

หลักการ พัฒนาการ และการประยุกต์ใช้ทางคลินิก ของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า Electronic apex locator: Principles, Evolution, Comparative analysis, and clinical applications in Endodontics

พลาพัฒน์ พิงคำชา, ธนิตา ศรีสุวรรณ

ภาควิชาทันตกรรมบูรณะและปริทันตวิทยา คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (electronic apex locator) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยระบุความยาวในการทำงานของคลองรากฟัน โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (impedance) ภายในคลองรากฟัน เทคโนโลยีดังกล่าวได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มมีการพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการของวงจรไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1918 จนปัจจุบันมีการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหลายความถี่ ร่วมกับประมวลผลด้วยอัลกอริทึม (algorithm) บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและอธิบายข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า ในหลากหลายแง่มุม ได้แก่ หลักการทำงานและ พัฒนาการของเครื่องในแต่ละยุคสมัย ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของเครื่อง ตลอดจนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดความยาวคลองรากฟัน

คำสำคัญ: เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า, ความต้านทานไฟฟ้าอิมพีแดนซ์, การรักษาคคลองรากฟัน, ความยาวในการทำงาน

Abstract

Electronic apex locators are devices designed to determine root canal working length by measuring changes in electrical impedance within the canal. Since the initial concept based on electrical circuit principles introduced in 1918, electronic apex locators technology has advanced significantly. Contemporary devices employ multi-frequency alternating current and algorithm-based signal processing to improve accuracy. This review article aims to provide a comprehensive overview of electronic apex locators, including their working principles, generational development, factors affecting measurement accuracy, and recent technological innovations that enhance the efficacy of working length determination in endodontic procedures.

Keywords: electronic apex locator, impedance, root canal treatment, working length

Correspondence: ธนิตา ศรีสุวรรณ

ภาควิชาทันตกรรมบูรณะและปริทันตวิทยา คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์: 053-944457

Email address: tanida.srisuwan@cmu.ac.th

Received: 20 March 2025

Revised: 16 May 2025

Accepted: 30 May 2025

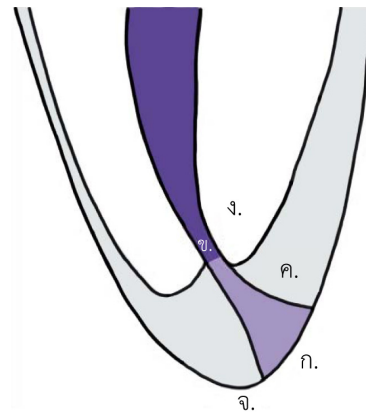
บทนำ

มีคำแนะนำว่ากระบวนการรักษาลงรากฟันนั้น ควรถูกจำกัดให้อยู่ภายในระบบคลองรากฟันเท่านั้น (1) ซึ่งการที่เราสามารถนำเครื่องมือที่ใช้ในการรักษาลงรากฟันเข้าไปในคลองรากฟันจนถึงส่วนปลายสุดของระบบคลองรากฟันได้ (achieving patency at the canal terminus) เป็นปัจจัยสำคัญที่สุด ที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการรักษาลงรากฟัน โดยพบว่าสามารถช่วยเพิ่มโอกาสสำเร็จในการรักษาได้ถึงสองเท่า อย่างมีนัยสำคัญ (2) และในทางกลับกัน การอุดคลองรากฟันสั้น หรือยาวเกินไปก็จะลดโอกาสสำเร็จของการรักษาลงได้ (3) ดังนั้นในทุกขั้นตอนของการรักษาลงรากฟันจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นเรื่องความยาวในการทำงาน (4) การวัดความยาวรากฟันจึงมีความสำคัญในการรักษาลงรากฟัน บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและอธิบายข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องมือตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (electronic apex locator) ในหลากหลายแง่มุม ได้แก่ หลักการทำงานและพัฒนาการของเครื่องในแต่ละยุคสมัย ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของอุปกรณ์ ตลอดจนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดความยาวคลองรากฟัน

1. กายวิภาคพื้นฐานของปลายรากฟัน

ในปี ค.ศ. 1955 Kuttler ได้ศึกษาเกี่ยวกับ จุดที่แคบที่สุด และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด ที่เรียกว่า “จุดแคบสุดปลายคลองรากฟัน (apical constriction)” หรือ “รูเปิดปลายรากฟันรอง (minor apical diameter)” เป็นครั้งแรก (5) ดังจุด ข. ในภาพที่ 1 ซึ่งถือเป็นจุดสิ้นสุดที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมและอุดคลองราก โดยทั่วไปจะอยู่ห่างจากรูเปิดปลายรากฟันหลัก (major apical foramen) ประมาณ 0.5–1.0 มม. (6) ทั้งยังพบว่ารูเปิดปลายรากฟันหลัก มักอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับแนวแกนกลางของรากฟันกว่า 83% (7) ดังตัวอย่างในภาพที่ 2 และพบว่าปลายรากฟันทางกายวิภาค (anatomical apex) ไม่สัมพันธ์กับปลายรากฟันทางภาพรังสี (radiographic apex) (8) โดยความยาวคลองรากฟันที่วัดได้จากภาพถ่ายรังสีมีความแตกต่างจากความยาวคลองรากฟันจริงในระดับที่มีนัยสำคัญ (9–11) โดยอาจมีสาเหตุการเกิดได้จากอายุที่เพิ่มขึ้น การเปื่อยเบนของรูเปิดปลายรากฟันหลัก

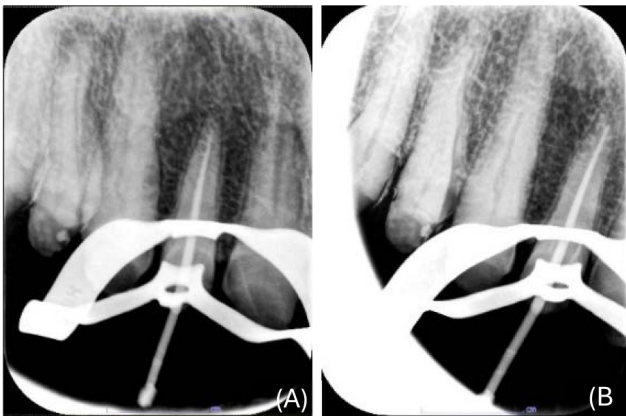
จากปลายสุดของรากฟันจะเพิ่มขึ้น (12) ดังตัวอย่างในภาพที่ 3 โดยพบว่ามักจะโค้งไปทางด้านใกล้กลาง (distal curvature) (6) หรืออาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยา โดยสาเหตุที่พบบ่อยที่สุดคือการสลายตัวของรากฟันบริเวณปลายรากจากภายนอก (external apical root resorption) (13)



ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายวิภาคในอุดมคติของปลายรากฟัน : (ก.) รูเปิดปลายรากฟันหลัก (major apical foramen), (ข.) จุดแคบสุดปลายคลองรากฟัน (apical constriction) หรือ รูเปิดปลายรากฟันรอง (minor apical foramen) (ค.) เคลือบรากฟัน (cementum), (ง.) เนื้อฟัน (dentin), (จ.) จุดปลายสุดของรากฟัน (root apex) ปรับปรุงภาพจาก Hany M. A. Ahmed, Endodontic advances and evidence-based clinical guidelines. 2022. (5)



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายปลายรากฟันที่มีลักษณะของรูเปิดปลายรากฟันหลักที่เปิดออกบริเวณด้านข้างของรากฟัน ทำให้เมื่อวัดความยาวในการทำงาน จะทำให้ได้ระยะสั้นกว่าความยาวฟันจริง



ภาพที่ 3 ภาพรังสีของผู้ป่วยชายไทยอายุ 69 ปี ในระหว่างการรักษารากฟัน (A) ปลายของวัสดุแท่งกัตาเปอร์ชาอยู่ห่างจากปลายรากฟัน 1 มิลลิเมตร (B) ภาพรังสีเปลี่ยนมุมไปทางด้านไกลกลาง (distal shift-tubed) พบปลายของวัสดุแท่งกัตาเปอร์ชาอยู่บริเวณปลายของรากฟันที่มีการเบี่ยงเบนของรูเปิดปลายรากฟันหลัก (ที่มา: คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; วันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2568)

2. พื้นฐานแนวคิดและกลไกการทำงานของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า

การวัดความยาวในการทำงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การถ่ายภาพรังสี, การใช้ความรู้สึกจากการสัมผัส, การสังเกตความขึ้นบนแท่งกระดาษ (paper point), การรับรู้ความรู้สึกของผู้ป่วยเองและการอ้างอิงจากลักษณะทางกายวิภาคของรากฟัน อย่างไรก็ตาม แต่ละวิธีมีข้อจำกัดในการระบุความยาวที่แท้จริงของคลองรากฟัน ดังนั้นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดตำแหน่งปลายรากฟันจึงถูกพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเพื่อช่วยกำหนดความยาวคลองรากฟัน (14) โดยพบว่ามีความแม่นยำในการกำหนดความยาวการทำงานกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างการถ่ายภาพรังสี (15, 16) เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้ายังช่วยลดจำนวนครั้งที่ต้องถ่ายภาพรังสี ทำให้ใช้เวลารักษาน้อยลงและสามารถระบุตำแหน่งจุดแคบสุดปลายคลองรากฟันได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่คลองรากฟันมีความซับซ้อน (16) แม้เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าจะมีความแม่นยำในการกำหนด

ความยาวการทำงานถึง 84% แต่จะเพิ่มขึ้นเป็น 96% หากใช้ร่วมกับการถ่ายภาพรังสี (17)

ในปี ค.ศ. 1918 Custer เป็นผู้เสนอแนวคิดที่ว่า ความยาวในการทำงานของคลองรากฟันสามารถประเมินได้โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของวงจรไฟฟ้า โดยพบว่าเครื่องมือสามารถตรวจจับช่วงเวลาที่ยาวขึ้นเมื่อเครื่องมือผ่านรูเปิดปลายรากฟันได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ กว่าการระบุตำแหน่งโดยอาศัยการรับรู้ของผู้ป่วยเอง (18) วงจรไฟฟ้าในการทดลองของ Custer ในยุคนั้นประกอบด้วย ถ่านไฟฉายแบบแห้ง 3 ก้อน, มิลลิแอมมิเตอร์ (milliammeter), อิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรดขั้วลบ เมื่อต่อวงจร แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกขนาดเล็กจะถูกส่งไปยังเข็มปลายแหลมที่มีฉนวนหุ้มซึ่งสอดเข้าไปในคลองรากฟัน เมื่อเข็มเข้าใกล้รูเปิดปลายรากฟัน พบว่าค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า (electrical current) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย พร้อมกับเกิดการเคลื่อนไหวของเข็มในมิลลิแอมมิเตอร์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของรูเปิดปลายรากฟันได้ (18) การศึกษาของ Suzuki ในปี ค.ศ. 1942 เกี่ยวกับ ไอออนโตโฟรีซิส (iontophoresis) ในสุนัข พบว่าความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance) ระหว่างเครื่องมือรักษารากฟันที่สอดเข้าไปในคลองรากฟันและขั้วไฟฟ้าที่วางบนเยื่อเมือกในช่องปาก (oral mucosa) มีค่าคงที่และสม่ำเสมอ (19) จากนั้น Sunada ได้นำแนวคิดนี้ไปศึกษาต่อในมนุษย์ และในปี ค.ศ. 1962 ได้รายงานว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เฉพาะเจาะจง สามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงตำแหน่งปลายสุดของคลองรากฟันได้อย่างแม่นยำ และเมื่อปลายเครื่องมือรักษารากฟันสัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์ (periodontal membrane) ผ่านรูเปิดปลายรากฟันหลัก พบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าระหว่างปลายคลองรากฟันและคลิปปหนีบริมฝีปากอยู่ที่ 6.5 k Ω และมีค่าเท่ากันหากเกิดการทะลุของผนังคลองรากฟันหรือพื้นโพรงประสาทฟันถึงเนื้อเยื่อปริทันต์ (perforation of root or pulp chamber floor) (20) โดยการที่รากฟันและคลองรากฟันสามารถแสดงสถานะของวงจรไฟฟ้าได้ เนื่องจากตัวอุปกรณ์ส่งกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องมือรักษารากฟันเข้าไปในคลองรากฟัน จากนั้นผ่านออกไปทางรูเปิดปลายรากฟันเข้าสู่เอ็นยึดปริทันต์

(periodontal ligament) แล้วไหลผ่านเยื่อเมือกในช่องปาก และวนกลับสู่อุปกรณ์ผ่านทางคลิปหนีบริมฝีปาก

Nekoofar และคณะในปี ค.ศ. 2006 ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า โดยอ้างอิงจากปรากฏการณ์ทางกายภาพของความต้านทานไฟฟ้า ดังนี้ (21) เมื่ออิเล็กตรอนอิสระไหลผ่านวัสดุ อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมเป็นระยะ ซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานบางส่วน ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกจำกัด (restriction) ยิ่งมีการชนกันบ่อย การไหลของอิเล็กตรอนก็ยิ่งถูกจำกัดมากขึ้น โดยคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนว่า "R" และมีหน่วยการวัดเป็น โอห์ม (ohms; Ω) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งเรียกว่า ความต้านทานจำเพาะ (resistivity, ρ) ค่า ρ สำหรับวัสดุแต่ละชนิดจะคงที่ที่อุณหภูมิที่กำหนด แสดงเป็นสูตรสำหรับคำนวณความต้านทานไฟฟ้า (R) ของวัตถุที่มีความยาว (l) และพื้นที่หน้าตัด (A) คือ:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

คลองรากฟันล้อมรอบด้วย เนื้อฟัน (dentine) และเคลือบรากฟัน (cementum) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนต่อกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามที่บริเวณรูเปิดปลายรากฟันรองจะมีรูเล็ก ๆ ที่เชื่อมต่อวัสดุที่นำไฟฟ้าภายในคลองรากฟันกับเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า (conductor) เมื่อปลายของเครื่องมือรักษาคคลองรากฟันที่ต่อกับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า สอดเข้าไปในคลองรากฟันและเข้าใกล้ปลายรากฟัน ความต้านทานระหว่างปลายเครื่องมือกับปลายรากฟันจะลดลง เนื่องจากความยาว (l) ของวัสดุต้านทานไฟฟ้าภายในคลองรากฟันลดลง ตามสมการที่ 1 จึงช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันรองได้ด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน

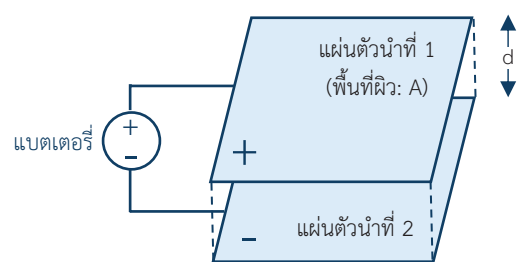
โดยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าชนิดแรก ที่คิดค้นขึ้นคือ “เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันแบบอาศัยความต้านทานไฟฟ้า (resistance-based apex locator)” ที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าตรงขนาดเล็กในวงจร แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจร ด้วยการนำค่าของแรงดันไฟฟ้า

(voltage, V) แล้วหารด้วยค่าของกระแสไฟฟ้า (current, I) ตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) (21)

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

หลักการนี้จึงเป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าทุกชนิด ที่หลังจากนี้จะถูกพัฒนาและคิดค้นหลายรุ่นออกสู่ตลาด โดยอุปกรณ์เหล่านี้ใช้หลักการเดียวกัน

แต่นอกจากคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้าแล้ว โครงสร้างของฟันยังมีลักษณะเป็น ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) อีกด้วย โดยเมื่อโครงสร้างของวัสดุนำไฟฟ้าสองชนิดที่มีฉนวนอยู่ระหว่างกลางจะกลายเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่า ตัวเก็บประจุ ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4 ตัวเก็บประจุถูกสร้างขึ้นจากแผ่นโลหะคู่ขนานสองแผ่น โดยมีวัสดุฉนวนที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (dielectric) คั่นระหว่างกลาง เมื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (DC voltage source) อิเล็กตรอน (ประจุลบ) จะเคลื่อนที่จากแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่นหนึ่ง ทำให้แผ่นหนึ่งมีประจุลบ และอีกแผ่นหนึ่งมีประจุบวก เมื่อถอดแหล่งจ่ายแรงดันไฟออก ตัวเก็บประจุยังคงเก็บประจุไว้ และแรงดันไฟฟ้าจะยังคงอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง แรงดันนี้จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณประจุที่ตัวเก็บประจุสามารถเก็บได้ ซึ่งจะกำหนดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 4 ตัวเก็บประจุแบบง่ายที่เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ (แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง - DC voltage source) (ปรับปรุงภาพจาก Nekoofar M. H และคณะ. The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. Int Endod J 2006 Vol. 39 Issue 8 Pages 595-609 (21))

โดยตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดค่าความจุไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุ ได้แก่:

1. พื้นที่ของแผ่นตัวนำ (A): พื้นที่ของแผ่นตัวนำที่ใหญ่ขึ้นทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น พื้นที่ของแผ่นตัวนำที่เล็กลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง

2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d): ความจุไฟฟ้าสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ หากแผ่นตัวนำมีระยะห่างมากขึ้น ความจุไฟฟ้าจะลดลง

3. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ): วัสดุฉนวนระหว่างแผ่นตัวนำ (dielectric) มีผลโดยตรงต่อความจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการแสดงค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) ได้ดังนี้

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (\text{สมการที่ 3})$$

เนื่องจากมีฉนวนในตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุจะบล็อกไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไม่ให้ไหลผ่าน แต่มันจะยอมให้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ไหลผ่านได้ โดยมีการต่อต้านกระแสดังกล่าวในปริมาณที่ขึ้นอยู่กับ ค่าความจุไฟฟ้าและความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ (frequency of the AC)

การต่อต้านนี้เรียกว่า “ความต้านทานเชิงความจุ” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (\text{สมการที่ 4})$$

โดยที่:

- X_C = ความต้านทานเชิงความจุ (capacitive reactance) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)
- f = ความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ (frequency of AC) มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
- C = ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด (F)
- π มีค่าประมาณ 3.14

ในสมการที่ 4 สำหรับไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีทิศทางและค่าคงที่ไม่มีการสลับ ค่าความถี่ (f) จึงมีค่าเท่ากับ 0 ทำให้ค่า X_C จึงมีค่าเป็นอนันต์ (infinite) ซึ่งหมายความว่าตัวเก็บประจุจะบล็อกไฟฟ้ากระแสไฟตรงอย่างสมบูรณ์ แต่ใน

ไฟฟ้ากระแสสลับ f ไม่เท่ากับ 0 ทำให้ X_C จะมีค่าเป็นตัวเลขที่ขึ้นอยู่กับ f และ C ในกรณีนี้ X_C มีบทบาทคล้ายกับความต้านทานของตัวต้านทาน ดังนั้นกฎของโอห์มจึงสามารถใช้ได้ในวงจรที่มีตัวเก็บประจุ (capacitive circuits) โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 5 ประกอบด้วย ความต้านทานเชิงความจุ (X_C) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω), แรงดันไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ (V) และ กระแสของไฟฟ้ากระแสสลับ (I)

$$X_C = \frac{V}{I} \quad (\text{สมการที่ 5})$$

ในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ รวมทั้งหมดเรียกว่า อิมพีแดนซ์ (impedance, Z) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) กฎของโอห์ม ยังคงสามารถใช้กับวงจรประเภทนี้ได้ ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่วงจร (V) และค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า (I) โดยมีรูปแบบดังนี้

$$Z = \frac{V}{I} \quad (\text{สมการที่ 6})$$

จากคำอธิบายตัวต้านทานในไฟฟ้ากระแสสลับข้างต้น เราสามารถสมมติให้โครงสร้างของฟันมีลักษณะของตัวเก็บประจุ ดังภาพที่ 4 โดยให้ เครื่องมือรักษาคอลงรากฟันเป็นแผ่นตัวนำด้านหนึ่งของตัวเก็บประจุ และวัสดุฉนวนไฟฟ้าภายนอกเนื้อฟัน เช่น เอ็นอีดีปริทันต์ เป็นแผ่นตัวนำอีกด้านหนึ่งของตัวเก็บประจุ ส่วนเนื้อเยื่อและช่องเหลวภายในคลองรากฟันรวมถึงเคลือบรากฟันและเนื้อฟันของผนังคลองรากฟัน ถือเป็น ตัวแยก (separators) ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองและกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของระบบ

แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างของฟันมีลักษณะซับซ้อนกว่ารูปแบบง่าย ๆ ที่ได้ยกตัวอย่างมา โดยประกอบด้วยชิ้นวัสดุต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน โครงสร้างทางไฟฟ้าของคลองรากฟันมีความซับซ้อนมากกว่าการอธิบายด้วยองค์ประกอบความต้านทานและความจุไฟฟ้าที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ เสมือนเครือข่ายไฟฟ้าที่ซับซ้อน (complex electrical network) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของความต้านทานและความจุไฟฟ้า ทั้งแบบต่ออนุกรมและแบบขนานและมีคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ที่ซับซ้อน การสร้างแบบจำลองที่แม่นยำนั้นจึงไม่ใช่เรื่องง่าย (22)

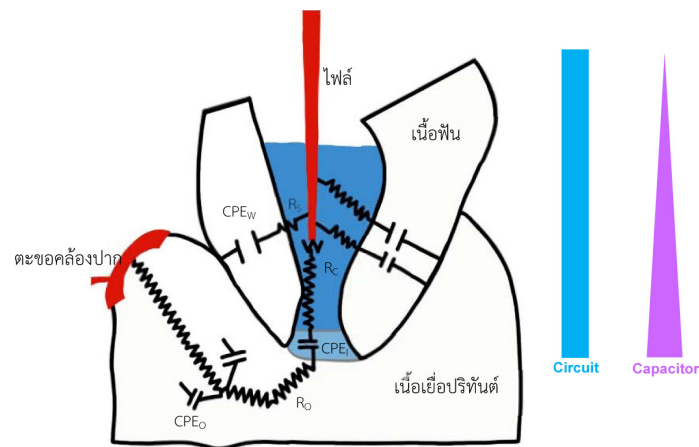
Huang และคณะ (22) จึงได้เสนอแบบจำลองวงจรไฟฟ้าในรูปแบบแผนผัง (schematic circuit model) ซึ่งเป็นวงจรเทียบเท่าที่ซับซ้อน (sophisticated equivalent circuit) ของคลองรากฟันบริเวณหนึ่งในสามของปลายราก (apical third) ซึ่งจำลองสถานการณ์ทางคลินิกได้อย่างใกล้เคียง โดยเน้นที่คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical features) ของโครงสร้างฟันในฐานะระบบชีวไฟฟ้า (bioelectric complex) ไว้ดังภาพที่ 5 ดังนี้

จากภาพที่ 5 กราฟแท่งเปรียบเทียบให้เห็นว่าคลองรากฟันในส่วนต้นไม่แสดงความเป็นตัวเก็บประจุเพราะเมื่อปลายเครื่องมืออยู่ห่างจากปลายคลองรากฟันหรือไม่ได้อยู่ที่รูเปิดปลายรากฟันรอง ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองของตัวเก็บประจุในแบบจำลองจะมีค่าสูง ตามสมการที่ 3

ขนาดของค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปลายเครื่องมือเข้าใกล้ปลายคลองรากฟัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของปลายคลองรากฟัน

3. พัฒนาการของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า

การพัฒนาเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันผ่านหลักการทางไฟฟ้าต่างๆ ได้ถูกจัดแบ่งรุ่น (Generation) และรุ่นย่อย ตามหลักการทำงาน โดยมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันในแต่ละรุ่น (5) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 5 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าในรูปแบบแผนผัง (schematic circuit model)

- R_s คือความต้านทานของพื้นผิวข้อไฟฟ้าและความต้านทานของสารละลายบริเวณด้านข้างของเครื่องมือที่จุ่มลงในคลองรากฟัน,
- R_c และ R_o คือความต้านทานของสารละลายจากปลายเครื่องมือถึงปลายรากฟัน และความต้านทานของเนื้อเยื่อปริทันต์ตามลำดับ,
- CPE_w คือ ความจุไฟฟ้าเสมือน (capacitive reactance) ของผนังคลองรากฟัน (dentin walls) รวมกับค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ Stray capacitance ซึ่งคือความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเกิดสนามไฟฟ้าขนาดเล็กที่ทำให้เกิดความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยไม่ตั้งใจ
- CPE_c คือ ความจุไฟฟ้าเสมือนที่เกิดจากส่วนติดต่อกันระหว่างสารละลายกับเจลอะการ์ (solution-agar interface) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการทดลองที่ทำให้วงจรสมบูรณ์
- CPE_o คือ ความจุไฟฟ้าเสมือนของตัวกลาง (medium) ภายนอกคลองรากฟัน
- กราฟแท่งสีฟ้า แสดงคุณสมบัติของความเป็นวงจรไฟฟ้า (circuit) ที่แสดงลักษณะดังกล่าวตลอดความยาวคลองรากฟัน
- กราฟแท่งสีม่วง แสดงคุณสมบัติของความเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor) ที่แสดงลักษณะดังกล่าวเล็กน้อยในส่วนต้นของคลองรากฟัน และจะแสดงลักษณะดังกล่าวมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ปลายรากฟันมากขึ้น

ปรับปรุงภาพจาก Huang J-H และคณะ. Impedance characteristics of mimic human youth root canal and its equivalent circuit model. Journal of The Electrochemical Society. 2008 (22)

ตารางที่ 1 สรุปพัฒนาการของเครื่องวัดความยาวคลองรากฟันด้วยไฟฟ้า

รุ่น	รุ่นย่อย	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	หมายเหตุ
ชนิดอาศัยความต้านทานไฟฟ้า (resistance-based)	1	วัดความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง	-	มีความแม่นยำเฉพาะในคลองรากฟันที่แห้งเท่านั้น และผู้ป่วยอาจรู้สึกถึงไฟฟ้า	Root Canal Meter [®] The Endodontic Meter [®] Endo Radar [®] Dentometer [®]	มีความพยายามใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แต่มีปัญหาจากส่วนประกอบเชิงความจุ (capacitive component)
	2	ใช้การสั่นความถี่ต่ำ (low-frequency oscillation)	ใช้หลักการอิมพีแดนซ์ที่คำนวณจากทั้งลักษณะทางความต้านทานและความจุไฟฟ้า	จำเป็นต้องปรับเทียบ (calibration) เป็นรายบุคคลในฟันแต่ละซี่แต่ละราก	Sono-Explorer [®] (คิดค้นโดย Inoue, ปี ค.ศ.1985)	
ชนิดอาศัยอิมพีแดนซ์ความถี่เดียว (single frequency impedance)		ใช้การสั่นความถี่สูง (high-frequency capacitance-based devices)	ลดผลกระทบจากลักษณะทางความจุไฟฟ้า	ใช้ในคลองรากที่แคบไม่ได้ และคำนวณหลุดลอกง่าย รวมถึงไม่สามารถนำไปปลอดเชื้อได้	Endocater [®] (คิดค้นโดย Hasegawa, ปี ค.ศ.1986)	
		อาศัยความจุไฟฟ้าและความต้านทาน (capacitance and resistance)	มีการแสดงผลที่เสถียรมากว่ารุ่นก่อนหน้า	ต้องอ่านค่าและดูตารางสำหรับค้นหา (look-up tables) ที่รวบรวมข้อมูลสถิติในตำแหน่งต่าง ๆ	Elements [®] Diagnostic Unit	
		ใช้หลักความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage gradient)	ระบุตำแหน่งของเครื่องมือที่จุดแคบสุดปลายคลองรากฟันได้อย่างแม่นยำ แม้อิมพีแดนซ์ไทรเลตต์เพิ่มขึ้น	ต้องใช้อิเล็กโทรดพิเศษแบบสองขั้ว ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ ในคลองรากฟันที่แคบ	ไม่มีการผลิตเชิงพาณิชย์	

ตารางที่ 1 สรุปพัฒนาการของเครื่องวัดความยาวคลองรากฟันด้วยไฟฟ้า (ต่อ)

รุ่น	รุ่นย่อย	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	หมายเหตุ
รุ่น 3 ชนิดอาศัย อิมพีแดนซ์ สองความถี่ (two frequencies impedance)	ใช้สองความถี่: ผลต่างอิมพีแดนซ์ (two frequencies: impedance difference)	วัดค่าของอิมพีแดนซ์ที่ ความถี่สองระดับ ได้แก่ f_H (ความถี่สูง) และ f_L (ความถี่ต่ำ) จากนั้นจึง คำนวณ ความแตกต่าง ของค่าที่วัดได้ ระหว่าง ความถี่ $Diff = Z(f_H) - Z(f_L)$ (สมการที่ 7)	ทำงานได้ดี ในสภาวะเปียกชื้น โดยสารอิเล็กโทรไลต์ ไม่มีผลต่อความแม่นยำ	วงจรไฟฟ้าเปิด (open electrical circuit) ไม่สามารถ ตรวจจับตำแหน่ง ปลายคลองได้ อย่างแม่นยำ ในสถานะแห้ง	Apit® (คิดค้นโดย Frank และ Torabinejad, 1993)	นำมาใช้ประโยชน์ ในการตรวจสอบ ความแห้งของ ระบบคลองรากฟัน ก่อนการอุดคลอง รากฟันได้ (23)
	ใช้สองความถี่: อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (two frequencies: impedance ratio)	วัดค่าของอิมพีแดนซ์ (impedance) ที่ความถี่ สองระดับ ได้แก่ f_H (ความถี่สูง) และ f_L (ความถี่ต่ำ) จากนั้นคำนวณ อัตราส่วนของค่าที่วัดได้ $Diff = \frac{Z(f_H)}{Z(f_L)}$ (สมการที่ 8) อัตราส่วน ในสมการนี้ ไม่ขึ้นอยู่กับ ของเหลวอิเล็กโทรไลต์ ภายในคลองรากฟัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ในวัสดุอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็น การเปลี่ยนแปลง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (e) จะส่งผลต่อทั้งตัวเลขและ ตัวส่วน ดังนั้นอัตราส่วน สุดท้ายจะยังคงที่	อัตราการใช้เปลี่ยนแปลง ของอิมพีแดนซ์ เกือบจะไม่ขึ้นอยู่ กับค่าการนำไฟฟ้า ของอิเล็กโทรไลต์ เป็นดัชนีที่เชื่อถือได้ ในการกำจัดการระเหย จากการนำไฟฟ้า ของอิเล็กโทรไลต์ เพื่อระบุตำแหน่ง ของส่วนแคบสุด ปลายรากฟัน ได้อย่างแม่นยำ	-	Dentaport ZX® Root ZX II® Apex ID® Elements Apex Locator® Justy II® Endy 5000®	การสังเกตค่าที่วัดได้ จะสังเกตอัตรา การเปลี่ยนแปลง ของอิมพีแดนซ์ (impedance quotient variation ratio) เมื่ออัตรา การเปลี่ยนแปลง ของอิมพีแดนซ์ ลดลงถึงค่าต่ำสุด (zero reading) เป็นครั้งแรก ถือว่าปลายเครื่องมี อยู่ที่จุดแคบสุด ปลายคลองรากฟัน

ตารางที่ 1 สรุปพัฒนาการของเครื่องวัดความยาวคลองรากฟันด้วยไฟฟ้า (ต่อ)

รุ่น	รุ่นย่อย	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	หมายเหตุ
4	อาศัยอิมพีแดนซ์หลายความถี่ (multiple frequencies impedance)	คล้ายคลึงกับชนิดที่อ้างอิง อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ แต่วัดด้วยความถี่มากกว่าสองความถี่ เช่น มีการใช้ความถี่ 5 ระดับ ที่ถูกตั้งค่าความถี่ไว้ล่วงหน้า	เช่นเดียวกับ รุ่นที่ 3 แต่จะแม่นยำกว่าในคลองรากฟันที่แห้ง	-	iPex® iPex II® Woodpex III® E Pex Pro®	
		คล้ายคลึงกับชนิดที่อ้างอิง อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ แต่มีการใช้สัญญาณไฟฟ้าแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีความถี่หลากหลาย ปรับตามสภาพแวดล้อมของของเหลวในคลองรากฟัน	เช่นเดียวกับ รุ่นที่ 3 แต่จะแม่นยำกว่าในคลองรากฟันที่เปียก	-	Raypex 5® ProPex Pixi® ProPex II® Innovapex-1® Rooter®	อาศัยการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ เพื่อแปลผลความขึ้นและตำแหน่งของปลายไฟล์ภายในคลองรากฟัน
6	อาศัยอิมพีแดนซ์หลายความถี่แบบมีระบบปรับการวัดตามสถานการณ์ (multiple frequencies impedance with adaptive measurement algorithms)	คล้ายคลึงกับชนิดที่อ้างอิง อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ มากกว่า 2 ความถี่ แต่มีระบบปรับวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ตามสถานการณ์ (adaptive) ขึ้นอยู่กับความขึ้นในคลองรากฟัน โดยสามารถปรับเป็นโหมดเปียกและโหมดแห้งได้	เป็นการรวมข้อดีและปรับลดข้อเสียของรุ่นที่ 4 และ 5 เข้าด้วยกัน (24)	-	Raypex 6® Endo-Eze Quill®	

4. ความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า

มีคำแนะนำการใช้เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ใช้อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (impedance ratio) จากบริษัท โดยแนะนำให้ใส่เครื่องมือไปจนแสดงสถานะ APEX จากนั้นถอยมายังตำแหน่ง 0.5 บาร์ สำหรับยี่ห้อ Root ZX® (25), ซิตเลข 1 สำหรับยี่ห้อ Justy II® หรือเส้นสีเหลือง สำหรับยี่ห้อ Endy 5000® (26) แต่มีการศึกษาที่พบว่าตำแหน่งดังกล่าวไม่ตรงกับตำแหน่งจุดแคบสุดปลายคลองรากฟันที่แท้จริง (27) โดยพบว่าเมื่อใช้เครื่องในการระบุตำแหน่งจุดแคบสุดปลายคลองรากฟันจะมีความแม่นยำเพียง 51–64.3% ในขณะที่หากใช้ในการระบุบริเวณที่อยู่ระหว่างรูเปิดคลองรากฟันหลักและรองจะมีความแม่นยำอยู่ที่ 81–82.4% (26) และเมื่อนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันหลักจะมีความแม่นยำสูงถึง 96.2% ซึ่งหากใช้ในการวัดความยาวในการทำงานและยอมรับความคลาดเคลื่อนที่ ± 0.5 มม. จากรูเปิดปลายรากฟันหลัก จะถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทางคลินิก (28) อีกทั้งในการศึกษาของ Huang และคณะ พบว่าค่าของอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ในคลองรากฟัน จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากรูเปิดปลายรากฟันรอง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่แน่นอน และมีหลายรูปแบบ เช่น การมีหลายจุดคอด (multi constriction) เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวการระบุตำแหน่งปลายรากฟันให้แน่ชัดถือ จึงควรวัดที่ตำแหน่งรูเปิดคลองรากฟันหลักซึ่งในเชิงปฏิบัติ แนะนำให้ใส่เครื่องมือเข้าไปในระบบคลองรากฟันและเลื่อนจนกระทั่งหน้าจอของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟัน แสดงค่าเป็นศูนย์หรือแสดงว่าถึงรูเปิดปลายรากฟันแล้ว จากนั้นจึงค่อยปรับตำแหน่งยางสต๊อปให้ตรงกับจุดอ้างอิง แล้วปรับระยะทำงานโดยลดระยะลงมาสั้นกว่าที่วัดได้ 0.5 มม. (22)

5. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า

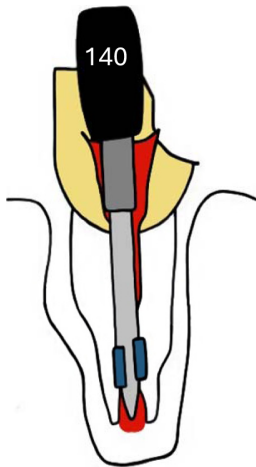
5.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคลองรากฟัน (canal-related factors)

สารที่อยู่ในคลองรากฟัน (root canal content) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ที่วัดด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าตั้งแต่รุ่นที่ 3 ที่ใช้หลักการอัตราส่วนอิมพีแดนซ์เป็นต้นไป เพราะไม่ว่าสารที่อยู่ในคลองรากฟันจะเป็นเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน เลือด หรือน้ำยาล้างคลองรากฟันที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (e) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันดังในสมการที่ 3 แต่เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 8 เพื่อหาอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังกล่าวจะถูกตัดทอนเศษส่วน ดังนั้นในท้ายที่สุดอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารในคลองรากฟัน (21) ดังนั้นสภาวะของโพรงประสาทฟัน (pulpal status) ในคลองรากฟันที่มีเนื้อเยื่อประสาทฟันที่ยังมีชีวิตกับที่มีเนื้อเยื่อตาย ไม่มีผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งรูเปิดปลายรากฟันรอง เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (29, 30)

ในคลองรากฟันที่แคบและยังไม่ได้ขยาย ขนาดของตะไบคลองรากฟันจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า โดยตะไบคลองรากฟันขนาดเล็ก คือ เบอร์ 8 และ 10 ให้ผลการวัดที่แม่นยำกว่าตะไบคลองรากฟันขนาดใหญ่ คือ เบอร์ 15 หรือ 20 เนื่องจากตะไบคลองรากฟันขนาดเล็ก จะมีขนาดพอดี (snugly-fit) กับรูเปิดปลายรากฟันรอง ส่วนตะไบคลองรากฟันขนาดใหญ่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูเปิดปลายรากฟันรองและอาจทำให้เกิดการติดขัดก่อนถึงรูเปิดปลายรากฟันรองจริง (31, 32) จึงทำให้การขยายคลองรากฟันส่วนต้นก่อน (pre-flaring) ช่วยเพิ่มความแม่นยำได้ (31, 33) และชนิดของโลหะของตะไบคลองรากฟัน ทั้งแบบธรรมดาและแบบที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน (heat-treated) ไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดความยาวทำงานด้วยไฟล์ทั้งสองชนิด (34)

ในฟันที่มีการเจริญไม่เต็มที่ (immature teeth) ที่คลองรากฟันมีลักษณะบานออก (divergent canals) ทำให้ความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟันที่เจริญเต็มที่

(mature teeth) (35) โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนนี้อาจมาจากการที่ไฟล์ขนาดเล็กที่ไม่สัมพันธ์กับคลองรากฟันรอบด้านทำให้การส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้า (impedance circuit) จากเครื่องมือไปยังเนื้อเยื่อปลายรากฟันไม่สมบูรณ์ ทำให้เครื่องจะไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่ปลายคลองรากฟันได้อย่างถูกต้อง หรือการที่เครื่องมือที่ใช้วัดความยาวไปติดและสัมผัสในบริเวณจุดที่อยู่เหนือรูเปิดปลายรากฟัน ดังภาพที่ 6 ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดแคบสุดของปลายคลองรากฟันขึ้นมาอยู่ใกล้ทางตัวฟันมากขึ้น ทำให้ความยาวทำงานที่วัดได้ด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าปกติ มีหลายการศึกษาที่พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดปลายรากฟันหลักมีขนาดใหญ่เกินไป ความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากตะไบคลองรากฟันไม่สามารถสัมผัสผนังคลองรากฟันได้รอบด้าน ทำให้การส่งสัญญาณไฟฟ้าระหว่างไฟล์กับเนื้อเยื่อปลายรากฟันติดเพียงทางด้านหน้า (36) โดยพบว่าจะเริ่มมีผลต่อความแม่นยำเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดปลายรากฟันหลักมีขนาดใหญ่กว่า ISO ขนาด 60



ภาพที่ 6 การติดขัด (binding) ของเครื่องมือในคลองรากฟันที่มีลักษณะบานออก (divergent root canal) คาดว่าจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-3 มม. เหนือรูเปิดปลายรากฟัน (apical foramen) ปรับปรุงภาพจาก Kaufman N, และคณะ. A comparative ex vivo study on apex locator precision in mature teeth and immature teeth with divergent canals. 2024 (35)

(37, 38) การวัดเริ่มผิดพลาดชัดเจนเมื่อขนาดใหญ่มากกว่า ISO ขนาด 70 (39) ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำเมื่อขนาดใหญ่มากกว่า ISO ขนาด 90 (40, 41) และจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2 ถึง 5 มม. แม้จะใช้ตะไบคลองรากฟันขนาดที่ใหญ่กว่าหรือพอดี เมื่อขนาด ISO ขนาด 100-150 (41)

ในฟันที่มีการละลายตัวของรากฟันบริเวณปลาย (apical root resorption) พบว่าเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Root ZX II® (J. Morita, generation 3), Raypex 6® (VDW, generation 6) และ Endo-Eze Quill® (Ultradent, generation 6) จะมีความแม่นยำลดลง เนื่องจากการเกิดแอ่งละลายของเนื้อเยื่อแข็ง (resorption lacunae) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและขนาดของทั้งรูเปิดปลายรากฟันหลักและจุดแคบสุดปลายคลองรากฟัน จึงมีคำแนะนำให้ใช้เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าร่วมกับภาพรังสีเพื่อเพิ่มความแม่นยำ (42)

ในฟันที่มีการละลายตัวของรากฟันด้านนอก (external root resorption) พบว่าเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าสามารถให้ความแม่นยำในการกำหนดความยาวในการทำงานได้ดีกว่า ภาพรังสีและภาพรังสีจากระบบเอกซเรย์คอมพิวเตอร์แบบโคนบีม (cone beam computed tomography: CBCT) (43) แต่สำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับตรวจจับหารอยทะลุในฟันที่มีการละลายดังกล่าว พบว่าเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้ามีความไว (sensitivity) และความน่าเชื่อถือ (reliability) ต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการทะลุมีขนาดเล็กกว่า 0.5 มม. (44) จึงมีคำแนะนำให้ใช้เครื่องฯ ร่วมกับ CBCT เพื่อลดข้อจำกัดของแต่ละวิธี (43)

ในฟันที่ผ่านการรักษารากฟัน (previously treated tooth) และมีความจำเป็นต้องรับการรักษาซ้ำ (retreatment) พบว่าความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟันที่ไม่เคยได้รับการรักษารากฟันมา แต่ผลแตกต่างกันดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ทางคลินิกควรระมัดระวังเกี่ยวกับวัสดุที่หลงเหลือในคลองรากฟัน เช่น กัดตาเปอร์ชา หรือซิลเลอร์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการอ่านค่าจากเครื่อง (45)

5.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟัน (device-related factors)

เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันไฟฟ้า รุ่นที่ 1 และ 2 ล้าสมัยและไม่มีการผลิตหรือใช้งานทางทันตกรรมในปัจจุบัน และไม่ปรากฏบนการศึกษามากกว่า 20 ปีที่ผ่านมา (46) อ้างอิงจากตารางที่ 1 จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบโดย Nasiri และคณะ ในปี ค.ศ. 2022 พบว่ารุ่นของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟัน (generation of the apex locator) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในด้านความแม่นยำในการกำหนดความยาวทำงาน ระหว่างเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าทั้งสี่รุ่นที่ทำการการศึกษา (รุ่นที่ 3-6) (46) และจากการศึกษาใหม่ ๆ ที่เน้นเปรียบเทียบเครื่องรุ่นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ Root ZX[®] กับเครื่องรุ่นใหม่ที่มีราคาประหยัดกว่า เช่น Root ZX Mini[®], PiXi[®], Innvopex-1[®], Woodpex III[®], Rooter[®] และ E pex pro[®] พบว่าเครื่อง Root ZX[®] มีความแม่นยำสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับรุ่นประหยัดดังที่ได้กล่าวมา (9, 47)

เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น แบบไร้สายชนิดใช้สัญญาณบลูทูธ พบว่ามีความแม่นยำไม่แตกต่างกับเครื่องรุ่นมาตรฐาน (48) หรือเครื่องมือมอเตอร์เอนโดดอนติกที่รวมกับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟัน (integrated-endomotor apex locator) คือการการนำเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้ามารวมเข้ากับเครื่องขยายคลองรากฟันแบบใช้มอเตอร์ (49) มีประสิทธิภาพในการควบคุมไม่ให้เกิดขอบเขตของการเตรียมปลายคลองรากฟัน พบว่ามีความแม่นยำของฟังก์ชันการตรวจจับปลายคลองรากฟัน (50) และมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือไม่แตกต่างกับเครื่องรุ่นมาตรฐาน (51) แต่ในเครื่องชนิดติดตั้งมาพร้อมกับระบบเก๊าท์ทำฟันกลับมีความน่าเชื่อถือและความแม่นยำน้อยกว่าเครื่องรุ่นมาตรฐาน (52)

การใช้งานเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันในระยะยาว (long service) ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำ ในเครื่องที่ใช้มานานมากกว่า 6 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้เวลาน้อยกว่า 6 ปี จึงสรุปว่าเครื่องมีความน่าเชื่อถือแม้ใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน หากได้รับการดูแลและบำรุงรักษาตามคำแนะนำของผู้ผลิต (53)

5.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้งาน (operator-dependent factors)

ประสบการณ์และเทคนิคของผู้ใช้งาน (experience and technique) ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่ม คือ ผู้เชี่ยวชาญด้านเอนโดดอนติกส์ที่มีประสบการณ์ 20 ปี และนักศึกษาทันตแพทย์ชั้นปีสุดท้าย ผู้ปฏิบัติงานทั้งสองกลุ่มสามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันในการใช้เครื่องมือดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของเครื่องฯ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ใช้งาน หากมีการปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด (54)

แต่มีคำแนะนำเทคนิคการใช้งานจากการศึกษาของ Monisha และคณะ (55) ที่เปรียบเทียบเทคนิค 2 แบบในการวัดความยาวทำงาน ระหว่าง

1. เทคนิคทั่วไป (conventional technique) คือ ใช้ไฟล์ใส่ลงในคลองรากฟันโดยตรงและวัดตำแหน่งจนกระทั่งเครื่องระบุ ว่าถึงจุดคอดสุดปลายคลองรากฟัน จึงปรับยางสตอปให้ตรงกับจุดอ้างอิงบนตัวฟัน
2. เทคนิคทางอ้อม (indirect technique) คือ ใช้ตัวจับไฟล์ของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า จับกับไฟล์อีกตัวหนึ่ง แล้วนำไปสัมผัสกับไฟล์ที่ใส่ลงในคลองรากฟันแทน (ภาพที่ 7)



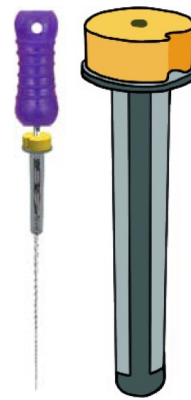
ภาพที่ 7 ภาพจำลอง “เทคนิคทางอ้อม (indirect technique)” ตามการศึกษาของ Monisha (55)

พบว่าถึงแม้ความแม่นยำในการวัดจะไม่แตกต่างกัน แต่วิธีเทคนิคทางอ้อมทำให้โอกาสในการวัดได้ค่าใกล้เคียงกัน ในแต่ละผู้ทดลอง (inter-rater agreement) สูงขึ้น เนื่องจากสามารถลดความเสี่ยงที่จุลชีวินจะเลื่อนหลุด โดยเฉพาะในกรณีที่คลองรากฟันยาวหรือมีการเข้าถึงจำกัด

5.4 ปัจจัยที่มีผลมาจากสภาพแวดล้อม (environmental or external factors)

หลักการของสารที่อยู่ภายในคลองรากฟัน ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ที่วัดด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าตั้งแต่รุ่นที่ 3 เป็นต้นไป สอดคล้องกับการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบโดย Tsesis และคณะ (56) โดยการศึกษาพบว่าชนิดของน้ำยาล้างคลองรากฟัน ไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำของการวัดด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า และยังสอดคล้องกับการศึกษาที่ใหม่กว่าหลายการศึกษาที่พบว่า น้ำยาล้างคลองรากฟัน ได้แก่ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite, NaOCl), คลอร์เฮกซิดีน (chlorhexidine, CHX) หรือ กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซีติก (ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) ไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (9, 57-59) เช่นเดียวกันกับการมีเลือดหรือเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันในคลองรากฟัน หรือการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อโดยรอบรากฟัน (conductivity of surrounding tissues) เช่น การมีรอยโรครอบปลายรากฟัน (periapical lesions) ไม่มีผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (57, 60) แต่พบว่าความสม่ำเสมอ (repeatability) ของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มที่มีรอยโรครอบปลายรากฟัน เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีรอยโรค (normal periapex) และในกลุ่มที่มีรอยโรครอบปลายรากฟันพบความแตกต่างระหว่างการวัดแต่ละครั้ง มีค่าเฉลี่ยที่กว้างกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการวัด จึงมีคำแนะนำเกี่ยวกับการรักษาคอนกรีตฟันในฟันที่มีรอยโรครอบปลายรากฟัน ควรพิจารณาใช้เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันร่วมกับวิธีเสริมอื่น เช่น การถ่ายภาพรังสี เป็นต้น (60)

การมีวัสดุบูรณะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น การมีครอบฟัน (base-metal crown) หรือ วัสดุอุดฟันด้วยอะมัลกัม (amalgam filling) ไม่ได้ลดความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันเมื่อเทียบกับฟันที่ตัวฟันเป็นเนื้อฟันธรรมชาติ (natural crown) แต่ต้องระมัดระวังไม่ให้ส่วนที่นำไฟฟ้าของโพลีเมอร์สัมผัสโดนยังโลหะของครอบฟันหรือวัสดุอุดฟันอะมัลกัม ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าได้ จึงมีคำแนะนำให้ใช้ การใช้ “isolating rubber stopper” ดังภาพที่ 8 เป็นทางเลือกที่ดีในการเพิ่มความสม่ำเสมอของการแสดงผล แต่ไม่มีผลต่อความแม่นยำ (61) ส่วนการมีครอบฟันชนิดเซรามิกล้วน (all-ceramic crown) โดยทั่วไปไม่ส่งผลต่อการใช้งานของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก ทั้งชนิดลิเทียมไดซิลิเกต (lithium disilicate) (62) หรือ เซอร์โคเนีย (zirconia) (63) และมีพฤติกรรมเป็นฉนวนไฟฟ้าในสภาวะการทางคลินิก



ภาพที่ 8 ภาพแสดงซิลิโคนสต็อปเปอร์ขณะใส่กับโพลียาว 21 มม. และภาพวาดแสดงโครงร่างของซิลิโคนสต็อปเปอร์ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มชั้นฉนวน (ความยาว: 8 มม., ความหนาของผนัง: 0.2 มม.) ปรับปรุงภาพจาก Kowolik S, Sonntag D. Accuracy and consistency of electronic root canal length determination with electrically isolating rubber stoppers. 2019 (61)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากการใช้สมาร์ทโฟน (electromagnetic interference of smartphones) เมื่อมีสมาร์ทโฟนรุ่น Samsung Galaxy Note Edge, iPhone 5S และ Samsung Galaxy S5 เมื่ออยู่ใกล้หรือแม้แต่สัมผัสติดอยู่กับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งอยู่ในโหมดโทร (calling mode) ก็ไม่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดความยาวทำงานด้วยเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า (64, 65)

6. ความปลอดภัยในการใช้งานเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้ากับผู้ป่วยที่มีการใช้เครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า (cardiac pacemaker)

การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฝังในระบบหัวใจและหลอดเลือด เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจ (pacemakers), เครื่องกระตุกไฟฟ้าหัวใจฝังใต้ผิวหนัง (subcutaneous implantable cardioverter defibrillators) หรือเครื่องช่วยปรับจังหวะหัวใจ (cardiac resynchronization therapy devices) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก (66) ผู้ป่วยที่ใช้อุปกรณ์เหล่านี้มักจะได้รับคำแนะนำให้ระมัดระวังเมื่อต้องสัมผัสกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงมีความกังวลเกี่ยวกับการรบกวนของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ฝังในระบบหัวใจ อย่างไรก็ตามหลายการศึกษาในทางห้องปฏิบัติการและทางคลินิกไม่พบการรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ฝังในระบบหัวใจ และสรุปได้ว่าเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้าสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยสำหรับผู้ป่วยที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฝังในระบบหัวใจ แต่อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำให้ปรึกษาแพทย์โรคหัวใจประจำตัวผู้ป่วยก่อนทำหัตถการ (66-68)

7. การนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการวัดความยาวคลองรากฟัน

การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ (ultrasonography)

การศึกษาของ İrem Eren และ Yeşim Deniz ในปี ค.ศ. 2024 (69, 70) เกี่ยวกับประสิทธิภาพของอัลตราซาวด์ (ultrasound) ในการวัดความยาวคลองรากฟัน ทั้งในการศึกษาในทางห้องปฏิบัติการ (in vitro) และทางคลินิกพบว่าอัลตราซาวด์ สามารถให้ผลการวัดที่เทียบเท่ากับเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า และไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสองวิธีนี้ การใช้อัลตราซาวด์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการมองเห็นปลายรากฟันแบบตามเวลาจริง (real time) ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการละลายตัวของกระดูกบริเวณปลายรากฟัน หรือมีรอยโรครอบปลายรากฟันขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้งานได้ดีในกรณีที่มีความหนาของกระดูกคอร์เท็กซ์สูง และการศึกษา ยังเน้นเฉพาะฟันหน้าซึ่งง่ายต่อการใช้อัลตราซาวด์ probe ดังนั้นจึงต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในสภาพคลินิกที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น ฟันหลังหรือคลองรากฟันที่มีโครงสร้างซับซ้อน

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence; AI)

ปัญญาประดิษฐ์ สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำลดข้อผิดพลาดของมนุษย์ และช่วยให้การวินิจฉัยและการตัดสินใจในทางคลินิกเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การใช้งาน ต้องให้ปัญญาประดิษฐ์ผ่านขั้นตอนการฝึกฝน (training) โดยอาศัยฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของภาพรังสีและภาพรังสี CBCT (71) โดยมีหลักการเรียนรู้หลายรูปแบบ เช่น การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) หรือการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) ทั้งรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks, ANNs) และโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (convolutional neural networks, CNNs) (72, 73)

ในการรักษาทางเอ็นโดดอนติกส์ ปัญญาประดิษฐ์สามารถช่วยให้การวัดความยาวทำงานแม่นยำขึ้น โดยอาศัยภาพรังสีร่วมกับการประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ (74) โดย CNN และ deep learning สามารถตรวจหาตำแหน่ง

รูเปิดปลายรากฟันได้โดยอัตโนมัติ ลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการแปลผลของมนุษย์ (71) Saghiri และคณะ รายงานว่า ปัญหาประติษฐ์ สามารถกำหนดความยาวทำงาน ได้แม่นยำถึงร้อยละ 96 เทียบกับทันตแพทย์ผู้เชี่ยวชาญที่แม่นยำเพียงร้อยละ 76 (75) Qiao และคณะ ใช้ CNN วิเคราะห์ภาพ CBCT พบว่ามีความแม่นยำสูงกว่าเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ระบบคลองรากฟันมีความซับซ้อน เช่น คลองรากฟันรูปแบบตัวซี (C-shaped root canal) หรือคลองรากฟันที่มีการบานออก เนื่องจากโมเดล CNN ดังกล่าว ได้รับการฝึกฝนจากภาพ CBCT ซึ่งให้รายละเอียดเชิงโครงสร้างของคลองรากฟันในแบบ 3 มิติ ทำให้สามารถประเมินความยาวได้แม่นยำโดยไม่ถูกรบกวนจากปัจจัยอื่น (75) การนำปัญหาประติษฐ์ มาช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนในการวัด สามารถยกระดับมาตรฐานการรักษารากฟันในทางคลินิก และช่วยในการรักษาให้ดียิ่งขึ้น (76)

8. สรุป

เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า ทำงานโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (impedance) ภายในคลองรากฟันเมื่อปลายไฟล์อยู่ที่ตำแหน่งจุดคอดสุดของปลายรากฟัน หลักการนี้ทำให้เครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟันด้วยไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพในการกำหนดความยาวทำงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการรักษาคคลองรากฟัน อย่างไรก็ตามความแม่นยำของเครื่องอาจได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย เช่น ลักษณะกายวิภาคของคลองรากฟัน การมีรากฟันละลายฟันที่ผ่านการรักษาคคลองรากฟัน รุ่นของเครื่องวัดตำแหน่งปลายรากฟัน ขนาดของไฟล์ การมีรอยโรคปลายรากฟัน นอกจากนี้ การพัฒนาในอนาคตโดยใช้เครื่องอัลตราซาวด์และการผสมผสานกับปัญญาประดิษฐ์ คาดว่าจะช่วยยกระดับผลลัพธ์ของการวัดความยาวคลองรากฟันให้ดียิ่งขึ้น

Acknowledgment

ไม่มี

Funding source

ไม่มี

Conflict of interest

ผู้เขียนขอประกาศว่าไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Ricucci D, Siqueira JF, Jr. Biofilms and apical periodontitis: study of prevalence and association with clinical and histopathologic findings. *J Endod*. 2010;36:1277-88.
2. Gulabivala K, Ng YL. Factors that affect the outcomes of root canal treatment and retreatment—A reframing of the principles. *Int Endod J*. 2023;56:82-115.
3. Ng YL, Mann V, Gulabivala K. A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int Endod J*. 2011;44:583-609.
4. Gambarini G, Krastl G, Chaniotis A, et al. Clinical challenges and current trends in access cavity design and working length determination: First European Society of Endodontology (ESE) clinical meeting: ACTA, Amsterdam, The Netherlands, 27th October 2018. *Int Endod J*. 2019;52:397-9.
5. Hany M. A. Ahmed aPMHD. Endodontic Advances and Evidence-Based Clinical Guidelines. USA: John Wiley & Sons; 2022.
6. Kuttler Y. Microscopic investigation of root apices. *J Am Dent Assoc*. 1955;50:544-52.
7. Pineda F, Kuttler Y. Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1972;33:101-10.

8. Orosco FA, Bernardineli N, Garcia RB, et al. In vivo accuracy of conventional and digital radiographic methods in confirming root canal working length determination by Root ZX. **J Appl Oral Sci.** 2012;20:522-5.
9. Mohan M, Verma MR, Jain AK, et al. Comparison of Accuracy of Dentaport ZX, Rotor and E-Pex Pro Electronic Apex Locators in Two Simulated Clinical Conditions: An In Vitro Study. **J Conserv Dent.** 2022;25:58-62.
10. Martínez-Lozano MA, Forner-Navarro L, Sánchez-Cortés JL, et al. Methodological considerations in the determination of working length. **Int Endod J.** 2001;34:371-6.
11. Mahmoud O, Awad Abdelmagied MH, Dandashi AH, et al. Comparative Evaluation of Accuracy of Different Apex Locators: Propex IQ, Raypex 6, Root ZX, and Apex ID with CBCT and Periapical Radiograph-In Vitro Study. **Int J Dent.** 2021;2021:5563426.
12. Stein TJ, Corcoran JF. Anatomy of the root apex and its histologic changes with age. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol.** 1990;69:238-42.
13. Malueg LA, Wilcox LR, Johnson W. Examination of external apical root resorption with scanning electron microscopy. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 1996;82:89-93.
14. Berman LH, Hargreaves KM. Cohen's pathways of the pulp. 12th ed.: Elsevier Health Sciences; 2020.
15. Saha D, Mazumdar D, Biswas M, et al. Comparative evaluation of efficacy in working length determination: Radiography versus Electronic apex locators using in vivo and ex vivo methods with stereomicroscope validation. **J Conserv Dent Endod.** 2024;27:790-4.
16. Kaur G, Thomas AR, Samson RS, et al. Efficacy of electronic apex locators in comparison with intraoral radiographs in working length determination- a systematic review and meta-analysis. **BMC Oral Health.** 2024;24:532.
17. Kim E, Marmo M, Lee CY, et al. An in vivo comparison of working length determination by only root-ZX apex locator versus combining root-ZX apex locator with radiographs using a new impression technique. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 2008;105:e79-83.
18. Custer LE. Exact Method of Locating the Apical Foramen. **Dent Regist.** 1918;72:420-5.
19. Suzuki K. Experimental study on iontophoresis. **Jpn J Stomatol.** 1942;16:411-29.
20. Sunada I. New method for measuring the length of the root canal. **J Dent Res.** 1962;41:375-87.
21. Nekoofar MH, Ghandi MM, Hayes SJ, et al. The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. **Int Endod J.** 2006;39:595-609.
22. Huang J-H, Yen S-C, Lin C-P. Impedance Characteristics of Mimic Human Tooth Root Canal and Its Equivalent Circuit Model. **J Electrochem Soc.** 2008;155:P51.
23. Dahlin J. Electrometric measuring of the apical foramen. A new method for diagnosis and endodontic therapy. **Quintessence Int Dent Dig.** 1979;10:13-22.
24. Dimitrov S, Roshkev D. Sixth generation adaptive apex locator. **Journal of IMAB-Annual Proceeding (Scientific Papers).** 2009;15:75-8.

25. ROOT ZX II Canal Measurement Module: Operation Instructions. J MORITA MFG CORP. Japan 2012.
26. Hoer D, Attin T. The accuracy of electronic working length determination. **Int Endod J.** 2004;37:125-31.
27. Ounsi HF, Naaman A. In vitro evaluation of the reliability of the Root ZX electronic apex locator. **Int Endod J.** 1999;32:120-3.
28. Shabahang S, Goon WW, Gluskin AH. An in vivo evaluation of Root ZX electronic apex locator. **J Endod.** 1996;22:616-8.
29. Dunlap CA, Remeikis NA, BeGole EA, et al. An in vivo evaluation of an electronic apex locator that uses the ratio method in vital and necrotic canals. **J Endod.** 1998;24:48-50.
30. Vajpayee A, Khandare PD, Dutta SD, et al. In vivo Study to Evaluate the Effect of Instrument Size on the Accuracy of Three Different Apex Locators when Various Irrigation Solutions are used in Vital and Non-Vital Teeth. **J Pharm Bioallied Sci.** 2023;15:S1156-s9.
31. Saritha V, Raghu H, Kumar TH, et al. The accuracy of two electronic apex locators on effect of preflaring and file size: An in vitro study. **J Conserv Dent.** 2021;24:46-9.
32. Siddiqui AY, Alothmani OS. Influence of Hand File Size on the Accuracy of Root ZX and iPex Electronic Apex Locators: An In Vitro Study. **Cureus.** 2023;15:e39662.
33. de Camargo EJ, Zapata RO, Medeiros PL, et al. Influence of preflaring on the accuracy of length determination with four electronic apex locators. **J Endod.** 2009;35:1300-2.
34. Heo KY, Hwang HK, Jo HH. Accuracy of electronic apex locators using heat-treated Ni-Ti file. **Aust Endod J.** 2023;49:111-6.
35. Kaufman N, Fux Noy A, Slutzky-Goldberg I. A Comparative Ex Vivo Study on Apex Locator Precision in Mature Teeth and Immature Teeth With Divergent Canals. **Cureus.** 2024;16:e69116.
36. Kim YJ, Chandler NP. Determination of working length for teeth with wide or immature apices: a review. **Int Endod J.** 2013;46:483-91.
37. Ebrahim AK, Yoshioka T, Kobayashi C, et al. 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;51:153-7.
38. Herrera M, Abalos C, Planas AJ, et al. Influence of apical constriction diameter on Root ZX apex locator precision. **J Endod.** 2007;33:995-8.
39. 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;51:258-62.
40. ElAyouti A, Kimionis I, Chu AL, et al. Determining the apical terminus of root-end resected teeth using three modern apex locators: a comparative ex vivo study. **Int Endod J.** 2005;38:827-33.
41. Herrera M, Ábalos C, Lucena C, et al. Critical diameter of apical foramen and of file size using the Root ZX apex locator: an in vitro study. **J Endod.** 2011;37:1306-9.
42. Broon NJ, Palafox-Sánchez CA, Estrela C, et al. Analysis of Electronic Apex Locators in Human Teeth Diagnosed With Apical Periodontitis. **Braz Dent J.** 2019;30:550-4.

43. Hasheminia SM, Jahadi S, Moghaddam FG, et al. Comparison of the accuracy of apex locator, digital radiography, and cone-beam computed tomography in root canal working length determination in teeth with external root resorption: An in vitro study. **Dent Res J (Isfahan)**. 2024;21:8.
44. Adibi A, Sobhnamayan F, Ostovar Zijerdi N, et al. Comparison of the Accuracy of CBCT Images and Apex Locator in Detection of External Root Resorption with Perforation. **J Dent (Shiraz)**. 2022;23:445-51.
45. Tufenkci P, Kalayci 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; 14:125-9.
46. Nasiri K, Wrbas KT. Accuracy of different generations of apex locators in determining working length; a systematic review and meta-analysis. **Saudi Dent J**. 2022;34:11-20.
47. Sayed A, Dighole S, Lobo WMV, et al. Comparative evaluation of the accuracy of six different apex locators in working length determination of molars using intraoral periapical radiographs: An in vivo study. **J Conserv Dent Endod**. 2024; 27:695-700.
48. Brand L, Dunlap CA, Scott R, et al. An in vitro evaluation of the WIRELE-x electronic apex locator. **Aust Endod J**. 2023;49 Suppl 1:41-5.
49. Abidi SYA, Azfar M, Nayab T, et al. Accuracy of working length measurement with endo motor having built-in apex locator and comparison with periapical radiographs. **J Pak Med Assoc**. 2020;70:437-41.
50. Klemz AA, Cruz ATG, Piasecki L, et al. Accuracy of electronic apical functions of a new integrated motor compared to the visual control of the working length-an ex vivo study. **Clin Oral Investig**. 2021;25:231-6.
51. Topuz O, Uzun O, Tinaz AC, et al. Accuracy of the apex locating function of TCM Endo V in simulated conditions: a comparison study. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod**. 2007;103:e73-6.
52. Barakat RM, Almohareb RA, Alharbi AO, et al. Comparative Accuracy and Reliability of Three Electronic Apex Locators in Determining the Apical Constriction of Molar Canals: A Micro-CT Evaluation. **J Clin Med**. 2024;13.
53. Parirokh M, Manochehrif H, Shahravan A, et al. The Effect of Long Service Life on the Accuracy of Dentaport ZX Electronic Apex Locator. **Iran Endod J**. 2022;17:195-9.
54. Cîmpean SI, Chisnoiu RM, Colceriu Burtea AL, et al. In Vitro Evaluation of the Accuracy of Three Electronic Apex Locators Using Different Sodium Hypochlorite Concentrations. **Medicina (Kaunas)**. 2023;59.
55. Monisha R, Sivakumar A, Chittrarasu M, et al. Comparative evaluation of accuracy of working length determination with fifth-generation apex locator using two different techniques: An in vitro study. **J Conserv Dent Endod**. 2024; 27:240-5.
56. Tsesis I, Blazer T, Ben-Izhack G, et al. The Precision of Electronic Apex Locators in Working Length Determination: A Systematic Review and Meta-analysis of the Literature. **J Endod**. 2015;41:1818-23.

57. Çınar F, Üstün Y. Ex Vivo Evaluation of the Accuracy of 3 Electronic Apex Locators in Different Environments: A Micro-Computed Tomography Study. **Eur Endod J.** 2020;5: 226-30.
58. Yahya EM, Alchalabi AS, Alkhalidi EF. Effect of Different Electroconductive Root Canal Irrigations on the Accuracy of Different Apex Locators: An In Vitro Comparative Study. **J Int Soc Prev Community Dent.** 2024;14: 211-7.
59. Karunakar P, Reddy MSR, Faizuddin U, et al. Comparative evaluation of working length determined using integrated apex locator and root ZX mini under various irrigating solutions: An in vivo study. **J Conserv Dent Endod.** 2023; 26:590-4.
60. Adorno CG, Solaeche SM, Ferreira IE, et al. The influence of periapical lesions on the repeatability of two electronic apex locators in vivo. **Clin Oral Investig.** 2021;25:5239-45.
61. Kowollik S, Sonntag D. Accuracy and consistency of electronic root canal length determination with electrically isolating rubber stoppers. **Aust Endod J.** 2019;45:33-9.
62. Jakovac M, Žic M, Pavić L, et al. Electrical Properties of Two Types of Lithium-Based Glass Ceramics. **Acta Stomatol Croat.** 2022; 56(3):281-7.
63. Borik MA, Chislov AS, Kulebyakin AV, et al. Data on physical and electrical properties of $(\text{ZrO}_2)(1-x)(\text{Sc}_2\text{O}_3)(x)(\text{CeO}_2)(y)$ and $(\text{ZrO}_2)(1-x-y-z)(\text{Sc}_2\text{O}_3)(x)(\text{CeO}_2)(y)(\text{Y}_2\text{O}_3)(z)$ solid solution crystals. **Data Brief.** 2019;25:104061.
64. Sidhu P, Shankargouda S, Dicksit DD, et al. Evaluation of Interference of Cellular Phones on Electronic Apex Locators: An In Vitro Study. **J Endod.** 2016;42:622-5.
65. Silva E, Muniz B, Carvalho N, et al. Electromagnetic interference of smartphones on apex locators: An in vivo study. **ENDO.** 2016;10:161-5.
66. Niu Y, Chen Y, Li W, et al. Electromagnetic interference effect of dental equipment on cardiac implantable electrical devices: A systematic review. **Pacing Clin Electrophysiol.** 2020;43:1588-98.
67. Beach CW, Bramwell JD, Hutter JW. Use of an electronic apex locator on a cardiac pacemaker patient. **J Endod.** 1996;22:182-4.
68. AlRahabi MK, Ghabbani HM. Influence and safety of electronic apex locators in patients with cardiovascular implantable electronic devices: a systematic review. **Libyan J Med.** 2019;14:1547071.
69. Eren İ, Deniz Y. The usefulness of ultrasonography as a dynamic measurement system for visualizing root canal working length: an in vivo study. **BMC Oral Health.** 2024;24:801.
70. Eren İ, Sarıyılmaz Ö, Eren H, et al. Can ultrasonography be used to determine working length in endodontic treatment? An in vitro study. **Odontology.** 2024;112:453-9.
71. Lai G, Dunlap C, Gluskin A, et al. Artificial Intelligence in Endodontics. **J Calif Dent Assoc.** 2023;51.
72. Umer F, Habib S. Critical Analysis of Artificial Intelligence in Endodontics: A Scoping Review. **J Endod.** 2022;48:152-60.



73. Aminoshariae A, Kulild J, Nagendrababu V. Artificial Intelligence in Endodontics: Current Applications and Future Directions. **J Endod.** 2021;47:1352-7.
74. Ourang SA, Sohrabniya F, Mohammad-Rahimi H, et al. Artificial intelligence in endodontics: Fundamental principles, workflow, and tasks. **Int Endod J.** 2024;57:1546-65.
75. Khanagar SB, Alfadley A, Alfouzan K, et al. Developments and Performance of Artificial Intelligence Models Designed for Application in Endodontics: A Systematic Review. **Diagnostics (Basel).** 2023;13.
76. Ahmed ZH, Almuharib AM, Abdulkarim AA, et al. Artificial Intelligence and Its Application in Endodontics: A Review. **J Contemp Dent Pract.** 2023;24:912-7.