
การเตรียมฟันและวัดความยาวทำงาน

นำฟันที่ถูกถอนโดยตรงตามเกณฑ์การเลือกฟัน กรอตัดปุ่มฟัน (cusp) ให้เรียบเสมอกันเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิง โดยใช้หัวกรอเร็วปลายสอบเคลือบปากเพชรดี 8 (ภาพประกอบ 17) จากนั้นกำจัดเนื้อเยื่อในออกและล้างคลองรากฟันด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น 2.5% แล้วใส่เคโฟล์เบอร์ 10 หรือ 15 ในคลองรากฟัน หากตัวอย่างไฟล์ไม่สามารถลงได้ถึงปลายรากหรือ

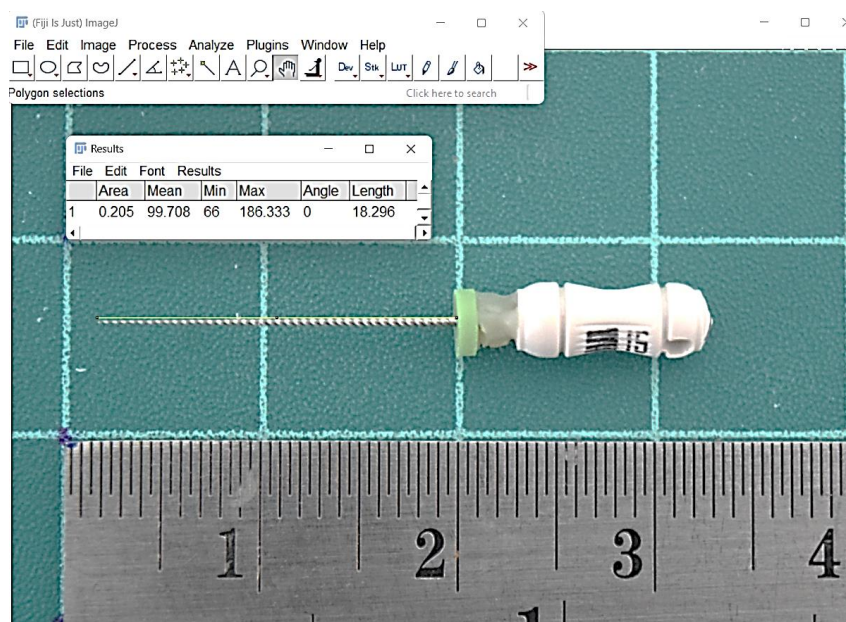
ปลายรากมีขนาดใหญ่กว่าเคไฟล์เบอร์ 15 จะตัดตัวอย่างออกจากการทดลอง เมื่อไฟล์ลงได้ถึงบริเวณปลายรากฟันทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ทันตกรรมกำลังขยาย 2.5 เท่าแล้วกำหนดความยาวการทำงาน คือระยะที่ใส่ไฟล์ชนิดเคขนาดเบอร์ 15 จากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งที่เห็นปลายไฟล์บริเวณด้านบนของรูปลายรากฟันหลัก (coronal of apical foramen) (ภาพประกอบที่ 18) ปรับรับเบอร์สตอป (rubber stop) ให้อยู่ตำแหน่งปลายฟัน หยอดฟิลเทค ซี350 ฟิลเอเบิล (Filtek Z350 flowable, 3M ESPE, USA) บริเวณรับเบอร์สตอป ฉายแสงเพื่อก่อตัวและยี้ดรับเบอร์สตอปกับตัวไฟล์ จากนั้นดึงไฟล์ออกมาวางบนแผ่นกระดานตีเส้นกริดขนาดเส้นกริดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ถ่ายภาพไฟล์ด้วยกล้องถ่ายรูปที่ถูกยึดด้วยขาตั้งกล้อง เลนส์กล้องถ่ายรูปตั้งฉากกับแผ่นกระดานและไฟล์ รวมทั้งคงตำแหน่งเดิมทุกครั้งที่ทำกรทดลอง ถ่ายภาพและวัดความยาวด้วยโปรแกรม ImageJ ลากเส้นวัดตั้งแต่ปลายไฟล์ถึงขอบล่างของรับเบอร์สตอป จากนั้นนำค่าที่วัดได้หักลบออก 0.5 มิลลิเมตรได้เป็นค่าความยาวทำงาน (initial working length; iWL) (ภาพประกอบ 19)



ภาพประกอบ 17 การกรัดตัดปุ่มฟันเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงด้วยหัวกรอเร็วปลายสอเคลือบจากเพชร



ภาพประกอบ 18 บริเวณปลายรากฟัน ลูกศรสีดำแสดงตำแหน่งปลายไฟล์บริเวณด้านบนของรูปลายรากฟัน



ภาพประกอบ 19 แสดงการวัดความยาวของไฟล์เพื่อใช้เป็นความยาวทำงาน (initial working length; iWL) โดยใช้โปรแกรม ImageJ ลากเส้นตั้งแต่ปลายไฟล์ถึงขอบล่างของรับเบอร์สโตป

การเตรียมคลองรากฟัน

ทำการขยายคลองรากฟันด้วยวิธีคราวน์ดาวน์ (crown-down) โดยใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมระบบโปรเทเปอร์เน็กซ์ (ProTaper Next) ขยายคลองรากฟันจนถึงขนาดเอ็กซ์ 2 (X2) (25/.06) ที่ความยาว AL โดยใช้ร่วมกับอาร์ซีเพรพ (RC-Prep) กำหนดความเร็ว 300 รอบต่อนาที ค่าแรงบิด 2 นิวตันเซนติเมตรด้วยเครื่องมือเดอเอ็กซ์สมาร์ทพลัส (X-Smart Plus motor, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ระหว่างการเปลี่ยนเครื่องมือขยายคลองรากฟัน จะทำการล้างคลองรากฟันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาณ 2 มิลลิลิตร และล้างครั้งสุดท้ายด้วยอีดีทีที่เอความเข้มข้นร้อยละ 17 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ตามด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร ซับคลองรากให้แห้งด้วยกระดาษซับรูปกรวยแหลม (paper point) หลังจากนั้นทำการวัดความยาวรากฟันอีกครั้งโดยใช้ไฟล์ชนิดเคขนาดเบอร์ 20 จากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่ง coronal of apical foramen ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ทันตกรรมโดยมีหลักการวัดเหมือนความยาวทำงานและหักลบ 0.5 มิลลิเมตรได้เป็นความยาวคลองรากฟันจริง (actual canal length; AL)

การอุดคลองรากฟัน

นำฟันทั้งหมดที่ผ่านการเตรียมคลองรากฟันมาลองกั้ตทาเพอร์ชาแท่งหลักขนาด 25/06 โดยตรวจสอบว่าสามารถใส่ได้ถึงความยาวทำงานและมีแรงต้าน (tug-back) ที่บริเวณปลายรากฟัน ทำการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีเวอติคัลคอนเดนเซชัน (Vertical condensation) ร่วมกับเอชพลัสซีลเลอร์โดยผสมตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ใช้เครื่องมือนำความร้อน (heat carrier) ตัดกั้ตตาเปอร์ชาลงไปจนถึงระดับ 4 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน และทำการฉีกกั้ตทาเพอร์ชาในคลองรากฟันจนเต็ม (back fill) ด้วยเครื่อง cordless elements™ IC อุดรูเปิดคลองรากฟันด้วยวัสดุอุดอุดชั่วคราวเควิต จากนั้นถ่ายภาพรังสีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของการอุดคลองรากฟันทั้งในแนวใกล้แก้ม-ใกล้ลิ้น และแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง เพื่อยืนยันคุณภาพการอุดคลองรากฟันได้แน่นในทุกมิติ ขึ้นฟันตัวอย่างที่มีรูพรุน (void) ในวัสดุอุดคลองรากฟันจะถูกนำมาอุดใหม่จนแน่นเต็มทั่วทั้งคลองรากฟัน นำตัวอย่างฟันทั้งหมดเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ซีลเลอร์แข็งตัวจนสมบูรณ์ (ภาพประกอบ 20)



ภาพประกอบ 20 ภาพรังสีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของการอุดหลังการขยายและอุดคลองรากฟันด้วยวิธีเวอติคัลคอนเดนเซชัน (Vertical condensation)

การรื้อกั้ตทาเพอร์ชาและวัดความยาวคลองรากฟันซ้ำ

กำจัดเควิตออกด้วยหัวกรอซ้ำเหล็กกล้าไร้สนิมรูปกลม จากนั้นผสมผงอัลจิเนต (alginate) กับน้ำตามอัตราส่วนและวิธีที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ เทใส่บล็อกอะคริลิกขนาด 3x3x3 เซนติเมตรที่มีรูกลวงตรงกลางและมีห่วงลวดโลหะต่อที่ด้านข้างของบล็อก นำฟันแต่ละซี่ใส่ตรงกลางของบล็อกอะคริลิกให้ฟันอัลจิเนตบริเวณรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน ปิดทับด้วยอะคริลิกเรซินด้านบนเพื่อป้องกันการขยับของฟันระหว่างทำการทดลองตามคล้ายแบบจำลองฟัน

ในห้องปฏิบัติการของ Uzun และคณะ (51) ระยะเวลาตั้งแต่ผสมอัลจินเตจนทดลองเสร็จใช้เวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 21)



ภาพประกอบ 21 ตัวอย่างแบบจำลองฟันในห้องปฏิบัติการ

ทำการรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันโดยส่วนต้นของคลองรากฟันตัดกัตตาเปอร์ชาด้วยเกตส์ กลิดเดนดริลล์ เบอร์ 2 เพื่อเปิดทางตรงสู่คลองรากฟันและมีที่ว่างให้ใส่ไฟล์ลงไปได้ง่าย แล้วนำฟันที่เข้าร่วมการทดลองทั้งหมด 30 ซี่ 60 คลองรากฟัน เขียนหมายเลขที่ผิวรากฟันโดยคลองรากฟัน ด้านใกล้แก้มเป็นตัวอย่างที่ 1 และคลองรากฟันด้านใกล้เพดานเป็นตัวอย่างที่ 2 แล้วทำการสุ่มด้วยการจับสลากแบบไม่ใส่กลับคืน ทำซ้ำๆจนครบ 30 ซี่ เพื่อแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามเครื่องวัดความยาวที่ทดลองคือ กลุ่มที่ I เครื่อง Tri Auto ZX2 และกลุ่มที่ II เครื่อง Gold Reciproc กลุ่มละ 30 คลองรากฟัน (n=30) โดยในฟัน 1 ซี่จะถูกรัดความยาวด้วยเครื่องวัดความยาวทั้ง 2 เครื่องในแต่ละคลองรากฟัน แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการวัดความยาวรากฟันตามระบบเครื่องที่ทดลอง คือ

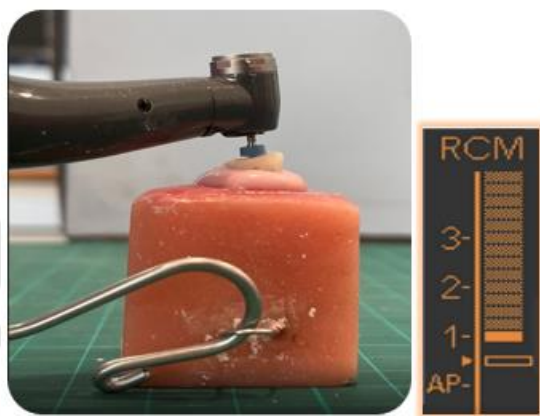
กลุ่มที่ I Tri Auto ZX2

Tri Auto ZX2 ปรับโหมดไปที่ OTR (Optimum Torque Reverse) เพื่อทำการขยายคลองรากฟัน แล้วเลือกเปิดโหมดหยุดหมุนปลายรากอัตโนมัติ (Auto Apical Stop) ซึ่งเครื่องจะหยุดหมุนไฟล์เมื่อปลายเครื่องมือเกินรูปลายรากฟัน ต่อตัวจับไฟล์กับไฟล์ระบบเอ็มทูรีทรีตเมนต์ และต่อลิปคลิปกับลวดที่ปลอกพลาสติก ทำการเดินเครื่องด้วยวิธีคราวน์ดาวน์ โดยใช้ไฟล์ขนาดอาร์ 2 (25/.05) ความเร็วในการหมุน 300 รอบต่อนาทีและค่าแรงบิด 2 นิวตันเซนติเมตรตามคำแนะนำของบริษัท จากนั้นใส่ไฟล์ที่กำลังหมุนลงมาที่ส่วนกลางจนถึงความยาวทำงาน ทำการล้างด้วยสารละลายไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น ร้อยละ 2.5 ปริมาณ 2 มิลลิลิตรในระหว่างที่ทำการรื้อ และทำการรื้อจนกว่าไฟล์จะลงได้ถึงบริเวณปลายรากฟันหรือเมื่อน้ำจ่อเครื่องแสดง

ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามตำแหน่งที่วัดออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 30 คลองรากฟัน แต่ละกลุ่มย่อยมีวิธีการวัดดังนี้

ตำแหน่ง 1 บาร์

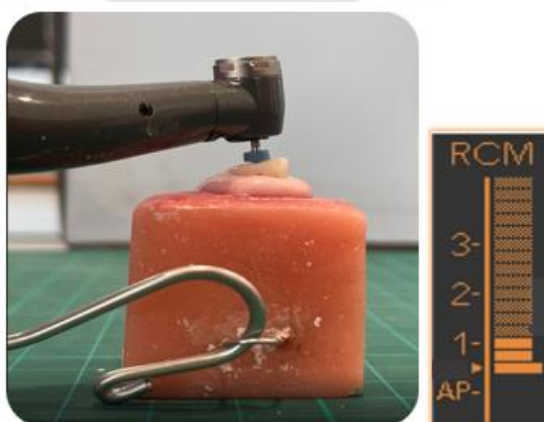
เมื่อปลายไฟล์อยู่ในตำแหน่งที่ 1 บาร์ จอมิเตอร์จะแสดงค่าเป็นไฟล์สี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งเลข 1 แล้วกดปุ่ม Main switch เพื่อหยุดเครื่อง (ภาพประกอบ 22)



ภาพประกอบ 22 ภาพจำลองขณะทำการขยายและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอ มิเตอร์แสดงไฟล์สี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง 1 บาร์ของ Tri Auto ZX2

ตำแหน่ง 0.5 บาร์

เมื่อปลายไฟล์อยู่ในตำแหน่งที่ 0.5 บาร์ จอมิเตอร์จะแสดงค่าเป็นไฟล์สี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งสัญลักษณ์รูป ▶ บนหน้าจอ ตำแหน่งนี้จะเป็นจุดหยุดหมุนของไฟล์อัตโนมัติ (ภาพประกอบ 23)



ภาพประกอบ 23 ภาพจำลองขณะทำการขยายและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอ มิเตอร์แสดงไฟล์สี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์หรือแสดงสัญลักษณ์รูป ▶ ของ Tri Auto ZX2

กลุ่มที่ II Gold Reciproc

Gold Reciproc ปรับโหมดไปที่โรตารี (rotary mode) เพื่อทำการขยายคลองรากฟัน แล้วเลือกเปิดโหมดหยุดหมุนปลายรากอัตโนมัติ (Auto Apical Stop) ซึ่งเครื่องจะหยุดหมุนไฟล์เมื่อปลายเครื่องมือเกินรูปลายรากฟัน ทำการเดินเครื่องด้วยวิธีคราวน์ดาวน์ โดยใช้ไฟล์ขนาดอาร์ 2 (25/.05) ความเร็วในการหมุน 300 รอบต่อนาทีและค่าแรงบิด 2 นิวตันเซนติเมตรตามคำแนะนำของบริษัท ทำการเดินเครื่องและรีวส์อุดคลองรากฟันเหมือนการทดลองกลุ่มที่ I โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามตำแหน่งที่วัดออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 30 คลองรากฟัน แต่ละกลุ่มย่อยมีวิธีการวัดดังนี้

ตำแหน่ง 1 บาร์

ใช้แป้นเหยียบในการบังคับ เมื่อปลายไฟล์อยู่ในตำแหน่งที่ 1 บาร์ จอมิเตอร์จะแสดงค่าเป็นไฟล์เขียวชุดที่ 1 แล้วหยุดเหยียบแป้นบังคับเพื่อหยุดเครื่อง (ภาพประกอบ 24).



ภาพประกอบ 24 ภาพจำลองขณะทำการขยายคลองและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอมิเตอร์แสดงไฟล์เขียวชุดที่ 1 ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ของ Gold Reciproc

ตำแหน่ง 0.5 บาร์

ใช้แป้นเหยียบในการบังคับ เมื่อปลายไฟล์อยู่ในตำแหน่งที่ 0.5 บาร์ จอมิเตอร์จะแสดงค่าเป็นไฟล์เขียวชุดที่ 3 ตำแหน่งนี้จะเป็นจุดหยุดหมุนของไฟล์อัตโนมัติ แล้วให้หยุดเหยียบแป้นบังคับ (ภาพประกอบ 25)



ภาพประกอบ 25 ภาพจำลองขณะทำการขยายคลองและวัดความยาวรากฟันไปพร้อมกัน หน้าจอ มิเตอร์แสดงไฟสีเขียวขีดที่ 3 ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ของ Gold Reciproc

จากนั้นปรับตัวรับเบอร์สตอบที่ตำแหน่งปลายฟัน ทำการยัดไฟล์ด้วยฟิลเทค ซี350 โพล เอเบิลและฉายแสง ดึงไฟล์ออกมาวางบนแผ่นกระดานดีเส้นกริด แล้วทำการถ่ายภาพด้วยกล้อง ถ่ายรูปในตำแหน่งเดียวกับที่ทำการวัดความยาวจริง ภาพที่ได้นำมาวัดความยาวไฟล์ด้วย โปรแกรม ImageJ ได้เป็นค่าความยาวทำงาน (Retreatment working length: REWL) ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และตำแหน่ง 0.5 บาร์ของเครื่อง Tri Auto ZX2 และที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และตำแหน่ง 0.5 บาร์ของเครื่อง Gold Reciproc ไฟล์ถูกนำมาใช้ซ้ำจำนวน 4 คลองรากฟันและเปลี่ยนไฟล์ใหม่ใน คลองรากฟันถัดไปตามตามคำแนะนำของบริษัท หลังจากใช้งานทุกครั้งให้เช็ดด้วยผ้าก๊อชเพื่อ กำจัดเศษวัสดุอุดและเศษเนื้อฟัน ซึ่งทุกคลองรากฟันถูกเตรียม อุด และกำจัดวัสดุอุดด้วยผู้ทำ หัตถการคนเดียวกัน

คำนวณค่าความยาวคลองรากฟันที่แตกต่างกัน ทั้งความยาวคลองรากฟันที่แท้จริง (AL) และความยาวทำงานหลังวัสดุอุดคลองรากฟัน (REWL) โดยนำค่า REWL ลบด้วยค่า AL ของ ฟันแต่ละตำแหน่ง ในกรณีที่ปลายไฟล์สั้นกว่าความยาวจริงให้กำหนดค่าเป็นค่าลบ (-) และกรณีที่ ปลายไฟล์ยาวกว่าความยาวจริงให้กำหนดค่าเป็นค่าบวก (+)

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติเชิงพรรณนาแสดงค่าเฉลี่ยความยาวจริงกับความยาวทำงาน ค่าเฉลี่ยความต่างของความยาวคลองรากฟัน และการกระจายตัวเป็นความถี่ (frequency) ของระยะห่างความยาวที่ได้จากเครื่องไทรออดโตซีเอกซโทและโกลด์เรซีพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์กับความยาวจริง

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวทำงานที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ กับค่าความยาวจริงในเครื่องวัดทั้ง 2 กลุ่มโดยใช้สถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม (Intraclass Correlation Coefficient; ICC)

ทดสอบการกระจายตัวเป็นค่าความแตกต่างของความยาวทำงานที่วัดได้จากเครื่องวัดทั้ง 2 กลุ่มที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์กับค่าความยาวจริงเพื่อบอกความสอดคล้องของข้อมูลและช่วงการยอมรับ (95% limit of agreement) ของการวัดด้วย Bland-Altman Plot

วิเคราะห์เปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าแต่ละชนิดเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่งเดียวกันในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตรกับค่าความยาวจริงโดยใช้สถิติการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square)

กำหนดค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 20 (Statistics 20; IBM, SPSS Inc, Chicago, IL, USA)

บทที่ 4

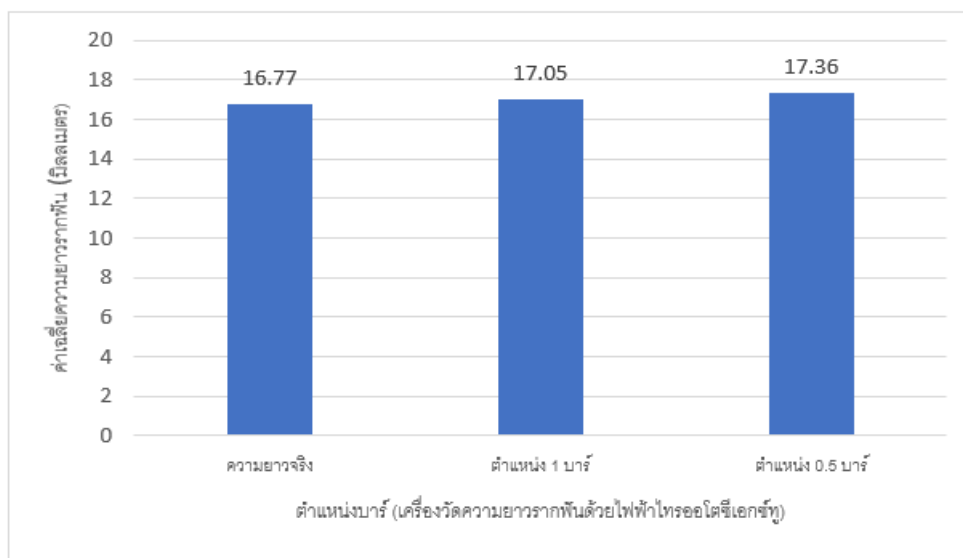
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบเพื่อดูความสอดคล้องและความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าร่วมกับขยายคลองรากฟันระหว่างการรักษาคคลองรากฟันซ้ำ เพื่อกำหนดความยาวทำงานที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ ในฟันกรามน้อยบนที่มี 2 รากจำนวน 30 ซี่ 60 คลองรากฟัน แบ่งการวัดความยาวรากฟันออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

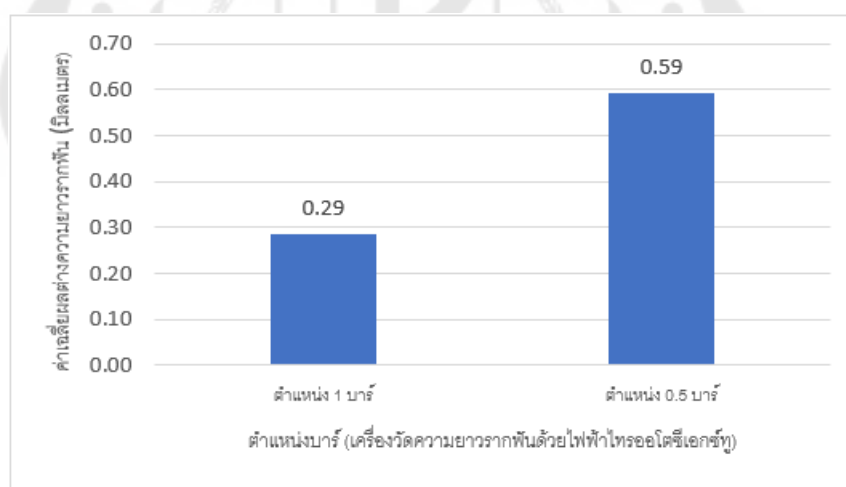
กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าไทรออกโตซีเอกซ์ทู จำนวน 30 ซี่ 30 คลองรากฟัน

กลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอก จำนวน 30 ซี่ 30 คลองรากฟัน

ผลการทดลองวัดความยาวรากฟันที่เก็บข้อมูลมาจากกลุ่มตัวอย่าง ประกอบไปด้วยค่าความยาวรากฟันจริง ค่าความยาวที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในระหว่างการรีวส์อุดคลองรากฟันที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ พบว่าในกลุ่มที่วัดด้วยเครื่องไทรออกโตซีเอกซ์ทูมีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงน้อยที่สุดเท่ากับ 16.77 มิลลิเมตร ในขณะที่ภายใต้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออกโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันเท่ากับ 17.05 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันมากที่สุดเท่ากับ 17.36 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 26 และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลต่างความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออกโตซีเอกซ์ทูกับค่าความยาวจริง พบว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยผลต่างกับค่าความยาวจริงเท่ากับ 0.29 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเฉลี่ยผลต่างกับค่าความยาวจริงเท่ากับ 0.59 มิลลิเมตร หรือกล่าวคือเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออกโตซีเอกซ์ทูวัดค่าความยาวรากฟันในระหว่างการรีวส์อุดคลองรากฟันได้ยาวกว่าความยาวจริงทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยความต่างน้อยกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 27



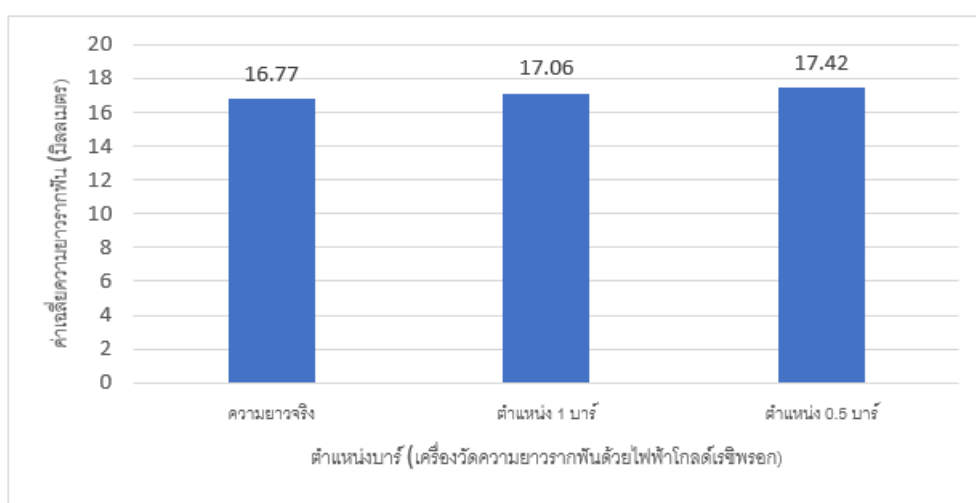
ภาพประกอบ 26 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงและที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไฮดรอกโตซีเอกซท์ (มิลลิเมตร)



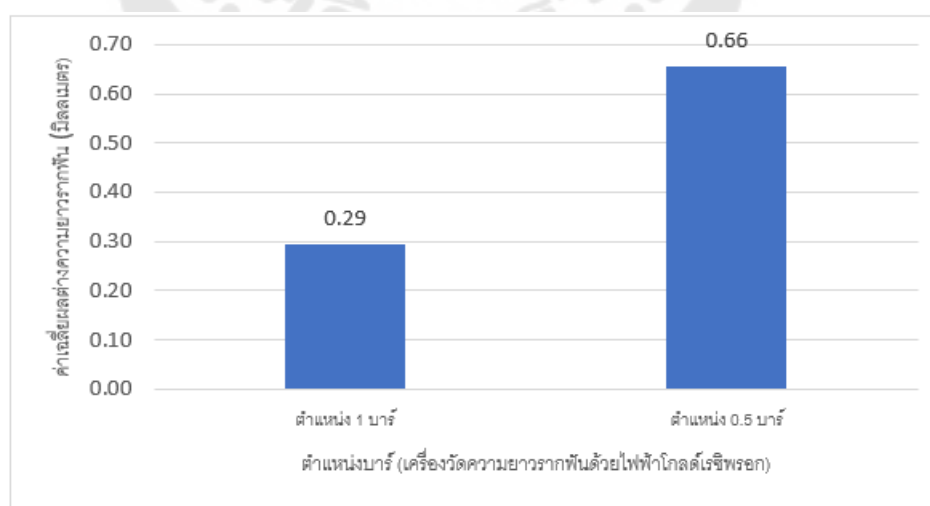
ภาพประกอบ 27 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยผลต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไฮดรอกโตซีเอกซท์และค่าความยาวจริง (มิลลิเมตร)

กลุ่มที่วัดด้วยเครื่องโกลด์เรซีพรอกมีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงน้อยที่สุดเท่ากับ 16.77 มิลลิเมตร ในขณะที่ภายใต้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันเท่ากับ 17.06 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันมากที่สุดเท่ากับ 17.42 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 28 และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลต่างความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์

เรซีพรอกกับค่าความยาวจริง พบว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยผลต่างกับค่าความยาวจริงเท่ากับ 0.29 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเฉลี่ยผลต่างกับค่าความยาวจริงเท่ากับ 0.66 มิลลิเมตร หรือกล่าวคือเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกวัดค่าความยาวรากฟันในระหว่างการรีอัสตูดุดคลองรากฟันได้ยาวกว่าความยาวจริงทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเฉลี่ยความต่างน้อยกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 29



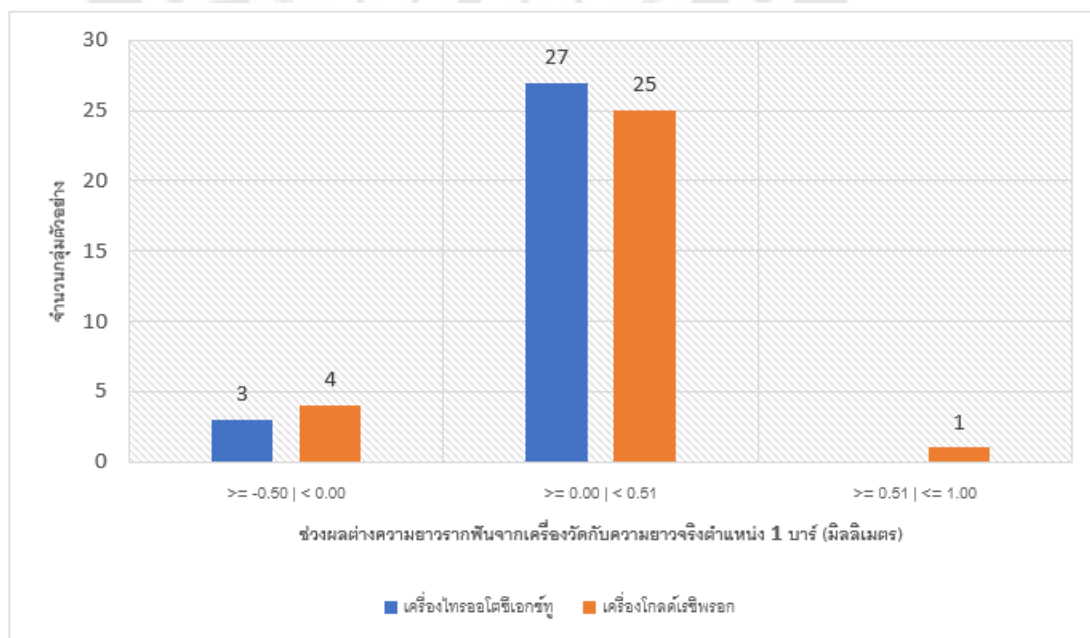
ภาพประกอบ 28 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันจริงและที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอก (มิลลิเมตร)



ภาพประกอบ 29 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยผลต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกและค่าความยาวจริง (มิลลิเมตร)

ผลต่างค่าความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดกับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์

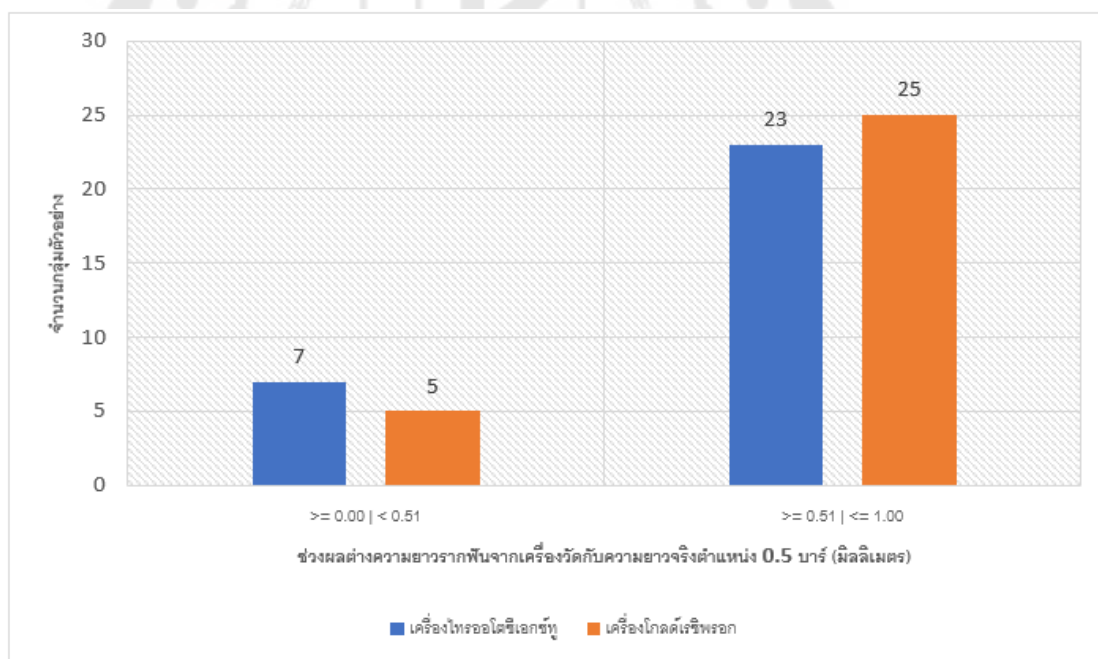
เมื่อทำการแบ่งค่าผลต่างความยาวรากฟันระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริง ($\Delta REWL$) ออกเป็นช่วงความแม่นยำช่วงละ 0.5 มิลลิเมตร ผลแจกแจงความถี่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 1 บาร์ พบว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซ์ทูมีจำนวน 27 ตัวอย่างจาก 30 ตัวอย่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงผลต่างที่มีจำนวนตัวอย่างมากที่สุด ในขณะที่อีก 3 ตัวอย่างมีผลต่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง -0.50 มิลลิเมตร ถึง น้อยกว่า 0.00 มิลลิเมตร ส่วนเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกมีจำนวน 25 ตัวอย่างจาก 30 ตัวอย่างมีผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร รองลงมาคือช่วงผลต่างระหว่าง -0.50 มิลลิเมตร ถึง น้อยกว่า 0.00 มิลลิเมตร มีจำนวนตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง และมีอีก 1 ตัวอย่างตกอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตร โดยสรุปที่ตำแหน่ง 1 บาร์เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดข้อมูลมีความแม่นยำอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตรมากที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 แผนภูมิแท่งแสดงผลต่างความยาวรากฟัน (มิลลิเมตร) ที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์ในรูปแบบการแจกแจงความถี่

ผลต่างค่าความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดกับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์

เมื่อทำการแบ่งค่าผลต่างความยาวรากฟันระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริง ($\Delta REWL$) ออกเป็นช่วงความแม่นยำช่วงละ 0.5 มิลลิเมตร ผลแจกแจงความถี่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ พบว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโทรออโตซีเอกซ์ทูมีจำนวนตัวอย่าง 23 ตัวอย่างจาก 30 ตัวอย่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตร และมี 7 ตัวอย่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร ส่วนเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกมีจำนวนตัวอย่าง 25 ตัวอย่างจาก 30 ตัวอย่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตร และมี 5 ตัวอย่างอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร โดยสรุปคือ ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดข้อมูลมีความแม่นยำอยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตรมากที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แผนภูมิแท่งแสดงผลต่างความยาวรากฟัน (มิลลิเมตร) ที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ากับค่าความยาวจริงที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ในรูปแบบการแจกแจงความถี่

การวิเคราะห์ความสอดคล้องของความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ ในระหว่างการรีดวัสดุอุดคลองรากฟันกับความยาวจริง

ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อตอบคำถามงานวิจัยว่าเครื่องมือวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในระหว่างทำการรีดวัสดุอุดคลองรากฟันเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์มีความสอดคล้องกับความยาวจริงหรือไม่ โดยใช้สถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม (Intraclass Correlation Coefficient หรือ ICC)

กลุ่มที่ 1 พบว่าค่าความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรอกโตซีเอกซทูและค่าความยาวจริงเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มเท่ากับ 0.876 แปลว่ามีความสอดคล้องกันสูงมาก ในขณะที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม เท่ากับ 0.670 แปลว่ามีความสอดคล้องกันปานกลาง และค่า p-value ของทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แปลว่าค่าความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรอกโตซีเอกซทูในระหว่างทำการรีดวัสดุอุดคลองรากฟันมีความสอดคล้องกันกับค่าความยาวจริงเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 3

กลุ่มที่ 2 พบว่าค่าความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกและค่าความยาวจริงเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มเท่ากับ 0.897 แปลว่ามีความสอดคล้องกันสูงมาก ในขณะที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม เท่ากับ 0.692 แปลว่ามีความสอดคล้องกันปานกลาง และค่า p-value ของทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แปลว่าค่าความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกในระหว่างทำการรีดวัสดุอุดคลองรากฟันมีความสอดคล้องกันกับค่าความยาวจริงเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรูดโตซีเอกซท์ูและโกลด์เรซีพรอกกับความยาวจริง

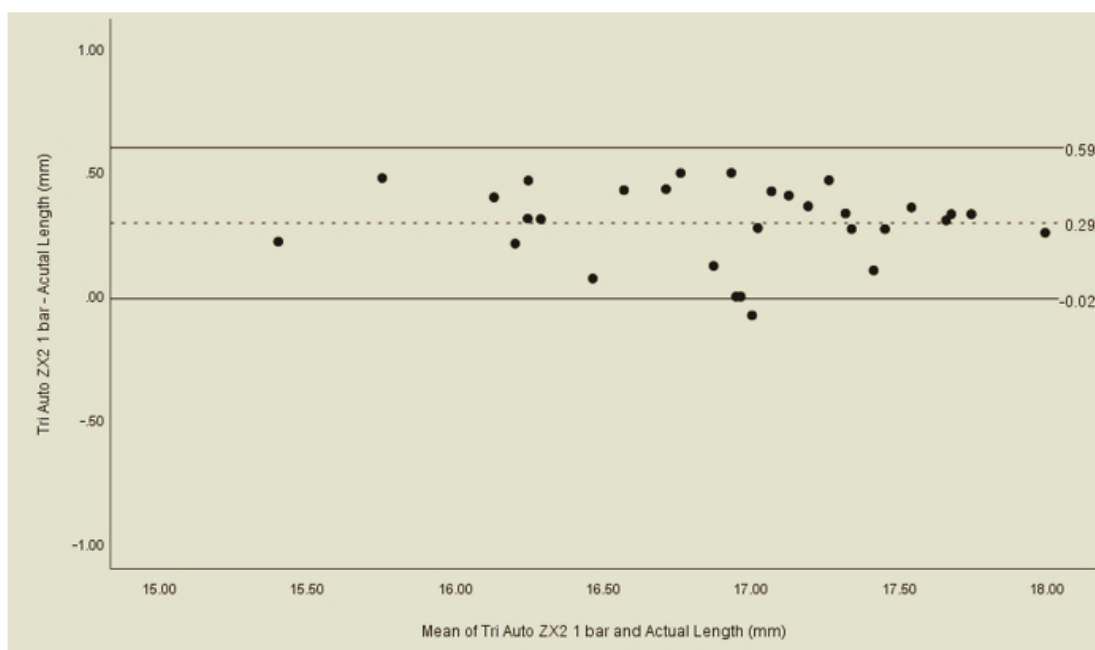
ตำแหน่ง	ไทรูดโตซีเอกซท์ู		โกลด์เรซีพรอก	
	สถิติสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม	p-value	สถิติสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม	p-value
1 bar	0.876	<0.001	0.897	<0.001
0.5 bar	0.670	<0.001	0.692	<0.001

การทดสอบการกระจายตัวเพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องของความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ ในระหว่างการรีดวัสดุอุดคลองรากฟันกับความยาวจริงด้วย

ใช้สถิติ Bland-Altman Plot ในช่วงการยอมรับ 95% (95% limit of agreement)

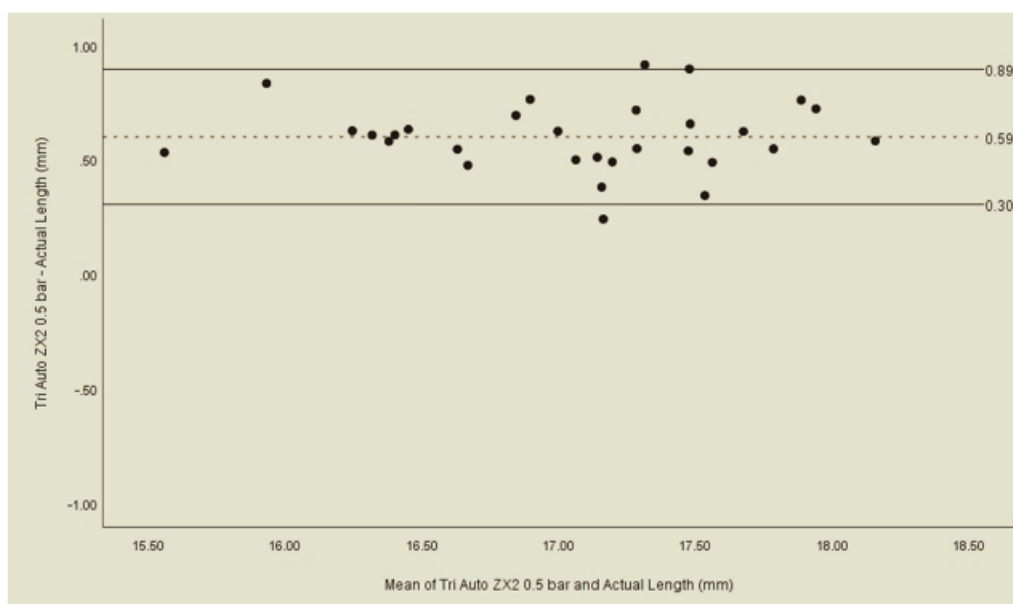
กลุ่มที่ 1 ไทรูดโตซีเอกซท์ู

ตำแหน่ง 1 บาร์: เมื่อพิจารณา Bland-Altman Plot ดังแสดงในภาพประกอบ 32 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระไม่มีรูปแบบที่เจาะจงภายใต้ช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่าผลต่างความยาวรากฟันครอบคลุมระหว่าง -0.02 มิลลิเมตร ถึง 0.59 มิลลิเมตร สามารถแปลผลได้ว่าข้อมูลความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรูดโตซีเอกซท์ูที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริง โดยความสอดคล้องนี้มีความต่างของความยาวอยู่ในช่วง -0.02 มิลลิเมตร ถึง 0.59 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความต่างเท่ากับ 0.29 มิลลิเมตร จากภาพมีข้อมูลเพียง 1 ตัวอย่างที่อยู่นอกช่วงความเชื่อมั่น



ภาพประกอบ 32 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 1 บาร์และความยาวจริง

ตำแหน่ง 0.5 บาร์: เมื่อพิจารณา Bland-Altman Plot ดังแสดงในภาพประกอบ 33 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระไม่มีรูปแบบที่เจาะจงภายใต้ช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่าผลต่างความยาวรากฟันครอบคลุมระหว่าง 0.30 มิลลิเมตร ถึง 0.89 มิลลิเมตร สามารถแปลผลได้ว่าข้อมูลความยาวรากฟันที่วัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริง โดยความสอดคล้องนี้มีความต่างของความยาวอยู่ในช่วง 0.30 มิลลิเมตร ถึง 0.89 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความต่างเท่ากับ 0.59 มิลลิเมตร จากภาพมีข้อมูลเพียง 2 ตัวอย่างที่อยู่นอกช่วงความเชื่อมั่น



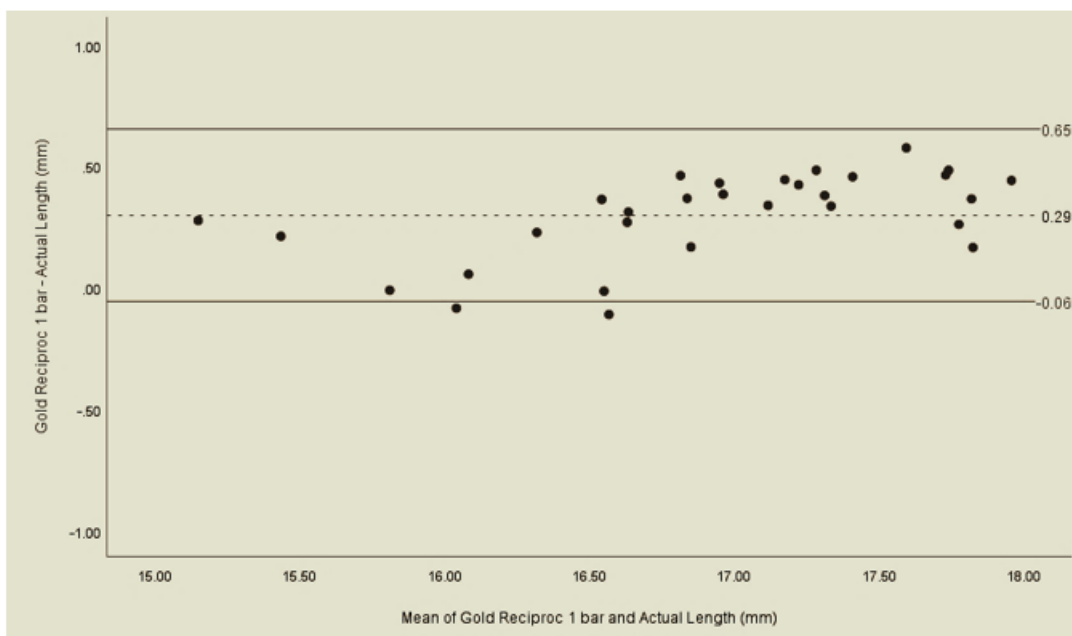
ภาพประกอบ 33 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์และความยาวจริง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพประกอบ 32 และภาพประกอบ 33 จะพบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีข้อมูลที่หลุดออกจากช่วงความเชื่อมั่น 95% มากกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยความต่างของความยาวรากฟันเมื่อวัดจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ยังสูงกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลมีค่าขอบล่างและขอบบนของความเชื่อมั่น 95% สูงกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และสอดคล้องกับค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มที่แสดงว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีความสอดคล้องปานกลางในขณะที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องสูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริงมากกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์

กลุ่มที่ 2 โกลด์เรซิพรอก

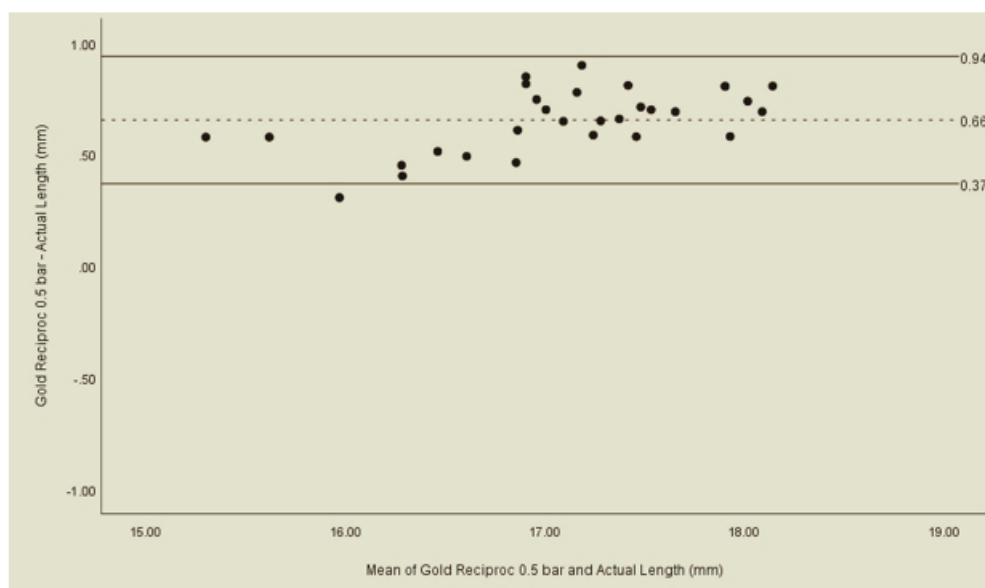
ตำแหน่ง 1 บาร์: เมื่อพิจารณา Modified Bland-Altman Plot ดังแสดงในภาพประกอบ 34 พบว่าข้อมูลมีการกระจายอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่าผลต่างครอบคลุมระหว่าง -0.06 มิลลิเมตร ถึง 0.65 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความต่างของความยาวรากฟันเท่ากับ 0.29 แต่ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างมีรูปแบบ โดยพบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันสูงขึ้น ค่าผลต่างความยาวรากฟันจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย กล่าวได้ว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์จะวัดความยาวรากฟันได้สูงกว่าความยาวจริงมากขึ้น

ถ้าความยาวรากฟันยาว ในขณะที่ถ้าความยาวรากฟันสั้น ความต่างของความยาวรากฟันก็จะน้อยลง



ภาพประกอบ 34 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์และความยาวจริง

ตำแหน่ง 0.5 บาร์: เมื่อพิจารณา Modified Bland-Altman Plot ดังแสดงในภาพประกอบ 35 พบว่าข้อมูลมีการกระจายอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่าผลต่างครอบคลุมระหว่าง 0.37 มิลลิเมตร ถึง 0.94 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความต่างของความยาวรากฟันเท่ากับ 0.66 แต่ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างมีรูปแบบ โดยพบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันสูงขึ้น ค่าผลต่างความยาวรากฟันจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย กล่าวได้ว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์จะวัดความยาวรากฟันได้สูงกว่าความยาวจริงมากขึ้นถ้าความยาวรากฟันยาว ในขณะที่ถ้าความยาวรากฟันสั้น ความต่างของความยาวรากฟันก็จะน้อยลง



ภาพประกอบ 35 Bland-Altman Plot ค่าความยาวรากฟันที่วัดได้จากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์และความยาวจริง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพประกอบ 35 และภาพประกอบ 36 จะพบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเฉลี่ยความต่างของความยาวรากฟันสูงกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลมีค่าขอบล่างและขอบบนของความเชื่อมั่น 95% สูงกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และสอดคล้องกับค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มที่แสดงว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีความสอดคล้องปานกลางในขณะที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องสูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องกับค่าความยาวจริงมากกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ อย่างไรก็ตามเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกเมื่ออ่านค่าทั้งที่ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์อาจจะไม่ใช่เครื่องวัดความยาวรากฟันที่เหมาะสมในการวัดความยาวรากฟันในกรณีที่รากฟันมีความยาวมาก เพราะผลความยาวที่ได้อาจจะสูงกว่าความยาวจริงได้ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซทูที่ไม่แสดงความสัมพันธ์นี้

การวิเคราะห์เปรียบเทียบหาความแม่นยำระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซทูและโกลด์เรซิพรอกที่แตกต่างกับความยาวจริง

ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดที่ตำแหน่งบาร์เดียวกันในช่วงค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตร ใช้สถิติไคสแควร์ (Chi-Square) ในการทดสอบ

ตำแหน่ง 1 บาร์

ตารางแจกแจงความถี่แสดงค่าร้อยละของกลุ่มตัวอย่าง เมื่อจำแนกตามช่วงความต่างความยาวรากฟันระหว่างความยาวที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าและความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์ โดยพบว่า ร้อยละ 100.00 ของกลุ่มตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซท์ูมีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 0.50 มิลลิเมตร ในขณะที่ร้อยละ 96.67 ของกลุ่มตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกมีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 0.50 มิลลิเมตร และร้อยละ 100.00 ของกลุ่มตัวอย่างทั้งคู่มีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 1.00 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามค่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.064 ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แปลว่าค่าความต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซท์ูและเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีการกระจายตัวเหมือนกัน ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ค่าร้อยละกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามช่วงความต่างเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์

ช่วงผลต่างความยาว	เครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ู		เครื่องโกลด์เรซีพรอก		p-value
	จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ	
-0.50 ถึง -0.01 มิลลิเมตร	3	10.00	4	13.33	0.064
0.00 ถึง 0.50 มิลลิเมตร	27	90.00	25	83.33	
0.51 ถึง 1.00 มิลลิเมตร			1	3.33	

ตำแหน่ง 0.5 บาร์

ตารางแจกแจงความถี่แสดงค่าร้อยละของกลุ่มตัวอย่าง เมื่อจำแนกตามช่วงความต่างความยาวรากฟันระหว่างความยาวที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าและความยาวจริงที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ โดยพบว่า ร้อยละ 23.33 ของกลุ่มตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซท์ูมีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 0.50 มิลลิเมตร ในขณะที่ร้อยละ 16.67 ของกลุ่มตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซีพรอกมีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 0.50 มิลลิเมตร และร้อยละ 100.00 ของกลุ่มตัวอย่างทั้งคู่มีความต่างความยาวรากฟันอยู่ในช่วง ± 1.00 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามค่า p-value มี

ค่าเท่ากับ 0.565 ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แปลว่าค่าความต่างความยาวรากฟันที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรอกโตซีเอกซท์ูและเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโกลด์เรซิพรอกที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีการกระจายตัวเหมือนกัน ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ค่าร้อยละกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามช่วงความต่างเมื่ออ่านค่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์

ช่วงผลต่างความยาว	เครื่องไทรอกโตซีเอกซท์ู		เครื่องโกลด์เรซิพรอก		p-value
	จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ	
0.00 ถึง 0.50 มิลลิเมตร	7	23.33	5	16.67	0.565
0.51 ถึง 1.00 มิลลิเมตร	23	76.67	25	83.33	

โดยสรุปแล้ว ผลการวิเคราะห์สถิติไคสแควร์แสดงว่าที่ตำแหน่งบาร์เดียวกัน เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมีความแม่นยำไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

การอภิปรายผลการวิจัย

การทดลองที่เป็นการจำลองสถานการณ์การวัดความยาวรากฟันในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลอง เพื่อเลียนแบบสถานการณ์จริงภายในช่องปาก จำเป็นต้องใช้ตัวกลาง (media) ในการฝังฟันเพื่อจำลองสภาวะการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟัน Chen และคณะ (75) และ Baldi และคณะ (77) เปรียบเทียบตัวกลางหลายชนิดเพื่อใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในการกำหนดความยาวทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟัน พบว่าอัลจินตมีประสิทธิภาพเหนือกว่าตัวกลางชนิดอื่นในการระบุตำแหน่งปลายรากฟันโดยให้ผลสอดคล้องกับความยาวคลองรากฟันจริงมากที่สุด Lipski และคณะ (76) พบว่าอัลจินตยังให้ความแม่นยำไม่แตกต่างจากการวัดความยาวทางคลินิก เนื่องจากอัลจินตมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี สามารถรองรับและสัมผัสกับรากฟันได้แน่นหนา มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงขณะขยายคลองรากฟัน (81) ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้อัลจินตเป็นตัวกลางแทนเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันซึ่งออกแบบโมเดลคล้ายการทดลองของ Uzun และคณะ (51) แต่ใช้บล็อกอะคริลิกเพื่อเป็นที่อยู่ของอัลจินตและให้มีหลอดไฟอยู่ด้านข้างในระหว่างที่ทำการวัดความยาวร่วมกับรีจิสเตอร์คลองรากฟันครั้งนี้

การวัดความแม่นยำในการศึกษานี้ใช้ฟันกรามน้อยบนมนุษย์ที่มี 2 รากโดยมีรากฟันตรงเนื่องจากการศึกษาทางคลินิกฟันซี่ที่ต่างกันอาจมีสภาวะรอบปลายรากฟันที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในการศึกษานี้เป็นการศึกษาคลองรากฟันซ้ำ จึงเลือกฟันที่มีเฉพาะ 2 รากเพื่อทำให้อากฟันทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุดและลดความแปรปรวนจากส่วนประกอบของฟันที่แตกต่างกัน โดยฟันทั้งหมดตัดส่วนของตัวฟันให้มีความยาวโดยวัดจากส่วนของปลายรากฟันขึ้นมาให้อยู่ในช่วงความยาวไม่เกิน 20 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถวัดความยาวทำงานจากไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมที่มีความยาว 21 มิลลิเมตร เหลือพื้นที่สำหรับปรับรับเบอร์สตอบได้สะดวก และมีจุดสัมผัสของรับเบอร์สตอบที่แน่นอน ซึ่งการศึกษานี้ใช้ฟันจำนวน 30 ซี่ มีความยาวเฉลี่ย 16.77 มิลลิเมตร และในระหว่างทำการทดลองสามารถกำหนดขนาดที่ทำการขยายคลองรากฟันและคุณภาพในการอุดคลองรากฟันให้เหมือนกัน เพื่อให้มีความเท่าเทียมกันในการเปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

การวัดหาความยาวจริง (Actual length) นั้นมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำคือการตัดฟันตามแนวยาวเพื่อพิจารณาจุดคอดปลายรากฟันแล้ววัดระยะปลายไฟล์ (18, 110, 111) แต่วิธีดังกล่าวมีความยุ่งยาก เป็นการทำลายตัวอย่างให้เกิดความเสียหาย และอาจทำลาย

ส่วนประกอบทางกายวิภาคของรากฟัน และจากการศึกษาของ Dummer (123) พบว่าจุดยอดปลายรากฟันอาจจะไม่สามารถพบได้ในฟันทุกซี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามการใช้งาน อายุ และพยาธิสภาพ จึงเลือกวัดความยาวโดยนำไฟล์ออกมาวัดความยาวโดยตรงเปรียบเทียบกับความยาวจริงโดยอ้างอิงจุดสั้นกว่าปลายรากฟัน นอกจากนั้นมีการตัดฟันให้ได้พื้นที่หน้าตัดเสมอกันเพื่อให้กำหนดจุดอ้างอิงและปรับรับเบอร์สตอบให้แนบสนิทได้ง่าย การควบคุมการวัดในการศึกษานี้จะใช้วัสดุคอมโพสิตความหนืดต่ำชนิดแข็งตัวด้วยแสงรอบๆด้ามไฟล์ในส่วนที่อยู่เหนือรับเบอร์สตอบในขณะที่ไฟล์ยังคงอยู่ภายในคลองรากฟันเพื่อป้องกันการขยับ ในบางการศึกษานำไฟล์ออกมาวัดด้วยไม้บรรทัด (49) บางการศึกษาวัดด้วยเครื่องดิจิตอลคาลิเปอร์ซึ่งมีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (26-29) หรือบางการศึกษาวัดภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงแล้วใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปวัด (10, 50) ส่วนการศึกษาค้างนี้นำไฟล์ออกมาวางบนบนแผ่นกระดาษดีเส้นกริด และถ่ายภาพให้ตั้งฉากกับตัวไฟล์ด้วยกล้องถ่ายรูปที่ถูกยึดด้วยขาตั้งกล้อง โดยคงตำแหน่งเดิมทุกครั้ง แล้วนำมาเข้าโปรแกรมสำเร็จรูปอิมเมจเจที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่งในการวัด มีความเที่ยงตรงสูง สามารถขยายภาพเพื่อให้เห็นตำแหน่งปลายเครื่องมือได้ชัดเจนและสามารถทำซ้ำได้ตามที่ต้องการ

การกำหนดตำแหน่งปลายรากฟันการศึกษาค้างนี้เลือกใช้ตำแหน่ง 0.5 มิลลิเมตรจากรูเปิดปลายรากฟันในการทำงานเพื่อใช้วัดเป็นความยาวที่แท้จริง เนื่องจากการวัดความยาวรากฟันในการศึกษาค้างนี้เป็นการวัดในการรักษาคคลองรากฟันซ้ำซึ่งมีการกำหนดในการรักษาครั้งแรกให้ความยาวในการอุดรากฟันสั้นกว่าปลายราก 0.5 มิลลิเมตร จึงเลือกใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการอ้างอิง เนื่องจากตำแหน่งแคบสุดของคลองรากฟันอาจถูกทำลายไปตั้งแต่การขยายคลองรากฟันครั้งแรก หรือในทางคลินิกเมื่อมีพยาธิสภาพจนเกิดการละลายรอบปลายรากฟัน (124) นอกจากนี้พบว่าความยาวจริงจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกครั้งในระหว่างขั้นตอนการรักษาคคลองรากฟัน (125) ทำให้มีโอกาสวัดความยาวทำงานหลังหรือวัสดุอุดคลองรากฟันได้สั้นลงกว่าความเป็นจริง (29) และเศษเนื้อฟัน (dentine debris) ที่ผ่านการเตรียมคลองรากฟันอาจอุดตันรูเปิดปลายรากฟัน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความยาวทำงานด้วยกระแสไฟฟ้า (30) ส่วนการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความยาวทำงานในการรักษาคคลองรากฟันซ้ำมีโอกาสเกินปลายรากฟันได้สูงกว่าปกติ (25-29) ดังนั้นจุดอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้จึงเป็นตำแหน่งที่มีความปลอดภัย ไม่เกินปลายรากออกไปทำลายเนื้อเยื่อปริทันต์ (periodontal tissue) โดยเป็นความยาวที่ยังคงอยู่ภายในส่วนแคบของคลองรากฟัน และการใช้ความยาวหลังการเตรียมคลองรากฟันเป็นความยาวที่แท้จริงจะทำให้เกิดความแม่นยำในการทดลองมากขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา Sjogren และคณะ (3) พบว่าในกรณีที่ทำกรักษาคลองรากฟันชั่วคราวกำหนดระยะการทำงานในการรักษาคลองรากฟันให้อยู่ภายในคลองรากฟันในการศึกษาของ Alves และคณะ (24) เปรียบเทียบตำแหน่งปลายรากฟันด้วยเครื่องโทรออโตซีเอกซ์โดยใช้ไหมวัดความยาวปกติ พบว่าการรักษาคลองรากฟันซ้ำมีโอกาสที่ไฟล์เกินออกไปนอกปลายรากมากกว่าการรักษาคลองรากฟันครั้งแรกสูงถึงร้อยละ 36 ส่วนการศึกษาของ Uzun และคณะ (51) ทดสอบความแม่นยำในเครื่องวัดชนิดเดียวกันแต่ใช้ไหมวัด Auto Apical Reverse พบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟันถึงร้อยละ 60 ส่วนการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าชนิดอื่นไหมวัดความยาวปกติ พบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ให้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกัน (26, 27) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้ทำการทดลองจึงมีความสนใจในการกำหนดจุดหยุดบนหน้าจอแสดงผลให้เป็นตำแหน่ง 1 บาร์ที่สั้นกว่าปกติ ซึ่งอาจจะทำให้ลดโอกาสการเกินของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียม นอกจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบตำแหน่งดังกล่าวกับตำแหน่งเดิมที่นิยมใช้เพื่อกำหนดตัวเลือกที่เหมาะสมในการรักษาต่อไป

การเลือกใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมสำหรับรีตreatment คลองรากฟันระบบ Mtwo Retreatment files ในการศึกษาเนื่องจากเครื่องมือถูกออกแบบให้มีคมที่ปลาย สามารถกรอกำจัดกัตาเปอร์ชาได้ และการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสามารถรีตreatment ได้ง่ายกว่าไฟล์ระบบอื่น (42-44) โดยไฟล์ที่นำมาใช้คืออาร์ 2 (25/.05) ซึ่งมีขนาดปลายไฟล์เท่ากันแต่มีความผายน้อยกว่าคลองรากฟันที่ได้รับการขยายก่อนที่จะอุดด้วย ProTaper Next ขนาดเอ็กซ์ 2 (25/.06) ทำให้ในระหว่างการวัดความยาวทำงาน Mtwo Retreatment files จะกำจัดเฉพาะกัตาเปอร์ชาแต่ไม่เกิดการขยายในส่วนเนื้อฟัน และช่วยคงขนาดรูปลายรากฟันให้เท่าเดิมมากที่สุด มีการศึกษาพบว่าการตัดของไฟล์ที่ไม่ทำลายเนื้อฟัน (45) และการกำจัดกัตาเปอร์ชาที่มีประสิทธิภาพ (46) จะเพิ่มโอกาสให้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้ามีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนวิธีการรีตreatment จะใช้ Gates glidden drill เบอร์ 2 กำจัดกัตาเปอร์ชาที่ส่วนต้นของคลองรากฟันเพื่อเปิดทางให้ไฟล์ลงไปได้สะดวก แล้วใช้ Mtwo Retreatment files ในส่วนกลางจนถึงตำแหน่งที่เครื่องอ่านค่าตามที่ต้องการ ทั้งนี้ตลอดระยะเวลาในการทดลองไม่พบเครื่องมือหักอยู่ภายในคลองรากฟัน ถึงแม้การศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่าการใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมมีความเสี่ยงสูงที่เครื่องมือจะหักมากกว่าการใช้ไฟล์มือ (37, 41) แต่เนื่องจากการศึกษาในฟันกรามน้อยที่มีคลองรากฟันตรง ผู้ทำการทดลองหมั่นเช็คเครื่องมือสลับกับการล้างคลองรากฟันด้วยน้ำยาโซเดียมไฮโปคลอไรต์ รวมทั้งใช้ไฟล์ 1 ตัวต่อ 4 คลองรากฟันแล้วเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งตามคำแนะนำของบริษัท จึงไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว และในระหว่างทำการรีตreatment จะตรวจสอบว่ามีการอุดตันที่รูปลายรากฟันหรือไม่ โดยใช้เค

ไฟล์เบอร์ 10 สํารวจคลองรากฟันลงไปด้านข้างระหว่างกัตตาเปอร์ชา กับผนังคลองรากฟันจนถึงความยาวทำงาน การใช้ไฟล์ตัวเล็กจะช่วยลดโอกาสตันกัตตาเปอร์ชาออกไปนอกปลายรากฟัน และจะทำให้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทำงานครบวงจร

ผลการทดลองพบว่าเครื่องไทรออดโตซีเอกซ์ทูและโกลด์เรซิพรอกมีค่าเฉลี่ยความยาวทำงานระหว่างการรื้อกัตตาเปอร์ชามากกว่าค่าเฉลี่ยความยาวจริงทั้งตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ โดยผลต่างความยาวทำงานที่วัดจากเครื่องกับความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์ อยู่ในช่วง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 30 และที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ อยู่ในช่วง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 31 โดยที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเฉลี่ยผลต่างกับความยาวจริงมากกว่าตำแหน่ง 1 บาร์ ดังนั้นตำแหน่ง 0.5 บาร์ มีแนวโน้มวัดความยาวได้เกินความยาวจริง สอดคล้องกับการศึกษาของ Uzun และคณะ (51) เมื่อใช้เครื่องไทรออดโตซีเอกซ์ทูที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ พบค่าความยาวในการทำงานมีค่ามากกว่าความยาวจริงโดยผลต่างความยาวอยู่ในช่วง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการวัดความยาวทำงานด้วยเครื่องวัดไฟฟ้าในระหว่างการรักษาคคลองรากฟันข้ามโอกาสเกินปลายรากฟันได้สูงกว่าปกติ และมีความแม่นยำลดลงมากกว่าการรักษาคคลองรากฟันครั้งแรกทั้งในเครื่องไทรออดโตซีเอกซ์ทู (47, 48, 69) และโกลด์เรซิพรอก (49, 50) เนื่องจากกัตตาเปอร์ชาและซิลเลอร์ที่ขัดขวางอยู่ภายในคลองรากฟัน ทำให้วงจรไฟฟ้าไม่ทำงาน ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลง (low conductivity) ส่งเสริมให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มสูงขึ้น (increase impedance) และปลายเครื่องมือต้องผ่านกัตตาเปอร์ชาออกไปก่อนเครื่องวัดถึงจะอ่านค่าได้ (22) การทดลองครั้งนี้ถึงแม้จะเลือกใช้ตำแหน่ง 1 บาร์ที่สั้นกว่าปกติแต่ค่าเฉลี่ยความยาวทำงานยังมากกว่าความยาวจริง อาจเป็นเพราะเครื่องวัดทั้ง 2 ชนิดใช้โหมดวัดความยาวและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกัน ความเร็วมอเตอร์ที่อยู่ภายในเครื่องไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งที่ตั้งค่าและประมวลผลได้ทันที เมื่อไฟล์หยุดและหมุนย้อนกลับก็พบว่าเลยตำแหน่งที่ตั้งค่ามาแล้ว ไฟล์จึงมีโอกาสเคลื่อนที่เกินออกไปนอกปลายรากฟันได้มากกว่าปกติ

ในระหว่างทำการทดลองพบว่ามีความเครียดที่ปลายไฟล์เนื่องจาก Mtwo Retreatment files มีมุมเกลียวคงที่ (constant helical angle) เพิ่มโอกาสที่เครื่องมือจะถูกดึงลงไปในคลองรากฟัน ขณะที่หมุนตัดวัสดุคลองรากฟัน ทำให้กัตตาเปอร์ชาสะสมบนด้ามไฟล์และลดประสิทธิภาพการตัดได้ ผู้ทำการทดลองต้องออกแรงกดไฟล์เล็กน้อยเพื่อให้ไฟล์เคลื่อนผ่านกัตตาเปอร์ชาไปได้ เกิดการทำลายเนื้อฟันบริเวณปลายรากฟันและมีโอกาสตันไฟล์เกินออกไปนอกปลายรากฟัน รวมทั้งเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความยาวที่แท้จริง สอดคล้องกับการศึกษาของ Cardoso และคณะ (125) พบว่าทุกขั้นตอนการรักษาคคลองรากฟัน ได้แก่ ก่อนขยายคลองรากฟัน หลังขยายคลองราก

พื้นส่วนต้น หลังขยายคลองรากฟันส่วนกลางและส่วนปลาย และหลังขยายคลองรากฟันซ้ำ ทำให้ความยาวจริงสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การศึกษาที่ผ่านมายังพบว่าการใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าใหม่วัดความยาวและขยายคลองรากฟันไปพร้อมกันที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ มีแนวโน้มวัดความยาวทำงานเกินความยาวจริง (50, 106, 126, 127) แม้ในการรักษาคคลองรากฟันครั้งแรกก็ตาม ดังนั้นการทำงานของเครื่องวัดใหม่ดังกล่าวจะต้องมีความระมัดระวังในการใช้งาน โดยเฉพาะในระหว่างการรักษาคคลองรากฟันซ้ำ และควรพิจารณาไปใช้ตำแหน่งทำงานที่สั้นลงกว่าปกติ

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มระหว่างความยาวทำงานที่วัดด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซท์กับความยาวจริงที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเท่ากับ 0.876 และในเครื่องโกลด์เรซิพรอก มีค่าเท่ากับ 0.897 ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเข้าใกล้ 1 ถือว่าความยาวทำงานที่วัดจากเครื่องทั้ง 2 ชนิดกับความยาวจริงมีความสอดคล้องในระดับที่ดี (Good reliability) ส่วนที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเท่ากับ 0.670 ในเครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ และ 0.692 ในเครื่องโกลด์เรซิพรอก ถือว่าความยาวทำงานที่วัดจากเครื่องทั้ง 2 ชนิดกับความยาวจริงมีความสอดคล้องในระดับพอใช้ และเมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าเครื่องไทรออดโตซีเอกซท์และเครื่องโกลด์เรซิพรอกวัดความยาวได้สอดคล้องกับความยาวจริงอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 ตำแหน่ง อย่างไรก็ตามจำนวนรากฟันที่นำมาศึกษาครั้งนี้ยังมีไม่มากพอและคลองรากฟันมีความยาวที่ใกล้เคียงกัน จึงควรเลือกฟันที่มีความยาวคลองรากฟันที่หลากหลายเพื่อให้เห็นความแตกต่างมากขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าทั้ง 2 ตำแหน่งมีความสอดคล้องกับความยาวจริงโดยที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องมากที่สุด และความสอดคล้องของการวัดความยาวทำงานด้วยเครื่องวัดไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

การกระจายตัวของข้อมูลในเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดพบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าเฉลี่ยความต่างมากกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ โดยเท่ากับ 0.59 มิลลิเมตรในเครื่องไทรออดโตซีเอกซท์ และ 0.66 ในเครื่องโกลด์เรซิพรอก ส่วนที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าเท่ากับ 0.29 มิลลิเมตร ส่งผลให้ข้อมูลที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีค่าขอบล่างและขอบบนของความเชื่อมั่น 95% สูงกว่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ สอดคล้องกับค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มที่แสดงว่าตำแหน่ง 0.5 บาร์มีความสอดคล้องปานกลาง ในขณะที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีความสอดคล้องสูง ส่วนการศึกษาที่ผ่านมาของ Mancini และคณะ (23) พบว่าหลังวิธีวัดจุดคลองรากฟันมีค่าเฉลี่ยความยาวทำงานมากกว่าค่าเฉลี่ยความยาวจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การทดลองดังกล่าวใช้กับเครื่องรูทซีเอกซท์ที่ตำแหน่งเอเพ็กซ์และใช้จุดอ้างอิงที่ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟัน อย่างไรก็ตามข้อมูลส่วนใหญ่ถึงแม้จะกระจายตัวอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95% แต่จากกราฟ Bland-Altman Plot

พบว่าเครื่องโกลด์เรซิพรอกข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างมีรูปแบบโดยเมื่อค่าเฉลี่ยความยาวรากฟันสูงขึ้น ค่าผลต่างความยาวรากฟันจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งตำแหน่ง 1 บาร์ จากภาพประกอบ 34 และตำแหน่ง 0.5 บาร์ จากภาพประกอบ 35 เป็นไปได้ว่าเครื่องโกลด์เรซิพรอกใช้โหมด Auto Apical Stop (AAS) ปลายไฟล์จะหยุดหมุนอัตโนมัติก็ต่อเมื่อเกินออกไปนอกปลายรากฟันเท่านั้น และผู้ทำการทดลองต้องใช้แป้นเหยียบบังคับในการหยุดหมุนเมื่อถึงตำแหน่งที่ตั้งค่าไว้ ความเร็วในการตรวจจับของเครื่องอาจไม่สัมพันธ์กับแป้นหมุนที่ใช้บังคับ ทำให้ลำบากต่อการวัดและการอ่านค่าเกิดความผิดพลาดได้มากกว่า ขณะที่เครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทูมีโหมด AAS เหมือนกัน แต่ปลายไฟล์สามารถหยุดหมุนอัตโนมัติเมื่อถึงตำแหน่งความยาวที่ตั้งค่าไว้โดยไม่ต้องใช้แป้นเหยียบบังคับ ดังนั้นเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทูมีความเหมาะสมในการวัดความยาวทำงานมากกว่าเครื่องโกลด์เรซิพรอกในการทดลองครั้งนี้

เมื่อทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าชนิดไทรออโตซีเอกซ์ทู และโกลด์เรซิพรอก โดยใช้เกณฑ์การยอมรับที่ ± 0.5 มิลลิเมตร และ ± 1 มิลลิเมตรที่ พบว่าเครื่องทั้ง 2 ชนิดให้ความแม่นยำตรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งที่ตำแหน่ง 1 บาร์ จากตาราง 4 และตำแหน่ง 0.5 บาร์ จากตาราง 5 อาจเป็นเพราะการทำงานของเครื่องวัดความยาวรากฟันทั้ง 2 ชนิด ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ความถี่ในการวัดเหมือนกัน คือ 8 และ 0.4 กิโลเฮิร์ตซ์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Wrbas และคณะ (66) พบว่าเรย์เพกซ์ 5 ซึ่งเป็นระบบวัดความยาวในเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทู มีความแม่นยำในการวัดความยาวทำงานภายในระยะ ± 0.5 มิลลิเมตร จากจุดคอดปลายรากฟันไม่แตกต่างกันกับเครื่องรูทีเอกซ์ซึ่งเป็นระบบวัดความยาวในเครื่องโกลด์เรซิพรอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และถึงแม้ความแม่นยำตรงของเครื่องทั้ง 2 ชนิดจะไม่มี ความแตกต่างกันทั้งในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตร และ ± 1 มิลลิเมตร แต่พบว่าการอ่านค่าที่ตำแหน่ง 1 บาร์ มีความแม่นยำตรงกว่าการอ่านค่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ คือวัดได้ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรเท่ากับ ร้อยละ 100 ในเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทู ร้อยละ 96.67 ในโกลด์เรซิพรอก ที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ ร้อยละ 23.33 ในเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ทู ร้อยละ 16.67 ในเครื่องโกลด์เรซิพรอก ที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์ ส่วนการศึกษาที่ผ่านมาักทำการทดสอบความแม่นยำในเครื่องไทรออโตซีเอกซ์ในการรักษาคลองรากฟันซ้ำที่ตำแหน่งเอเพกซ์ (24, 71) และ 0.5 บาร์ (51) และแม้แต่การใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าชนิดเดียวกันก็ไม่ได้หมายความว่ามีความแม่นยำเท่ากัน โดยการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์มีความแม่นยำน้อยกว่าการศึกษาที่ผ่านมา (51) เนื่องจากการศึกษาดังกล่าวมีการใช้ตัวทำละลาย (solvent) เพื่อกำจัดกตตะเปอรซาก่อนที่จะวัดความยาว การใช้ความยาวก่อนการขยายคลองรากฟันมาเป็นความยาวจริง และการใช้ไฟล์คนละระบบทำให้

ประสิทธิภาพในการรื้อกัตตาเปอร์ชาไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความยาวที่วัดได้จากเครื่องหลังรักษาคลองรากฟันดูสั้นและใกล้เคียงกับความยาวจริงมากกว่าการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นข้อมูลในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ตำแหน่งหน้าจอบนเครื่องให้สั้นลงที่ตำแหน่ง 1 บาร์ในการรักษาคลองรากฟันต่อไป

ตัวทำละลายมีความสามารถในการละลายกัตตาเปอร์ชา ทำให้นิ่มและอ่อนตัว และสามารถสอดไฟล์มือแทรกผ่านระหว่างกัตตาเปอร์ชากับผนังคลองรากฟันได้ง่ายขึ้นโดยเฉพาะคลองรากฟันที่อุดได้แน่น ในการทดลองครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า 2 ชนิด และพบว่าการใช้ตัวทำละลายส่งผลให้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าเกิดความแปรปรวน (107) โดยมีบางการศึกษาพบว่าทำให้ความยาวทำงานสั้นลงกว่าความยาวจริง (29, 34, 35) ขณะที่บางการศึกษาพบว่าไม่ส่งต่อเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้า (97, 128) อาจเป็นเพราะตัวทำละลายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้การศึกษามีความขัดแย้งกัน อย่างไรก็ตามผู้ทำการทดลองต้องการควบคุมปัจจัยภายนอกเพื่อไม่ให้ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดโดยไม่ได้สนใจประเด็นการกำจัดกัตตาเปอร์ชา และเห็นว่าการใช้ตัวทำละลายหรือการใช้ในปริมาณมากจะไปทำให้กัตตาเปอร์ชาที่อ่อนตัวและซีลเลอร์เข้าไปติดบนผนังคลองรากฟันและอุดตันภายในท่อเนื้อฟันมากขึ้น (129) ยิ่งเพิ่มความยากต่อการรื้อและใช้เวลานานขึ้น (130) ดังนั้นจึงไม่เลือกใช้ตัวทำละลายซึ่งแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา (23-25, 29, 51, 71)

การศึกษานี้ใช้คลองรากฟันที่มีลักษณะตรงจึงอาศัยแรงทางกลจากไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมสำหรับรื้อวัสดุอุดคลองรากฟันค่อยๆรื้อกัตตาเปอร์ชาจนถึงความยาวทำงาน โดยหวังให้กัตตาเปอร์ชาหมุนตัวตามเกลียวของไฟล์ออกมาทั้งชิ้น เพราะการใช้ไฟล์มือร่วมกับตัวทำละลายมีโอกาสตัดกัตตาเปอร์ชาออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยและมีโอกาสผลึกเศษกัตตาเปอร์ชาออกนอกปลายรากฟัน โดยมีการศึกษาพบว่าการรักษาคลองรากฟันที่ตรงมีโอกาสลดปริมาณเศษที่ถูกลักออก (apical debris extrusion) มากกว่าคลองรากฟันที่โค้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในการรักษาคลองรากฟันครั้งแรก (131) และในกรณีรักษาคลองรากฟันซ้ำ (132) รวมทั้งในคลองรากฟันที่ถูกขยายด้วยไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมมากกว่าไฟล์มือ (133, 134) และการผลักกัตตาเปอร์ชาออกนอกปลายรากฟันในระหว่างทำการรักษาคลองรากฟันซ้ำส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน ทำให้มีการกระตุ้นกระบวนการอักเสบและเกิดความเจ็บปวดหลังรักษาได้ (135) ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีที่รื้อที่ไฟล์เพียงอย่างเดียวในขณะรื้อและวัดความยาวทำงานไปพร้อมกันคล้ายการศึกษาที่ผ่านมาของ Chhabra และคณะ (45) และ Pandey และคณะ (46)

การกำหนดความผิดพลาดเป็นช่วงความคลาดเคลื่อน ± 0.5 มิลลิเมตร (เกณฑ์ที่ยอมรับแบบเข็มงวด) และ ± 1 มิลลิเมตร (เกณฑ์ที่ยอมรับแบบไม่เข้มงวด) ไม่ได้หมายถึงเป็นตำแหน่งเดียวกันกับความยาวจริง แต่เป็นตำแหน่งความยาวที่ไฟล์ยังคงอยู่ภายในคลองรากฟันและอยู่ในช่วงความยาวที่ยอมรับได้ทางคลินิก เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟล์เกินออกไปนอกรูปลายรากฟันและทำลายเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งมีผลทำให้อัตราการอยู่รอดในฟันที่รักษาคคลองรากฟันต่ำลง (3, 32, 33) นอกจากนี้รูปลายรากฟันเป็นบริเวณที่มีความแปรปรวนและมีรูปร่างที่หลากหลาย คลองรากฟันไม่ได้มีจุดสิ้นสุดที่จุดเดียวกันแต่อาจบิดเบี้ยวไปที่ตำแหน่งอื่น (136) และจุดคอดปลายรากฟันอาจไม่ปรากฏให้เห็นในทุกคลองราก รวมทั้งไม่มีเส้นแบ่งเขตที่ชัดเจนและแน่นอน ส่วนการใช้ตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันพบว่าเป็นเรื่องยากที่จะเห็นตำแหน่งปลายไฟล์อยู่สิ้นสุดที่ขอบบนสุดของรูเปิดปลายรากฟันแม้จะมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูงก็ตาม การศึกษานี้จึงกำหนดช่วงค่าความคลาดเคลื่อนที่ ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตร เป็นช่วงที่ยอมรับได้ในทางคลินิก สอดคล้องกับหลายการศึกษาที่ผ่านมา (25-29, 47, 65)

การใช้เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าโหมดวัดความยาวคลองรากฟันและเตรียมคลองรากฟันไปพร้อมกัน มีส่วนช่วยให้การรักษาคคลองรากฟันซ้ำมีความสะดวก รวดเร็ว ไม่จำเป็นต้องกำกัดกัตตาเปอร์ชาออกทั้งหมดก่อนวัดความยาวทำงานเหมือนเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั่วไป ลดความถี่ในการถ่ายภาพรังสี และลดความคลุมเครือจากกัตตาเปอร์ชาที่บดบังปลายรากฟัน เนื่องจากกัตตาเปอร์ชาเป็นตัวที่รังสีทำให้ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนของเครื่องมือเมื่อเกิดการซ้อนทับกัน และอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดความยาว (24) นอกจากนี้กรณีที่ผ่านมาการรักษาคลองรากฟันครั้งแรกโดยมีการสูญเสียเนื้อฟันเป็นจำนวนมากหรือผ่านการกรอฟันเพื่อบูรณะด้วยครอบฟันจะมีจุดอ้างอิงไม่ชัดเจน มีโอกาสขยายคลองรากฟันเกินออกไปนอกปลายรากฟัน การใช้เครื่องวัดดังกล่าวจะช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทำให้การทำงานมีความง่ายขึ้น และทันตแพทย์มีความมั่นใจได้ว่าเครื่องมือไม่ได้ขยายเกินออกไปนอกปลายรากฟัน

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการวัดความยาวด้วยเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าในระหว่างรักษาคคลองรากฟันซ้ำพบว่า

1. เครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่ง (1 บาร์และ 0.5 บาร์) มีค่าเฉลี่ยความยาวทำงานมากกว่าความยาวจริง โดยตำแหน่ง 1 บาร์อยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.00 มิลลิเมตร ถึง 0.50 มิลลิเมตร และตำแหน่ง 0.5 บาร์อยู่ในช่วงผลต่างระหว่าง 0.51 มิลลิเมตร ถึง 1.00 มิลลิเมตรจากความยาวจริงมากที่สุด

2. ตำแหน่ง 1 บาร์และ 0.5 บาร์ในเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด มีความสอดคล้องกับความยาวจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) แต่ที่ตำแหน่ง 1 บาร์มีค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ภายในกลุ่มระดับที่สูงโดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างความยาวทำงานกับความยาวจริงน้อยกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 บาร์

3. ความแม่นยำของเครื่องวัดความยาวรากฟันด้วยไฟฟ้าไทรออดโตซีเอกซทูและโกลด์เรซิพรอกไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > .05$) ทั้งในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรและ ± 1 มิลลิเมตร

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาดังกล่าวทำในห้องปฏิบัติการ อาจไม่ได้เลียนแบบสภาวะจริงทางคลินิก เช่น สภาวะเนื้อเยื่อภายในคลองรากฟัน การสูญเสียจุดยึดปลายรากฟัน การละลายของปลายรากฟัน อาจส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดความยาวคลองรากฟันด้วยไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้จำลองสภาวะดังกล่าว รวมทั้งระบบไฟล์ที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลต่อความสอดคล้องและความแม่นยำในระหว่างการรักษาด้วยเครื่องวัดและขยายคลองรากฟันครั้งนี้หรือไม่ ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

การศึกษานี้พบว่า การอ่านค่าบนหน้าจอที่ตำแหน่ง 1 บาร์ในการรักษาคคลองรากฟันซ้ำ ทำให้ความยาวทำงานเกินความยาวจริงถึงแม้จะอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ทางคลินิก การศึกษาครั้งต่อไปอาจเลือกใช้ตำแหน่งที่สั้นขึ้นกว่าเดิมเพื่อให้ความยาวยังคงอยู่ภายในคลองรากฟัน ลดโอกาสขยายเกินออกไปนอกปลายรากฟันซึ่งจะส่งผลให้อัตราความสำเร็จเพิ่มสูงขึ้น

บรรณานุกรม

1. Siqueira JF, Jr., Rôças IN. Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. J Endod. 2008;34(11):1291-301.e3.
2. Smith CS, Setchell DJ, Harty FJ. Factors influencing the success of conventional root canal therapy--a five-year retrospective study. Int Endod J. 1993;26(6):321-33.
3. Sjogren U, Hagglund B, Sundqvist G, Wing K. Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. J Endod. 1990;16(10):498-504.
4. Chugal NM, Clive JM, Spångberg LS. Endodontic infection: some biologic and treatment factors associated with outcome. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2003;96(1):81-90.
5. Kuttler Y. Microscopic investigation of root apexes. J Am Dent Assoc. 1955;50(5):544-52.
6. Ricucci D, Langeland K. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study. Int Endod J. 1998;31(6):394-409.
7. Nguyen HQ, Kaufman AY, Komorowski RC, Friedman S. Electronic length measurement using small and large files in enlarged canals. Int Endod J. 1996;29(6):359-64.
8. McDonald NJ. The electronic determination of working length. Dent Clin North Am. 1992;36(2):293-307.
9. Kobayashi C, Suda H. New electronic canal measuring device based on the ratio method. J Endod. 1994;20(3):111-4.
10. Pagavino G, Pace R, Baccetti T. A SEM study of in vivo accuracy of the Root ZX electronic apex locator. J Endod. 1998;24(6):438-41.
11. Meares WA, Steiman HR. The influence of sodium hypochlorite irrigation on the accuracy of the Root ZX electronic apex locator. J Endod. 2002;28(8):595-8.
12. Welk AR, Baumgartner JC, Marshall JG. An in vivo comparison of two frequency-based electronic apex locators. J Endod. 2003;29(8):497-500.
13. Shabahang S, Goon WW, Gluskin AH. An in vivo evaluation of Root ZX electronic

apex locator. *J Endod.* 1996;22(11):616-8.

14. Meredith N, Gulabivala K. Electrical impedance measurements of root canal length. *Endod Dent Traumatol.* 1997;13(3):126-31.

15. Huang L. An experimental study of the principle of electronic root canal measurement. *J Endod.* 1987;13(2):60-4.

16. Ibarrola JL, Chapman BL, Howard JH, Knowles KI, Ludlow MO. Effect of preflaring on Root ZX apex locators. *J Endod.* 1999;25(9):625-6.

17. Goldberg F, De Silvio AC, Manfré S, Nastri N. In vitro measurement accuracy of an electronic apex locator in teeth with simulated apical root resorption. *J Endod.* 2002;28(6):461-3.

18. Dunlap CA, Remeikis NA, BeGole EA, Rauschenberger CR. An in vivo evaluation of an electronic apex locator that uses the ratio method in vital and necrotic canals. *J Endod.* 1998;24(1):48-50.

19. Jenkins JA, Walker WA, 3rd, Schindler WG, Flores CM. An in vitro evaluation of the accuracy of the root ZX in the presence of various irrigants. *J Endod.* 2001;27(3):209-11.

20. Thomas AS, Hartwell GR, Moon PC. The accuracy of the Root ZX electronic apex locator using stainless-steel and nickel-titanium files. *J Endod.* 2003;29(10):662-3.

21. Ounsi HF, Naaman A. In vitro evaluation of the reliability of the Root ZX electronic apex locator. *Int Endod J.* 1999;32(2):120-3.

22. Al-bulushi A, Levinkind M, Flanagan M, Ng YL, Gulabivala K. Effect of canal preparation and residual root filling material on root impedance. *Int Endod J.* 2008;41(10):892-904.

23. Mancini M, Palopoli P, Iorio L, Conte G, Cianconi L. Accuracy of an electronic apex locator in the retreatment of teeth obturated with plastic or cross-linked gutta-percha carrier-based materials: an ex vivo study. *J Endod.* 2014;40(12):2061-5.

24. Alves AM, Felipe MC, Felipe WT, Rocha MJ. Ex vivo evaluation of the capacity of the Tri Auto ZX to locate the apical foramen during root canal retreatment. *Int Endod J.* 2005;38(10):718-24.

25. Goldberg F, Marroquín BB, Frajlich S, Dreyer C. In vitro evaluation of the ability of

three apex locators to determine the working length during retreatment. *J Endod.* 2005;31(9):676-8.

26. Tufenkci P, Kalaycı A. Evaluation of the accuracy of different apex locators in determining the working length during root canal retreatment. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.* 2020;14(2):125-9.

27. Aggarwal V, Singla M, Kabi D. An in vitro evaluation of performance of two electronic root canal length measurement devices during retreatment of different obturating materials. *J Endod.* 2010;36(9):1526-30.

28. Cimilli H, Aydemir S, Arican B, Mumcu G, Chandler N, Kartal N. Accuracy of the Dentaport ZX apex locator for working length determination when retreating molar root canals. *Aust Endod J.* 2014;40(1):2-5.

29. Ebrahim AK, Wadachi R, Suda H. In vitro evaluation of the accuracy of five different electronic apex locators for determining the working length of endodontically retreated teeth. *Aust Endod J.* 2007;33(1):7-12.

30. Rivera EM, Seraji MK. Effect of recapitulation on accuracy of electronically determined canal length. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1993;76(2):225-30.

31. Uzunoglu E, Eymirli A, Uyanik M, Çalt S, Nagas E. Calcium hydroxide dressing residues after different removal techniques affect the accuracy of Root-ZX apex locator. *Restor Dent Endod.* 2015;40(1):44-9.

32. Bergenholtz G, Lekholm U, Milthorpe R, Engstrom B. Influence of apical overinstrumentation and overfilling on re-treated root canals. *J Endod.* 1979;5(10):310-4.

33. Ng YL, Mann V, Gulabivala K. Outcome of secondary root canal treatment: a systematic review of the literature. *Int Endod J.* 2008;41(12):1026-46.

34. Er O, Uzun O, Ustun Y, Canakci BC, Yalpi F. Effect of solvents on the accuracy of the Mini Root ZX apex locator. *Int Endod J.* 2013;46(11):1088-95.

35. Ustun Y, Uzun O, Er O, Maden M, Yalpi F, Canakci BC. Effects of dissolving solutions on the accuracy of an electronic apex locator-integrated endodontic handpiece. *ScientificWorldJournal.* 2013;2013:475178.

36. Hülsmann M, Stotz S. Efficacy, cleaning ability and safety of different devices for

gutta-percha removal in root canal retreatment. *Int Endod J.* 1997;30(4):227-33.

37. Betti LV, Bramante CM. Quantec SC rotary instruments versus hand files for gutta-percha removal in root canal retreatment. *Int Endod J.* 2001;34(7):514-9.

38. Hülsmann M, Bluhm V. Efficacy, cleaning ability and safety of different rotary NiTi instruments in root canal retreatment. *Int Endod J.* 2004;37(7):468-76.

39. Schirrmeister JF, Wrbas KT, Meyer KM, Altenburger MJ, Hellwig E. Efficacy of different rotary instruments for gutta-percha removal in root canal retreatment. *J Endod.* 2006;32(5):469-72.

40. Fenoul G, Meless GD, Pérez F. The efficacy of R-Endo rotary NiTi and stainless-steel hand instruments to remove gutta-percha and Resilon. *Int Endod J.* 2010;43(2):135-41.

41. Schirrmeister JF, Wrbas KT, Schneider FH, Altenburger MJ, Hellwig E. Effectiveness of a hand file and three nickel-titanium rotary instruments for removing gutta-percha in curved root canals during retreatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2006;101(4):542-7.

42. Marfisi K, Mercade M, Plotino G, Duran-Sindreu F, Bueno R, Roig M. Efficacy of three different rotary files to remove gutta-percha and Resilon from root canals. *Int Endod J.* 2010;43(11):1022-8.

43. Akhavan H, Azdadi YK, Azimi S, Dadresanfar B, Ahmadi A. Comparing the Efficacy of Mtwo and D-RaCe Retreatment Systems in Removing Residual Gutta-Percha and Sealer in the Root Canal. *Iran Endod J.* 2012;7(3):122-6.

44. Madhu K, Karade P, Chopade R, Jadhav Y, Chodankar K, Alane U. CBCT Evaluation of Gutta-Percha Removal Using Protaper and Mtwo Retreatment Files, Wave One, and Hedstrom Files: An Ex Vivo Study. *Front Dent.* 2021;18:19.

45. Chhabra A, Bhatia R, Garg N, Sharma S, Dogra A, Jhamb A. Accuracy of two different apex locators for working length determination during root canal retreatment of mandibular molars using two different retreatment files: An in vitro study. *Endodontology.* 2017;29:125.

46. Pandey S GM, Kolhe S, Aher G. Evaluation of accuracy of two different apex

locators for determining the working length during root canal retreatment with two different file systems: an in vitro study 2020 [Available from: Retrieved from

[https://www.worldwidejournals.com/indian-journal-of-applied-research-\(IJAR\)/fileview/evaluation-of-accuracy-of-two-different-apex-locators-for-determining-the-working-length-during-root-canal-retreatment-with-two-different-file-systems-an-in-vitro-study_March_2020_1582965496_4507090.pdf](https://www.worldwidejournals.com/indian-journal-of-applied-research-(IJAR)/fileview/evaluation-of-accuracy-of-two-different-apex-locators-for-determining-the-working-length-during-root-canal-retreatment-with-two-different-file-systems-an-in-vitro-study_March_2020_1582965496_4507090.pdf).

47. Erdemir A, Eldeniz AU, Ari H, Belli S, Esener T. The influence of irrigating solutions on the accuracy of the electronic apex locator facility in the Tri Auto ZX handpiece. *Int Endod J*. 2007;40(5):391-7.
48. Grimberg F, Banegas G, Chiacchio L, Zmener O. In vivo determination of root canal length: a preliminary report using the Tri Auto ZX apex-locating handpiece. *Int Endod J*. 2002;35(7):590-3.
49. Wigler R, Huber R, Lin S, Kaufman AY. Accuracy and reliability of working length determination by Gold Reciproc Motor in reciprocating movement. *J Endod*. 2014;40(5):694-7.
50. Christofzik DW, Bartols A, Khaled M, Größner-Schreiber B, Dörfer CE. The accuracy of the auto-stop function of different endodontic devices in detecting the apical constriction. *BMC Oral Health*. 2017;17(1):141.
51. Uzun O, Topuz O, Tinaz C, Nekoofar MH, Dummer PM. Accuracy of two root canal length measurement devices integrated into rotary endodontic motors when removing gutta-percha from root-filled teeth. *Int Endod J*. 2008;41(9):725-32.
52. Nair PN, Sjögren U, Krey G, Kahnberg KE, Sundqvist G. Intraradicular bacteria and fungi in root-filled, asymptomatic human teeth with therapy-resistant periapical lesions: a long-term light and electron microscopic follow-up study. *J Endod*. 1990;16(12):580-8.
53. Lin LM, Skribner JE, Gaengler P. Factors associated with endodontic treatment failures. *J Endod*. 1992;18(12):625-7.
54. Slowey RR. Radiographic aids in the detection of extra root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1974;37(5):762-72.
55. Kvist T, Reit C. Results of endodontic retreatment: a randomized clinical study

- comparing surgical and nonsurgical procedures. *J Endod.* 1999;25(12):814-7.
56. Suzuki K. Experimental study on iontophoresis. *Jpn J Stomatology.* 1942;16:411-29.
 57. Sunada I. New Method for Measuring the Length of the Root Canal. *J Dent Res.* 1962;41(2):375-87.
 58. Hasegawa K, Iizuka H, Takei M, Goto N, Nihei M, Ohashi M. A new method and apparatus for measuring root canal length. *J Nihon Univ Sch Dent.* 1986;28(2):117-28.
 59. Ushiyama J. New principle and method for measuring the root canal length. *J Endod.* 1983;9(3):97-104.
 60. Nekoofar MH, Ghandi MM, Hayes SJ, Dummer PM. The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. *Int Endod J.* 2006;39(8):595-609.
 61. Khadse A, Shenoi P, Kokane V, Khode R, Sonarkar S, Lecturer S, et al. Electronic Apex Locators-An overview. 2017;2:35-40.
 62. Shirazi Z, Al-Jadaa A, Saleh ar. Electronic Apex Locators and Their Implications in Contemporary Clinical Practice: A Review. *The Open Dentistry Journal.* 2023;16.
 63. Certosimo FJ, Milos MF, Walker T. Endodontic working length determination--where does it end? *Gen Dent.* 1999;47(3):281-6; quiz 7-8.
 64. Kobayashi C. Electronic canal length measurement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1995;79(2):226-31.
 65. Maghaireh G, Omari A, Javanmardi S, Zeinalddin M. Accuracy of Two Different Electronic Apex Locators in Treatment and Re-Treatment Cases: An Ex-Vivo Study. 2020;4.
 66. Wrbas KT, Ziegler AA, Altenburger MJ, Schirrmeister JF. In vivo comparison of working length determination with two electronic apex locators. *Int Endod J.* 2007;40(2):133-8.
 67. Gomes S, Oliver R, Macouzet C, Mercadé M, Roig M, Duran-Sindreu F. In vivo evaluation of the Raypex 5 by using different irrigants. *J Endod.* 2012;38(8):1075-7.
 68. Stöber EK, de Ribot J, Mercadé M, Vera J, Bueno R, Roig M, et al. Evaluation of the Raypex 5 and the Mini Apex Locator: an in vivo study. *J Endod.* 2011;37(10):1349-52.

69. Duh B-R. In vitro evaluation of the accuracy of Root ZX series electronic apex locators. *J Dent Sci.* 2009;4(2):75-80.
70. Grimberg F, Banegas G, Chiacchio L, Zmener O. In vivo determination of root canal length: a preliminary report using the Tri Auto ZX apex-locating handpiece. *Int Endod J.* 2002;35(7):590-3.
71. Uzun O, Topuz O, Tinaz AC, Alaçam T. Apical accuracy of two apex-locating handpieces in root canal retreatments of root-end resected teeth. *J Endod.* 2007;33(12):1444-6.
72. Duh B-R. In vitro evaluation of the accuracy of Root ZX series electronic apex locators. *J Dent Sci.* 2009;4(2):75-80.
73. Bartols A, Robra BP, Walther W. The ability of Reciproc instruments to reach full working length without glide path preparation: a clinical retrospective study. *PeerJ.* 2017;5:e3583.
74. Plotino G, Grande NM, Porciani PF. Deformation and fracture incidence of Reciproc instruments: a clinical evaluation. *Int Endod J.* 2015;48(2):199-205.
75. Chen E, Kaing S, Mohan H, Ting SY, Wu J, Parashos P. An ex vivo comparison of electronic apex locator teaching models. *J Endod.* 2011;37(8):1147-51.
76. Lipski M, Trąbska-Świsłnicka M, Woźniak K, Dembowska E, Drożdżik A. Evaluation of alginate as a substitute for root-surrounding tissues in electronic root canal measurements. *Aust Endod J.* 2013;39(3):155-8.
77. Baldi JV, Victorino FR, Bernardes RA, de Moraes IG, Bramante CM, Garcia RB, et al. Influence of embedding media on the assessment of electronic apex locators. *J Endod.* 2007;33(4):476-9.
78. Guerreiro-Tanomaru JM, Croti HR, Silva GF, Faria G, Tanomaru-Filho M. Tooth embedding medium influences the accuracy of electronic apex locator. *Acta Odontol Latinoam.* 2012;25(2):214-7.
79. Lucena-Martín C, Robles-Gijón V, Ferrer-Luque CM, de Mondelo JM. In vitro evaluation of the accuracy of three electronic apex locators. *J Endod.* 2004;30(4):231-3.
80. AlShwaimi EO, Narayanaraopeta UB. Effect of Time on Electronic Working Length

Determination with a Novel Endodontic Module in Preclinical Endodontic Training. *Saudi J Med Med Sci* 2014;2(1):37-42.

81. Versiani MA, Santana BP, Caram CM, Pascon EA, de Souza CJ, Biffi JC. Ex vivo comparison of the accuracy of Root ZX II in detecting apical constriction using different meter's reading. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009;108(1):e41-5.
82. Nahmias Y, Aurelio JA, Gerstein H. An in vitro model for evaluation of electronic root canal length measuring devices. *J Endod*. 1987;13(5):209-14.
83. Fouad AF, Krell KV. An in vitro comparison of five root canal length measuring instruments. *J Endod*. 1989;15(12):573-7.
84. Ebrahim AK, Wadachi R, Suda H. Ex vivo evaluation of the ability of four different electronic apex locators to determine the working length in teeth with various foramen diameters. *Aust Dent J*. 2006;51(3):258-62.
85. Wolf TG, Krauß-Mironjuk A, Wierichs RJ, Briseño-Marroquín B. Influence of embedding media on the accuracy of working length determination by means of apex locator: an ex vivo study. *Sci Rep*. 2021;11(1):3340.
86. Desai N, Tegginmani V. Accuracy of Working Length Determination Using Tri Auto Zx & Protaper Instruments: An In Vitro Study. *J Dent Allied Sci*. 2012;1:48.
87. Carneiro E, Bramante CM, Picoli F, Letra A, da Silva Neto UX, Menezes R. Accuracy of root length determination using Tri Auto ZX and ProTaper instruments: an in vitro study. *J Endod*. 2006;32(2):142-4.
88. Campbell D, Friedman S, Nguyen HQ, Kaufman A, Keila S. Apical extent of rotary canal instrumentation with an apex-locating handpiece in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1998;85(3):319-24.
89. Donnelly JC. A simplified model to demonstrate the operation of electronic root canal measuring devices. *J Endod*. 1993;19(11):579-80.
90. De Moor RJ, Hommez GM, Martens LC, De Boever JG. Accuracy of four electronic apex locators: an in vitro evaluation. *Endod Dent Traumatol*. 1999;15(2):77-82.
91. Weiger R, John C, Geigle H, Löst C. An in vitro comparison of two modern apex locators. *J Endod*. 1999;25(11):765-8.

92. Siqueira JF, Jr., Lopes HP. Mechanisms of antimicrobial activity of calcium hydroxide: a critical review. *Int Endod J.* 1999;32(5):361-9.
93. Ustun Y, Uzun O, Er O, Canakci BC, Topuz O. The effect of residual calcium hydroxide on the accuracy of a contemporary electronic apex locator. *Acta Odontol Scand.* 2015;73(2):132-6.
94. Shojaee NS, Zaeri Z, Shokouhi MM, Sobhnamayan F, Adl A. Influence of calcium hydroxide residues after using different irrigants on the accuracy of two electronic apex locators: An in vitro study. *Dent Res J (Isfahan).* 2020;17(1):48-53.
95. Stabholz A, Friedman S. Endodontic retreatment--case selection and technique. Part 2: Treatment planning for retreatment. *J Endod.* 1988;14(12):607-14.
96. Bhagavaldas MC, Diwan A, Kusumvalli S, Pasha S, Devale M, Chava DC. Efficacy of two rotary retreatment systems in removing Gutta-percha and sealer during endodontic retreatment with or without solvent: A comparative in vitro study. *J Conserv Dent.* 2017;20(1):12-6.
97. Al-Hadlaq SM. Effect of chloroform, orange solvent and eucalyptol on the accuracy of four electronic apex locators. *Aust Endod J.* 2013;39(3):112-5.
98. Jain RJ, Chaudhari WA, Jadhav SK, Hegde VS, Srilatha. Effect of different endodontic solvents on the effectiveness of two electronic apex locators – An in vitro study. *Int J Sci Res.* 2012;1:128-32.
99. Herrera M, Ábalos C, Lucena C, Jiménez-Planas A, Llamas R. Critical diameter of apical foramen and of file size using the Root ZX apex locator: an in vitro study. *J Endod.* 2011;37(9):1306-9.
100. Ebrahim AK, Wadachi R, Suda H. An in vitro evaluation of the accuracy of Dentaport ZX apex locator in enlarged root canals. *Aust Dent J.* 2007;52(3):193-7.
101. Herrera M, Abalos C, Planas AJ, Llamas R. Influence of apical constriction diameter on Root ZX apex locator precision. *J Endod.* 2007;33(8):995-8.
102. Tamarut T, Kovacević M, Uhac I. Detection of a transitional ion concentration zone during electronic measurement of root canal length: a study in vitro. *Int Endod J.* 2000;33(4):374-80.

103. Thomas A, Hartwell G, Moon p. The Accuracy of the Root ZX Electronic Apex Locator Using Stainless-Steel and Nickel-Titanium Files. *J Endod.* 2003;29:662-3.
104. Sadeghi S, Abolghasemi M. The accuracy of the Raypex5 electronic apex locator using stainless-steel hand K-file versus nickel-titanium rotary Mtwo file. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2010;15(5):e788-90.
105. Gehlot PM, Manjunath V, Manjunath MK. An in vitro evaluation of the accuracy of four electronic apex locators using stainless-steel and nickel-titanium hand files. *Restor Dent Endod.* 2016;41(1):6-11.
106. Siu C, Marshall JG, Baumgartner JC. An in vivo comparison of the Root ZX II, the Apex NRG XFR, and Mini Apex Locator by using rotary nickel-titanium files. *J Endod.* 2009;35(7):962-5.
107. Kaufman AY, Keila S, Yoshpe M. Accuracy of a new apex locator: an in vitro study. *Int Endod J.* 2002;35(2):186-92.
108. Tinaz AC, Sevimli LS, Görgül G, Türköz EG. The effects of sodium hypochlorite concentrations on the accuracy of an apex locating device. *J Endod.* 2002;28(3):160-2.
109. Ebrahim AK, Yoshioka T, Kobayashi C, Suda H. The effects of file size, sodium hypochlorite and blood on the accuracy of Root ZX apex locator in enlarged root canals: an in vitro study. *Aust Dent J.* 2006;51(2):153-7.
110. Altenburger MJ, Cenik Y, Schirrmeister JF, Wrbas KT, Hellwig E. Combination of apex locator and endodontic motor for continuous length control during root canal treatment. *Int Endod J.* 2009;42(4):368-74.
111. Vieyra JP, Acosta J, Mondaca JM. Comparison of working length determination with radiographs and two electronic apex locators. *Int Endod J.* 2010;43(1):16-20.
112. Bashar AKM, Rafique T, Ghosh R, Abdullah K, Sajedeen M, Hassan GS. Clinical Accuracy of Electronic Apex Locator in Measuring Working Length during Root Canal Treatment. *Bangladesh Med Res Counc Bull.* 2018;43(3):120-5.
113. Cruz ATG, Wichnieski C, Carneiro E, da Silva Neto UX, Gambarini G, Piasecki L. Accuracy of 2 Endodontic Rotary Motors with Integrated Apex Locator. *J Endod.* 2017;43(10):1716-9.

114. Stoll R, Urban-Klein B, Roggendorf MJ, Jablonski-Momeni A, Strauch K, Frankenberger R. Effectiveness of four electronic apex locators to determine distance from the apical foramen. *Int Endod J*. 2010;43(9):808-17.
115. Thaweesit P, Sutthasing S, Jaikong N, Suksutthiphan S, Arayatrakoollikit U, Jainaen A. Accordance of Working Length in C-shaped Canal Permanent Molars Measured by an Electronic Apex Locator at 0.5 bar in a Model. *Khon Kaen Dent J*. 2018;21(1):21-9.
116. Tanasoontrarat P, Ackapolpanich T, Kong-ngoi N, phuvoravan c. A Comparison of Five Conducting Media for Length Determination of Electronic Apex Locator Using a Simulation Model. *Khon Kaen Dent J*. 2021;24(1):76-82.
117. De-Deus G, Cozer V, Souza EM, Silva E, Wigler R, Belladonna FG, et al. Micro-CT Study of the In Vivo Accuracy of a Wireless Electronic Apex Locator. *J Endod*. 2022;48(9):1152-60.
118. Connert T, Judenhofer MS, Hülber JM, Schell S, Mannheim JG, Pichler BJ, et al. Evaluation of the accuracy of nine electronic apex locators by using Micro-CT. *Int Endod J*. 2018;51(2):223-32.
119. Jung IY, Yoon BH, Lee SJ, Lee SJ. Comparison of the reliability of "0.5" and "APEX" mark measurements in two frequency-based electronic apex locators. *J Endod*. 2011;37(1):49-52.
120. Serdar CC, Cihan M, Yücel D, Serdar MA. Sample size, power and effect size revisited: simplified and practical approaches in pre-clinical, clinical and laboratory studies. *Biochem Med (Zagreb)*. 2021;31(1):010502.
121. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1984;58(5):589-99.
122. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1971;32(2):271-5.
123. Dummer PM, McGinn JH, Rees DG. The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J*. 1984;17(4):192-8.
124. Pommer O, Stamm O, Attin T. Influence of the canal contents on the electrical assisted determination of the length of root canals. *J Endod*. 2002;28(2):83-5.

125. Cardoso IV, Silveira MPC, Vitali FC, Piasecki L, da Fonseca Roberti Garcia L, Bortoluzzi EA, et al. Evaluation of changes in root canal length and accuracy of the electronic apex locator during different stages of endodontic treatment and retreatment. *Odontology*. 2024;112(2):537-45.
126. Fadel G, Piasecki L, Westphalen VP, Silva Neto UX, Fariniuk LF, Carneiro E. An in vivo evaluation of the auto apical reverse function of the Root ZX II. *Int Endod J*. 2012;45(10):950-4.
127. Felipe WT, Felipe MC, Reyes Carmona J, Crozoé FC, Alvisi BB. Ex vivo evaluation of the ability of the ROOT ZX II to locate the apical foramen and to control the apical extent of rotary canal instrumentation. *Int Endod J*. 2008;41(6):502-7.
128. Jain RJ, Chaudhari WA, Jadhav SK, Hegde VS, Srilatha. Effect of different endodontic solvents on the effectiveness of two electronic apex locators – An in vitro study. *Int J Sci Res*. 2012;1:128-32.
129. Horvath SD, Altenburger MJ, Naumann M, Wolkewitz M, Schirrmeister JF. Cleanliness of dentinal tubules following gutta-percha removal with and without solvents: a scanning electron microscopic study. *Int Endod J*. 2009;42(11):1032-8.
130. Wilcox LR, Juhlin JJ. Endodontic retreatment of Thermafil versus laterally condensed gutta-percha. *J Endod*. 1994;20(3):115-7.
131. Karataslioglu E, Arslan H, Er G, Avci E. Influence of canal curvature on the amount of apically extruded debris determined by using three-dimensional determination method. *Aust Endod J*. 2019;45(2):216-24.
132. Serefoglu B, Kandemir Demirci G, Miçoğulları Kurt S, Kaşıkçı Bilgi İ, Çalışkan MK. Impact of root canal curvature and instrument type on the amount of extruded debris during retreatment. *Restor Dent Endod*. 2021;46(1):e5.
133. Boijink D, Costa DD, Hoppe CB, Kopper PMP, Grecca FS. Apically Extruded Debris in Curved Root Canals Using the WaveOne Gold Reciprocating and Twisted File Adaptive Systems. *J Endod*. 2018;44(8):1289-92.
134. Keskin C, Sarıyılmaz E. Apically extruded debris and irrigants during root canal filling material removal using Reciproc Blue, WaveOne Gold, R-Endo and ProTaper Next

systems. J Dent Res Dent Clin Dent Prospects. 2018;12(4):272-6.

135. Santoro V, Lozito P, Donno AD, Grassi FR, Introna F. Extrusion of Endodontic Filling Materials: Medico-Legal Aspects. Two Cases. Open Dent J. 2009;3:68-73.

136. Gutierrez JH, Aguayo P. Apical foraminal openings in human teeth. Number and location. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1995;79(6):769-77.





ภาคผนวก

ตาราง 6 แสดงการอ่านค่าความยาวจริง ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 1 บาร์
และ 0.5 บาร์ในกลุ่มไมโครอโตซีเอกซ์ทู

ตัวอย่าง	ความยาวจริง (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 1 บาร์ (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 0.5 บาร์ (มม.)
1	16.433	16.495	16.903
2	17.033	17.492	17.924
3	16.100	16.303	16.703
4	17.208	17.470	17.741
5	17.046	16.959	17.281
6	16.970	16.959	17.345
7	15.935	16.325	16.556
8	17.366	17.461	17.704
9	17.515	17.837	18.057
10	17.321	17.583	17.804
11	16.954	16.943	17.439
12	16.517	17.005	17.275
13	16.861	17.275	17.770
14	16.092	16.396	16.667
15	17.583	17.905	18.300
16	16.816	16.929	17.310
17	16.017	16.475	16.619
18	17.510	17.807	18.265
19	16.928	17.325	17.639
20	16.360	16.779	16.900
21	17.367	17.716	17.985
22	15.518	15.986	16.346
23	16.500	16.923	17.188
24	16.137	16.439	16.764
25	17.156	17.481	17.807
26	16.889	17.155	17.394
27	16.688	17.177	17.307
28	15.295	15.506	15.821

ตาราง 6 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความยาวจริง (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 1 บาร์ (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 0.5 บาร์ (มม.)
29	17.015	17.369	17.558
30	17.870	18.117	18.447

ตาราง 7 แสดงการอ่านค่าความยาวจริง ความยาวไฟล์ขณะรื้อกัตตาเปอร์เซียที่ตำแหน่ง 1 บาร์ และ 0.5 บาร์ในกลุ่มโกลด์เรซิพรอก

ตัวอย่าง	ความยาวจริง (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 1 บาร์ (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 0.5 บาร์ (มม.)
1	16.206	16.430	16.720
2	16.056	16.108	16.508
3	16.559	16.541	17.168
4	16.084	15.996	16.488
5	16.624	16.510	17.088
6	15.817	15.803	16.124
7	16.362	16.722	16.854
8	16.768	16.932	17.417
9	16.771	17.152	17.550
10	16.954	17.395	17.605
11	16.480	16.788	17.329
12	17.182	17.635	17.883
13	17.043	17.523	17.703
14	16.735	17.162	17.635
15	17.168	17.500	17.748
16	17.743	17.905	18.435
17	16.497	16.763	17.314
18	17.647	17.904	18.386
19	17.308	17.880	18.000
20	16.949	17.284	17.536

ตาราง 7 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความยาวจริง (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 1 บาร์ (มม.)	ความยาวไฟล์ตำแหน่ง 0.5 บาร์ (มม.)
21	17.124	17.500	17.837
22	16.585	17.043	17.332
23	16.655	17.019	17.356
24	17.638	18.000	18.219
25	17.738	18.176	18.545
26	17.500	17.980	18.306
27	17.500	17.960	18.306
28	15.330	15.538	15.908
29	15.012	15.285	15.59
30	17.012	17.432	17.822



ประวัติผู้เขียน

