บทวิทยาการ

การประเมินความแข็งแรงพันธะผลักออกของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมิเนอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

Evaluation of the Push-out Bond Strength of MTA-based Sealer in the Simulated Immature Root Models

ศิริกุล วนาไพศาล[1], นทีธร พฤกษ์วัชรกุล[2], พีรพร ทวีวัฒนไพศาล[2], ชินาลัย ปิยะชน[2]

Sirikul Wanapaisarn[1], Nateetorn Plukwatchalakul[2], Peeraporn Taweewattanapaisan[2], Chinalai Piyachon[2]

[1]ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น กรุงเทพฯ

[1]Department of Conservative Dentistry, Faculty of Dentistry, Western University, Bangkok

[2]ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ

[2]Department of Conservative Dentistry and Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University, Bangkok

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงพันธะผลักออกของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กับเอเอชพลัสและซีย์ซีลเลอร์ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิดโดยศึกษาในฟันกรามน้อยแท้รากเดียวจำนวน 45 ซี่ เตรียมคลองรากฟันโดยจำลองลักษณะฟันปลายรากเปิด อุดคลองรากฟันโดยใช้กัตตาเปอร์ชาร่วมกับซีลเลอร์อุดคลองรากฟันแบ่งฟันออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 15 ซี่ตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้ ได้แก่ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เอเอชพลัส และซีย์ซีลเลอร์หลังจากอุดคลองรากฟันและแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นเวลา 28 วัน ตัดรากฟันตั้งฉากกับแนวแกนฟัน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาทดสอบความแข็งแรงของพันธะผลักออกโดยเครื่องทดสอบสากล นำชิ้นงานที่สูญเสียการยึดติดกับวัสดุอุดคลองรากฟันมาทำการศึกษารูปแบบความล้มเหลวภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออกสูงสุด คือ เอเอชพลัส รองลงมาคือ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กลุ่มซีย์ซีลเลอร์มีความแข็งแรงพันธะผลักออกน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ภายใต้ข้อจำกัดของการศึกษาในห้องปฏิบัติการนี้สรุปได้ว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีความแข็งแรงพันธะผลักออกน้อยกว่าเอเอชพลัส

คำสำคัญ: ความแข็งแรงพันธะผลักออก, ซีลเลอร์สำหรับอุดคลองรากฟัน, เอ็มทีเอ

Abstract

The aim of this study was to compare the push-out bond strength of MTA Fillapex to AH Plus and CU Sealer in simulated immature root models. The models were created from forty-five extracted single root premolars and randomly divided into three groups of fifteen each. Root canals were obturated with gutta-percha and one of the following sealers: MTA Fillapex, AH Plus and CU Sealer. After immersion in phosphate buffered saline for twenty-eight days, the roots were cut perpendicularly to the long axis to create 3-mm thick slices from the apical end of roots.

The push-out bond strength was measured with a universal testing machine. Failure modes were determined under scanning electron microscopy. The highest mean of push-out bond strength was found in AH Plus group, followed by MTA Fillapex and CU Sealer sequentially at $p<0.05$. Within the limitations of this *in vitro* study, MTA Fillapex showed less push-out bond strength to root dentin when compared to AH Plus sealer.

Keywords: Push-out bond strength, Root canal sealer, MTA

Received Date: May 10, 2019 **Revised Date:** May 23, 2019 **Accepted Date:** Oct 29, 2019

doi: 10.14456/jdat.2020.5

ติดต่อเกี่ยวกับบทความ:

ศิริกุล วนาไพศาล ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น 4 หมู่ที่ 11 ถ.หทัยราษฎร์ ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150 โทรศัพท์: 025635252, 0865449255 อีเมล: wanapaisarn.sw@gmail.com

Correspondence to:

Sirikul Wanapaisarn, Department of Conservative Dentistry, Western University, 4 Moo 11 Hatairad Rd, Ladsawai, Lumlukka, Pathumthani 12150, Thailand. Tel: 025635252, 0865449255 Email: wanapaisarn.sw@gmail.com

บทนำ

ความสำเร็จของการรักษาคลองรากฟันขึ้นอยู่กับการทำความสะอาดคลองรากฟันให้ปราศจากเชื้อการตกแต่งรูปร่างคลองรากฟันและการอุดคลองรากฟันให้มีการปิดผนึกทั้ง 3 มิติ เพื่อไม่ให้เกิดการติดเชื้อซ้ำ กัตตาเปอร์ชาเป็นวัสดุอุดคลองรากฟันที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันทั้งในแง่การเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่ทำให้เนื้อฟันเปลี่ยนสี และให้ความทึบรังสีที่ดี อย่างไรก็ตามวัสดุอุดกัตตาเปอร์ชาเพียงชนิดเดียวไม่สามารถให้การยึดติดกับผนังคลองรากฟันได้ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับซีลเลอร์อุดคลองรากฟันเพื่อให้ได้ความแนบสนิทในทุกมิติโดยตลอดทั้งคลองรากฟัน

คุณสมบัติที่ต้องการของซีลเลอร์คือสามารถป้องกันการรั่วซึม มีระยะเวลาการก่อตัวเหมาะสม มีความคงตัวที่ดีภายหลังก่อตัว มีความต้านทานต่อการละลายเมื่อสัมผัสกับสารน้ำจากเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน ไม่มีความเป็นพิษและสามารถยึดติดกับผนังคลองรากฟัน การยึดติดเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีความสำคัญทั้งในภาวะสถิตย์ (static) คือกำจัดช่องว่างและป้องกันการเคลื่อนผ่านของสารน้ำทางรอยต่อระหว่างวัสดุอุดและผนังคลองรากฟัน และในภาวะพลวัต (dynamic) คือสามารถต้านทานการหลุดออกของวัสดุที่เกิดจากความเครียดทางกลที่มากระทำ เช่น ต้านทานการหลุดระหว่างการเตรียมช่องว่างสำหรับเดือยฟัน[1]

กลไกการยึดติดของวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือการยึดติดทางกลและการยึดติดทางเคมี โดยการยึดติดทางกลจะอาศัยความขรุขระของพื้นผิวและอาศัยความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟัน[2] โดยปัจจัยที่มีผลต่อการยึดติดของซีลเลอร์กับผิวฟันได้แก่ แรงตึงผิว (surface tension) ของสารยึดติด ความสามารถในการไหลแผ่ (wetting ability) พลังงานพื้นผิว (surface energy) และความสะอาดพื้นผิว[3] ในขณะที่การยึดติดทางเคมีช่วยต้านการหลุดออกของวัสดุอุดคลองรากฟันโดยเฉพาะในคลองรากฟันส่วนปลาย เช่น การยึดติดกับเนื้อฟันด้วยสมบัติความเป็นกรดอ่อนและการยึดจับทางเคมีระหว่างหมู่อะมิโนของคอลลาเจนกับซีลเลอร์ในกลุ่มอีพอกซีเรซิน[4] การสร้างผลึกอะพาไทต์สะสมภายในท่อเนื้อฟันของซีลเลอร์ในกลุ่มอัลคาไลน์ไบโอเซรามิก (alkaline bioceramic-based sealer) เป็นต้น[5]

เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ (MTA Fillapex; Londrina, Paraná, Brazil) เป็นซีลเลอร์สำหรับอุดคลองรากฟันชนิดไฮบริดไบโอเซรามิก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีทางชีวภาพ มีการไหลแผ่ที่ดี มีการละลายตัวต่ำ ทึบรังสี มีเวลาผสมและก่อตัวที่เหมาะสม มีส่วนประกอบ คือ มิเนอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกต (Mineral trioxide aggregate, MTA) ซาลิไซเลตเรซิน (salicylate resin) บิสมัท (bismuth) และซิลิกา (silica) จากการศึกษาค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ พบว่ามีค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกน้อยกว่าเอเอชพลัสและซีลเลอร์ชนิดไบโอเซรามิกอื่น ๆ[6,7] แต่อย่างไรก็ตามจากสมบัติการไหลแผ่ที่ดีของซีลเลอร์ชนิดนี้ทำให้วัสดุ

สามารถแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟันและแขนงคลองรากฟัน (accessory canal) ได้ ร่วมกับคุณสมบัติที่ดีของเอ็มทีเอในการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสัมผัสกับสารละลายที่จำลองสภาวะของเหลวในร่างกาย (simulated body fluid) อาจมีผลเพิ่มค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของวัสดุได้โดยเฉพาะในรากฟันที่มีปลายรากเปิดกว้าง

ซีลเลอร์สำหรับอุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลองค์ประกอบส่วนยูจินอลสามารถทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุอุดกัตตาเปอร์ชา อย่างไรก็ตามซีลเลอร์ชนิดนี้ไม่สามารถยึดติดกับผนังคลองรากฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมี[8] ทำให้แรงยึดระหว่างซีลเลอร์ชนิดนี้และผนังคลองรากฟันค่อนข้างน้อย จากการศึกษาของ Upadhyay และคณะ[9] ได้ศึกษาการยึดติดของซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลกับผนังคลองรากฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนชนิดส่องกราด พบช่องว่างระหว่างซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลและผนังคลองรากฟันหลายตำแหน่ง ส่งผลให้ซีลเลอร์ชนิดนี้มีแรงยึดกับเนื้อฟันน้อย อีกทั้งซีลเลอร์ชนิดนี้มีการละลายตัวสูงเนื่องจากการระเหยของยูจินอลออกจากซีลเลอร์แมทริกซ์ (sealer matrix) อย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้เกิดการรั่วซึมบริเวณปลายรากฟันได้[10] อย่างไรก็ตามซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลยังคงได้รับการยอมรับ ใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในโรงเรียนทันตแพทย์และโรงพยาบาลในประเทศไทย ซียูซีลเลอร์เป็นตัวแทนของซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลที่มีคุณภาพ น่าเชื่อถือ ใช้งานง่ายและราคาประหยัด

เอเอชพลัส (AH plus; Dentsply, Zurich, Switzerland) เป็นซีลเลอร์สำหรับอุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน มีความต้านทานต่อการหดตัวจากกระบวนการพอลีเมอไรเซชัน (polymerization shrinkage) เนื่องจากปฏิกิริยาแข็งตัวของซีลเลอร์ชนิดนี้ มีการสร้างผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymer) ซึ่งมีเสถียรภาพเชิงมิติสูง[11] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าซีลเลอร์สำหรับอุดคลองรากฟันชนิดเอเอชพลัสมีค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกที่ดีกว่าซีลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์[6] เนื่องจากสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับคอลลาเจนภายในท่อเนื้อฟัน[12] แต่อย่างไรก็ตามเอเอชพลัสเป็นวัสดุที่มีความไวต่อน้ำสูง โดย Roggendorf และคณะ[13] พบว่าการปนเปื้อนของของเหลวบริเวณปลายรากฟันมีผลทำให้เอเอชพลัสเกิดการรั่วซึมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ความท้าทายของการอุดคลองรากฟันที่ปลายรากฟันเจริญไม่สมบูรณ์ หรือมีการละลายของปลายรากฟัน คือการมีรูปลายรากฟันกว้างไม่มีจุดคอดปลายรากฟันตามธรรมชาติ จึงมีโอกาสอุดเกินความยาวที่ต้องการและมีโอกาสเกิดการรั่วซึมของสารน้ำจากเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันได้ง่าย[14] แต่ในกรณีที่รูปลายรากฟันมีขนาดกว้างกว่าปกติไม่มากนัก การควบคุมจุดสิ้นสุดของวัสดุอุดคลองรากฟันสามารถทำได้โดยการใช้แท่งกัตตาเปอร์ชาร่วมกับซีลเลอร์ สำหรับอุดคลองรากฟัน จึงเป็นที่น่าสนใจว่าการเลือกใช้ซีลเลอร์ชนิดใดจะก่อให้เกิดความแนบสนิททางชีวภาพ (biological seal) และส่งผลต่อการยึดติดของกัตตาเปอร์ชาได้ดี การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงพันธะผลักออกของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์กับเอเอชพลัสและซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมฟันตัวอย่าง

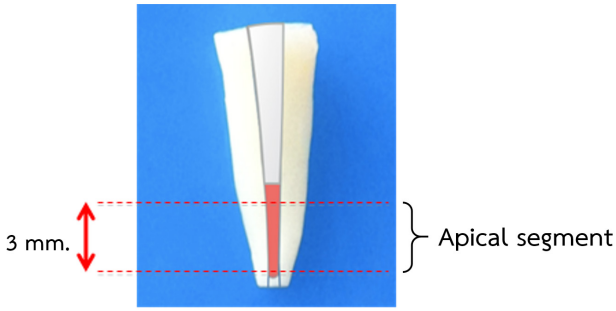
การศึกษานี้ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive sampling) โดยใช้ฟันแท้กรามน้อยสภาพสมบูรณ์ปลายรากปิด จำนวน 45 ซี่ เป็นฟันธรรมชาติที่ถอนจากผู้ป่วยโดยไม่ระบุอายุและเพศ กำหนดเงื่อนไขของฟันที่จะไม่นำมาศึกษาได้แก่ ฟันที่มีรอยผุ รอยร้าว หรือปลายรากฟันเจริญไม่สมบูรณ์ เตรียมลักษณะของแบบจำลองฟันปลายรากเปิดตามวิธีของ Wanapaisarn และคณะ[15] โดยตัดส่วนปลายรากฟันออก 2 มิลลิเมตร ด้วยหัวกรอกากเพชรทรงกระบอก (cylinder diamond bur) ตัดส่วนตัวฟันออกให้ได้ความยาวฟันจากปลายรากฟันถึงส่วนตัวฟัน 14 มิลลิเมตร ขยายคลองรากฟันโดยใช้เครื่องมือโปรเทเปอร์ยูนิเวอร์แซล (Protaper Universal, Dentsply, Ballaigues, Switzerland) ขนาดเอส1 (S1) เอส2 (S2) เอฟ1 (F1) และเอฟ2 (F2) ตามลำดับ ขยายถึงปลายรากฟันโดยใช้ร่วมกับอาร์ซีเพรพ (RC-Prep, Premier, PA, USA) และล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ครั้งละ 2 มิลลิลิตร ล้างคลองรากฟันทุกครั้งที่เปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ขยาย ใช้พีโซรีมเมอร์ (Peeso reamer) ขนาด 1 และ ไฟล์ขนาด 80 ขยายจากทางส่วนตัวฟันจนสุดความยาวรากฟัน เพื่อจำลองลักษณะของฟันที่ไม่มีจุดคอดปลายรากฟันที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ที่ปลายรากฟันเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ถ่ายภาพรังสีเพื่อตรวจสอบรูปร่างและขนาดของคลองรากฟันอีกครั้ง

จากนั้นล้างคลองรากฟันด้วยสารละลายอีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic acid) ความเข้มข้นร้อยละ 17 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที และล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร ฝังรากฟันลงในฟลอรัลโฟม (floral foam) แบ่งรากฟันแบบสุ่มออกเป็นสามกลุ่ม กลุ่มละ 15 ชิ้น ตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้อุดคลองรากฟัน ได้แก่ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เอเอชพลัส และซียูซีลเลอร์ ซีลเลอร์ทุกชนิดผสมตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ทำการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีเลทเทอรัลคอนเดนเซชัน ตัดกัตตา

เปอร์ชาจนถึงระดับ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน หลังจากนั้นปิดด้วยวัสดุอุดชั่วคราว ทำการห่อหุ้มรากฟันทั้งหมดด้วยผ้าก๊อซที่ชื้น เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ100 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้วัสดุแข็งตัวสมบูรณ์ แช่ส่วนปลายรากฟันตัวอย่างทั้งหมดในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffered saline solution) เป็นเวลา 28 วันโดยเปลี่ยนสารละลายทุก 7 วัน

การทดสอบความแข็งแรงพันธะผลักออก

นำรากฟันที่อุดคลองรากฟันแล้วไปฝังในบล็อคเรซิน ให้มีลักษณะตั้งฉากกับฐานของบล็อค วัดโดยเครื่องสำรวจความขนาน (surveyor) ตัดชิ้นงานเฉพาะส่วนปลายรากที่ต้องการศึกษา ให้ได้ความหนาของชิ้นงานที่ทดสอบเท่ากับ 3 มิลลิเมตร (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 *การตัดชิ้นงานจากส่วนปลายรากให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร*
Figure 1 *3-mm thick specimens were cut from apical segment.*

เครื่องตัดชนิดใบเลื่อยกากเพชรความเร็วรอบต่ำ (Low-speed diamond saw, IsoMet 1000 precision saw, Buehler, USA) คัดเลือกชิ้นงานภายใต้กล้องกำลังขยาย 4 เท่า เลือกเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่มีรูปร่างกลมสมมาตร เพื่อให้การกระจายแรงทั่วถึงเท่า ๆ กัน ชิ้นตัวอย่างที่วัสดุอุดคลองรากฟันหลุดออกจากชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ (premature debonding) ชิ้นตัวอย่างที่มีฟองอากาศในส่วนวัสดุอุดคลองรากฟัน หรือมีรอยร้าว จะไม่นำมาทดสอบ นำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบโดยเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine: EZ Test Series, Shimadzu, Kyoto, Japan) เลือกใช้แท่งโลหะไร้สนิมที่มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของคลองรากฟันเป็นตัวกด (plunger) ในแนวตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่างด้วยความเร็วหัวทดสอบ (crosshead speed) 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ทิศทางจากส่วนปลายรากฟันไปทางตัวฟัน (apical to coronal) จนวัสดุหลุดออกจากผนังคลองรากฟัน ค่าแรงกดที่ลดลงแสดงถึงการสูญเสียแรงยึดพันธะ บันทึกค่าแรงที่มากที่สุดก่อนที่วัสดุจะหลุดออกจากผนังคลองรากฟันในหน่วยนิวตัน (Newton; N) นำมาคำนวณค่าความแข็งแรงพันธะในหน่วยเมกะปาสคาล (Megapascal; MPa) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และวิธีการทดสอบของเกมส์โฮเวลล์ (Games- Howell test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

วิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลว (Mode of failure analysis) ของการยึดติด

นำชิ้นงานตัวอย่างที่สูญเสียการยึดติดกับวัสดุอุดคลองรากฟัน มาทำการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด เพื่อสังเกตว่าการแยกของวัสดุอุดคลองรากฟันออกจากผนังคลองรากฟันเกิดขึ้นที่ส่วนใดของวัสดุ โดยจัดแบ่งรูปแบบความล้มเหลวของการยึดติดที่เกิดออกเป็นความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (adhesive failure) คือ การแยกของวัสดุเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซีลเลอร์กับเนื้อฟัน ความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) คือ การแยกของวัสดุเกิดขึ้นภายในเนื้อซีลเลอร์ และความล้มเหลวแบบผสม (mixed failure) คือ การแยกของวัสดุเกิดขึ้นทั้งภายในชั้นของซีลเลอร์และระหว่างชั้นของซีลเลอร์กับเนื้อฟัน

ผลการศึกษา

จากการประเมินค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันสามชนิดกับเนื้อฟันส่วนปลายรากฟัน (ตารางที่ 1) พบว่ากลุ่มเอเอชพลัส มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออกมากที่สุด คือ 1.05 เมกะปาสคาล รองลงมาคือ กลุ่มเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออก 0.29 เมกะปาสคาล และกลุ่มซียูซีลเลอร์มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออกต่ำที่สุด คือ 0.11 เมกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออกของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนชิ้นงานจำแนกตามรูปแบบความล้มเหลวของการยึดติด พบว่าการยึดติดของวัสดุกับผนังคลองรากฟันกลุ่มซียูซีลเลอร์ เกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟมากที่สุด (รูปที่ 2) จำนวน 11 ชิ้นงาน โดยไม่พบความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ กลุ่มเอเอชพลัสพบความล้มเหลวแบบผสม (รูปที่ 3) มากที่สุดจำนวน 9 ชิ้นงาน โดยไม่พบว่าเกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ ส่วนกลุ่มเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์เกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟและแบบผสม (รูปที่ 4) มากที่สุดเป็นจำนวน 7 ชิ้นงานเท่ากัน

ตารางที่ 1 *ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลักออกระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน 3 ชนิด*

Table 1 *Mean push-out bond strengths (MPa ± SD) of the experimental groups.*

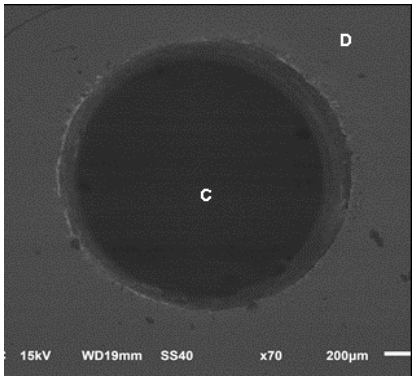
Sealers (n=15)	Push-out bond strength Mean ± SD (MPa)	Minimum (MPa)	Maximum (MPa)
MTA Fillapex	0.29 ± 0.08[a]	0.18	0.42
AH Plus	1.05 ± 0.07[b]	0.61	1.64
CU sealer	0.11 ± 0.03[C]	0.08	0.18

Different superscript letters indicate a significant difference between groups. ($p<0.05$).

ตารางที่ 2 *จำนวนชิ้นงานจำแนกตามความล้มเหลวของการยึดติดของวัสดุ*

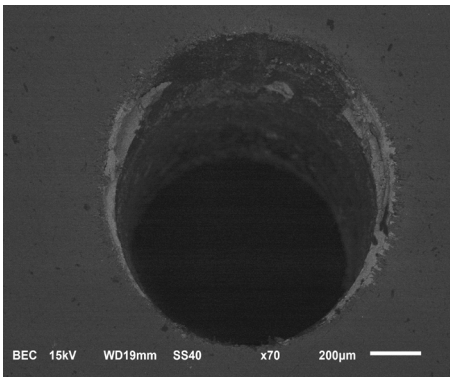
Table 2 *Specimen distribution according to failure mode.*

Sealers (n=15)	Mode of failure (number of specimens)		
	Adhesive	Mixed	Cohesive
MTA Fillapex	7	7	1
AH Plus	0	9	6
CU sealer	11	4	0



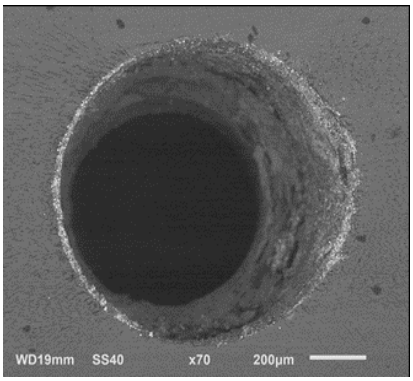
รูปที่ 2 *ความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟในกลุ่มซียูซีลเลอร์*

Figure 2 *Adhesive failure of CU sealer group; D = Dentin, C = Root canal*



รูปที่ 3 *ความล้มเหลวแบบผสมในกลุ่มเอเอชพลัส*

Figure 3 *Mixed failure of AH Plus group; D = Dentin, C = Root canal*



รูปที่ 4 *ความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟในกลุ่มเอเอสพลัส*

Figure 4 *Cohesive failure of AH Plus group; D = Dentin, C = Root canal*

บทวิจารณ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการยึดติดของซีลเลอร์กับผนังคลองรากฟัน ปัจจัยหนึ่งคือ ความสามารถในการไหลแผ่ของซีลเลอร์ การศึกษาของ Tummala และคณะ[4] ศึกษาเปรียบเทียบเอเอชพลัสกับซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์ โดยวัดจากมุมสัมผัส (contact angle) พบว่าเอเอชพลัสมีความสามารถในการไหลแผ่ดีกว่าซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อปรับสภาพผิวเนื้อฟันโดยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับอีดีทีเอความเข้มข้นร้อยละ 17 จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการไหลแผ่ไปบนพื้นผิวเนื้อฟันของเอเอชพลัสมากขึ้นและเพิ่มการยึดติดของวัสดุได้ สอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งได้ทำความสะอาดพื้นผิวของผนังคลองรากฟันด้วยสารละลายอีดีทีเอร้อยละ 17 เพื่อกำจัดชั้นสเมียร์ เพิ่มการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าสู่ท่อเนื้อฟัน มีส่วนส่งเสริมให้ค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของกลุ่มเอเอชพลัสสูงกว่ากลุ่มซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์

สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการไหลแผ่ไปบนผิวเนื้อฟัน แต่มีหลายการศึกษา[16,17] ทดสอบความสามารถแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟัน (sealer penetration) และไม่พบความแตกต่างระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กับซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอเอชพลัส เนื่องจากทั้งสองมีพฤติกรรมการไหลของสารเป็นแบบพลาสติกเทียม (pseudoplastic behavior)[18] ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมของของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงเมื่อได้รับความเค้นเฉือน (shear stress) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อได้รับแรงเฉือนจากการอุดคลองรากฟันแบบเลทเทอรัลคอนเดนเซชัน ทำให้มีค่าความหนืดลดลง ส่งผลให้ซีลเลอร์ทั้งสองชนิดมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟันไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ดีบางการศึกษาพบว่าซีลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ไม่สามารถให้การยึดติดที่มีคุณภาพ[17,19] เนื่องจากไม่เกิดการสะสมของแร่ธาตุที่ควรจะเกิดตามกระบวนการแข็งตัวของสาร ดังการศึกษาของ Tedesco และคณะ[17] ซึ่งศึกษาบริเวณพื้นผิวที่ยึดติดและลักษณะการแทรกซึมของซีลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์เปรียบเทียบกับเอเอชพลัส ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด พบว่าไม่ปรากฏการสะสมของผลึกแร่ธาตุในท่อเนื้อฟันในส่วนที่ยื่นเข้าไปในท่อเนื้อฟันดังกล่าว

Assmann และคณะ[20] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงพันธะผลักออกของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์กับซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอเอชพลัส พบว่ามีค่ามากกว่าการทดลองนี้ โดยมีความแข็งแรงพันธะผลักออกเท่ากับ 2.041 และ 3.034 เมกะปาสคาลตามลำดับ และพบว่ามีค่าความแข็งแรงพันธะและรูปแบบความล้มเหลวของของเอเอชพลัสและเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ไม่ต่างกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Assmann และคณะ[20] ชิ้นงานที่ทดสอบเตรียมจากทุกระดับของคลองรากฟัน ซึ่งแตกต่างจากการศึกษานี้ที่เลือกใช้เฉพาะส่วนปลายราก ซึ่งโครงสร้างและองค์ประกอบมีความแตกต่างจากเนื้อฟันบริเวณคลองรากฟันส่วนต้น[21] ได้แก่ จำนวนท่อเนื้อฟันส่วนใกล้ปลายรากจะค่อย ๆ ลดลง และมีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น บางการศึกษาพบว่ามีลักษณะสเคลอโรติก (sclerotic) โดยจะมีแร่ธาตุสะสมอยู่ในท่อเนื้อฟันมากกว่าส่วนอื่น[22] จากลักษณะดังกล่าว การที่ซีลเลอร์จะแทรกซึมหรือตกตะกอนเป็นผลึกอะพาไทต์ในท่อเนื้อฟันทำได้ไม่ดีนัก ซึ่งอาจมีผลต่อการยึดติดและค่าความแข็งแรงพันธะผลักออก

นอกเหนือจากการยึดติดทางกลที่ได้กล่าวมา ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นอีกกลไกหนึ่งที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงพันธะผลักออก การทดลองนี้พบว่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของเอเอชพลัสมีค่า 1.05 เมกะปาสคาล สูงกว่ากลุ่มเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.29 เมกะปาสคาล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Sagsen[6] และการศึกษาของ Sönmez[7] ทั้งนี้แรงยึดที่สูงอาจเกิดจากซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัสมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนสามารถทำให้เกิดการยึดติดกับเนื้อฟัน โดยการปรับสภาพผิวฟันเพิ่มเติมคล้ายกับสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่พบในซีลเลอร์ประเภทไบโอเซรามิก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง[23] นอกจากนั้นความเป็นกรดอ่อนจากการเตรียมผิวฟันโดยใช้สารละลายอีดีทีเอความเข้มข้นร้อยละ 17 ทำให้เกิดการเผยผึ่งของเส้นใยคอลลาเจนในท่อเนื้อฟันส่งเสริมการเกิดการยึดจับทางเคมีระหว่างหมู่อะมิโนของคอลลาเจนกับอีพอกซีเรซินได้[4]

สำหรับการยึดติดของซีลเลอร์ในกลุ่มเอ็มทีเอ คาดหวังให้มีค่าแรงยึดที่สูงจากการสร้างผลึกอะพาไทต์สะสมภายในท่อเนื้อฟันเมื่อสัมผัสกับสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ดังเช่นการศึกษาของ Huffmann และคณะ[5] เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงพันธะระหว่างเอเอชพลัสกับโปรรูทเอนโดซีลเลอร์ พบว่าทำให้ค่าแรงในการต้านการหลุดออกของโปรรูทเอนโดซีลเลอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนแช่ในสารละลายและมีค่ามากกว่าเอเอชพลัสอย่างมีนัยสำคัญ และพบการสะสมของแคลเซียมฟอสเฟตสะสมระหว่างผิวของเนื้อฟันและชั้นซีลเลอร์ อย่างไรก็ดีการศึกษาข้างต้นศึกษาโดยการเจาะรูบนแผ่นเนื้อฟันที่ตัดตามแนวยาว (longitudinal tooth slabs) อุดโดยใช้ซีลเลอร์เพียงอย่างเดียวไม่ใช้กัตตาเปอร์ชา เมื่อแช่แผ่นฟันในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซีลเลอร์จะมีโอกาสสัมผัสสารละลายมากกว่าการศึกษานี้ จึงอาจเกิดการสะสมผลึกอะพาไทต์ใน

ท่อเนื้อฟันได้ดีกว่า นอกจากนั้นโปรรูทเอนโดซีลเลอร์มีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมอะลูมิเนต คล้ายกับเอ็มทีเอ จึงให้ค่าแรงยึดสูง แต่สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์นั้น ประกอบด้วยสารดังกล่าวในอัตราส่วนที่น้อยกว่าและมีซาลิไซเลตเรซินเป็นส่วนประกอบด้วย ทำให้ค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการศึกษาของ Huffmann และคณะ[5] นอกจากนั้นมีการศึกษาพบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีการละลายตัวมากกว่าเอเอชพลัสโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 1 สัปดาห์[24]

การศึกษานี้พบว่าซียูซีลเลอร์ให้ค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกต่ำที่สุด โดยการยึดติดของซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลเกิดจากส่วนยูจินอลทำปฏิกิริยากับส่วนซิงค์ออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกัตตาเปอร์ชา และทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายทำให้กัตตาเปอร์ชาอ่อนตัว แต่ซีลเลอร์ชนิดนี้ไม่สามารถยึดติดกับผิวของผนังคลองรากฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกล[8] ทำให้แรงยึดระหว่างพื้นผิวดังกล่าวน้อย นอกจากนั้นยูจินอลที่ผสมอยู่ในซีลเลอร์ชนิดนี้อาจมีผลยับยั้งปฏิกิริยาพอลีเมอไรเซชันของเรซินที่เป็นส่วนประกอบในเรซินซีเมนต์ หรือวัสดุก่อแกนฟันที่ใช้ในการยึดเดือยฟันได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Aleisa K และคณะ[25] พบว่าซีลเลอร์ ที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นยูจินอล ทำให้ค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของเดือยฟันสำเร็จรูปที่ยึดด้วยเรซินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Wanapaisarn และคณะ[15] ซึ่งเปรียบเทียบความสามารถในการผนึกของซีลเลอร์ชนิดเดียวกัน โดยที่เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์และซียูซีลเลอร์มีความสามารถในการผนึกน้อยกว่าเอเอชพลัส มีความเป็นไปได้ว่าในกลุ่มซีลเลอร์ที่มีเรซินเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอีพอกซีเรซินซึ่งมีเสถียรภาพเชิงมิติที่ดีหากมีการปรับสภาพพื้นผิว จะมีผลส่งเสริมทั้งในแง่ของการยึดติดและความแนบสนิท ได้[26,27,28] อย่างไรก็ดีการทดสอบความแข็งแรงพันธะ เป็นการศึกษาการยึดติดของวัสดุในภาวะพลวัต อาจไม่สามารถอ้างอิงไปยังสมบัติด้านความแนบสนิทของวัสดุได้ทุกกรณี[29] และไม่มีค่ามาตรฐานชี้วัดว่าความแข็งแรงพันธะระดับใด จึงเพียงพอในการต้านการหลุดออกของวัสดุที่เกิดจากความเครียดทางกลที่มากระทำ การศึกษาในห้องปฏิบัติการนี้จึงทำได้เพียงเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกของซีลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์กับซีลเลอร์ที่เป็นที่ยอมรับในด้านสมบัติของวัสดุและให้ผลสำเร็จทางคลินิกที่ดี

สำหรับการศึกษานี้ใช้การทดสอบความแข็งแรงพันธะผลักออกเพื่อประเมินคุณสมบัติการยึดติด เนื่องจากหลีกเลี่ยงการเกิดความล้มเหลวของพันธะก่อนการทดสอบ ซึ่งพบได้บ่อยในวิธีการศึกษาแบบไมโครเทนไซล์[29] นอกจากนั้นการเตรียมชิ้นงานทำได้ง่าย สามารถจำลองลักษณะทางคลินิกทั้งในด้านความหนาแน่นและการเรียงตัวของท่อเนื้อฟัน[30] ความหนาของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ศึกษาในการศึกษาที่ผ่านมามีตั้งแต่ 0.6-7.0 มิลลิเมตร[32,33] ซึ่งจากการทำการศึกษานำร่องพบว่าหากชิ้นงานบางกว่า 3 มิลลิเมตร มักเกิดการหลุดของวัสดุอุดคลองรากฟันออกจากผนังคลองรากฟันก่อนการทดสอบ

การศึกษานี้ลักษณะคลองรากฟันที่ได้จากการเตรียมเพื่อการทดลองมีขนาดใหญ่ คลองรากฟันมีหน้าตัดกลมเท่ากันและคลองรากฟันค่อนข้างตรง ทำให้สามารถควบคุมให้ขั้นตอนการเตรียมและการล้างคลองรากฟันทำได้อย่างทั่วถึง การล้างคลองรากฟันในคลินิกนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ล้างครั้งสุดท้ายหลังจากล้างด้วยอีดีทีเอ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรียสารที่เป็นส่วนประกอบในชั้นสเมียร์และเพื่อฆ่าเชื้อผ่านปฏิกิริยาคลอรินเนชัน (chlorination reaction) แต่ปฏิกิริยาคลอรินเนชันจะทำลายคอลลาเจนซึ่งเป็นโปรตีนในท่อเนื้อฟัน มีผลเสียต่อการสร้างพันธะเคมีของวงแหวนอีพอกไซด์ (epoxide rings) ในซีลเลอร์เอเอชพลัสกับหมู่อะมิโนของคอลลาเจน ทำให้การยึดติดของซีลเลอร์กับผนังคลองรากฟันด้อยลง ในการศึกษานี้จึงไม่ใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ แต่ใช้น้ำกลั่นล้างเป็นตัวสุดท้าย เพื่อกำจัดฤทธิ์ตกค้างของอีดีทีเอที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรงพันธะ ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติโดยทั่วไปในการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแรงพันธะ[6,7,32]

แบบจำลองฟันปลายรากเปิดในการศึกษานี้มีความกว้างของรูปลายรากฟันเท่ากับขนาด 80[34] ซึ่งในขั้นตอนการลองกัตตาเปอร์ชาแท่งหลัก พบว่ามีแรงต้านบริเวณปลายรากที่แน่นสามารถควบคุมจุดสิ้นสุดของวัสดุอุดคลองรากฟันได้ และมีการยืนยันจุดสิ้นสุดของการอุดคลองรากฟันโดยการถ่ายภาพรังสี การอุดคลองรากฟันด้วยวิธีเลทเทอรัลคอนเดนเซชันมีข้อดีในเรื่องการควบคุมตำแหน่งของกัตตาเปอร์ชา มีต้นทุนประสิทธิผล (cost-effectiveness) ดี และเป็นวิธีที่ให้ผลสำเร็จทางคลินิกดี วิธีดังกล่าวเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ได้ดีกับซีลเลอร์ทั้งสามชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษา โดยหากสามารถลองกัตตาเปอร์ชาแท่งหลักได้แน่นในคลองรากฟัน จะสัมพันธ์กับการมีความแนบสนิทที่ดีบริเวณปลายรากฟัน[35]

ในด้านรูปแบบความล้มเหลวของการยึดติดวัสดุ พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ส่วนใหญ่เกิดความล้มเหลวระหว่างชั้นซีลเลอร์กับเนื้อฟัน และแบบผสม สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Sönmez[7] ซึ่งศึกษาในเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เอเอชพลัส และโปรรูทเอนโดซีลเลอร์ พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์เกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟและความล้มเหลวแบบผสมในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน ขณะที่ซีลเลอร์กลุ่มเอเอชพลัสไม่พบความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟเลย รูปแบบความล้มเหลวของการยึดติดจากผลการศึกษาครั้งนี้มีความ

สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงพันธะผลักออก โดยหากวัสดุให้ค่าแรงต้านทานการหลุดออกต่ำจะมีแนวโน้มที่จะเกิดความล้มเหลวระหว่างชั้นซีลเลอร์กับเนื้อฟัน ดังจะเห็นได้จากซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลพบเกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟเป็นส่วนใหญ่แสดงให้เห็นชัดเจนว่าซีลเลอร์ดังกล่าวไม่สามารถให้การยึดติดที่ดีกับเนื้อฟัน ขณะที่ซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัสซึ่งมีค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกมากที่สุด พบว่าเกิดความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟภายในชั้นซีลเลอร์ สอดคล้องกับการยึดติดที่ดีกับผนังคลองรากฟัน

การศึกษาความแข็งแรงพันธะผลักออกเป็นเพียงวิธีหนึ่งในการประเมินคุณสมบัติการยึดติดของวัสดุ ซึ่งยังไม่มีรูปแบบการศึกษาใดที่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ข้อจำกัดของการศึกษาในห้องปฏิบัติการคือ การไม่สามารถจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริงทางคลินิกได้ทั้งหมด ค่าแรงที่วัดได้อาจมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ค่าแรงเสียดทานจากผนังคลองรากฟัน โดยอ้างอิงจากการขยายตัวของปัวซองส์ (Poisson's expansion) เมื่อวัสดุด้านหนึ่งถูกบีบอัดฝั่งที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากจะมีการขยายตัว ดังนั้นเมื่อหัวทดสอบกดลงในวัสดุ แรงที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุหลุดออกจากคลองรากฟันจะเพิ่มขึ้น[30] นอกจากนั้นการที่โครงสร้างและองค์ประกอบของเนื้อฟันมีความแตกต่างกัน จึงทำให้ชิ้นงานที่ศึกษามีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous)[36] จากคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงพันธะของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์พบว่าให้ค่าที่ด้อยกว่าเอเอชพลัส แต่มีสมบัติที่ดีกว่าซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์ ทั้งนี้การพิจารณาแต่เพียงด้านเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งชี้ได้ว่าซีลเลอร์ใดสามารถนำไปใช้งานทางคลินิกได้ดี ที่ผ่านมามีการศึกษาด้านสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ประเมินการรั่วซึม การตรวจวัดช่องว่างระหว่างวัสดุกับเนื้อฟัน ผลของน้ำยาล้างคลองรากฟัน เป็นต้น หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านอื่น เช่น การวิเคราะห์แร่ธาตุที่เกิดขึ้นจริงในเชิงปริมาณและคุณภาพเมื่อสัมผัสกับสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟสบัฟเฟอร์ ระดับความชื้นในคลองรากฟันที่จะเหมาะสมต่อการใช้งาน การนำไปใช้ในงานในรูปแบบอื่น เช่น การปิดเนื้อเยื่อในโดยตรง และการประเมินผลสำเร็จจากการใช้งานทางคลินิกจะทำให้มีข้อมูลจากการศึกษาเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการทบทวนอย่างเป็นระบบและการวิเคราะห์อภิมาน จะเป็นประโยชน์ต่อเลือกใช้วัสดุมากยิ่งขึ้น

บทสรุป

ภายใต้ข้อจำกัดของการศึกษาในห้องปฏิบัติการนี้ การใช้เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ซึ่งเป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมิเนอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกต มีค่าความแข็งแรงพันธะผลักออกน้อยกว่าเอเอชพลัส แต่มากกว่าซียูซีลเลอร์ ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

เอกสารอ้างอิง

1. Munoz HR, Saravia-Lemus GA, Florian WE, Lainfiesta JF. Microbial leakage of Enterococcus faecalis after post space preparation in teeth filled *in vivo* with RealSeal versus Gutta-percha. ***J Endod*** 2007;33(6):673-5.

2. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Orstavik D. The effects of dentine pretreatment on the adhesion of root-canal sealers. ***Int Endod J*** 2002;35(10):859-66.

3. Powers JM, Pfeifer CS. Fundamentals of Materials Science; In: Powers JM, Sakaguchi RL, editors. Craig's Restorative dental materials. 13th ed. St Louis: Mosby; 2012. p. 34-81.

4. Tummala M, Chandrasekhar V, Rashmi S, Kundabala M, Ballal V. Assessment of the wetting behavior of three different root canal sealers on root canal dentin. ***J Conserv Dent*** 2012;15(2):109–112.

5. Huffman BP, Mai S, Pinna L, Weller RN, Primus CM, Gutmann JL, *et al.* Dislocation resistance of ProRoot Endo Sealer, a calcium silicate-based root canal sealer, from radicular dentine. ***Int Endod J*** 2009;42(1):34-46.

6. Sagsen B, Ustun Y, Demirbuga S, Pala K. Push-out bond strength of two new calcium silicate-based endodontic sealers to root canal dentine. ***Int Endod J*** 2011;44(12):1088-91.

7. Sonmez IS, Sonmez D, Almaz ME. Evaluation of push-out bond strength of a new MTA-based sealer. ***Eur Arch Paediatr*** 2013;14(3):161-6.

8. Copeland H, Sweeney WT, Forziati AF. Setting reaction of zinc oxide and eugenol. ***J Res Natl Bur Stand*** 1995;55(3):133-8.

9. Upadhyay V, Upadhyay M, Panday RK, Chturvedi TP, Bajpai U. A SEM evaluation of dentinal adaptation of root canal obturation with GuttaFlow and conventional obturating material. ***Indian J Dent Res*** 2011;22(6):1-6.

10. Hauman CH, Love RM. Biocompatibility of dental materials used in contemporary endodontic therapy: a review. Part 2. Root-canal-filling materials. ***Int Endod J*** 2003;36(3):147-60.

11. Noort RV, editors. Introduction to Dental Materials. Sydney: Mosby; 2007.

12. Fisher MA, Berzins DW, Bahcall JK. An *in vitro* comparison of bond strength of various obturation materials to root canal dentin using a push-out test design. ***J Endod*** 2007;33(7):856-8.

13. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R. Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer. ***J Endod*** 2007;33(1):31-3.

14. Prati C, Siboni F, Polimeni A, Bossu M, Gandolfi MG. Use of calcium-containing endodontic sealers as apical barrier in fluid-contaminated wide-open apices. ***J Appl Biomater Funct Mater*** 2014;12(3):263-70.

15. Wanapaisarn S, Sakdee J, Piyachon C. Evaluation of the sealing ability of MTA-based sealer in the simulated immature tooth model. ***Khon Kaen Dent J*** 2017;20(1):51-60.

16. Kok D, Da Rosa RA, Barreto MS, Busanello FH, Santini MF, Pereira JR, *et al.* Penetrability of AH plus and MTA fillapex after

endodontic treatment and retreatment: A confocal laser scanning microscopy study. ***Microsc Res Tech*** 2014;77(6):467-71.
17. Tedesco M, Felippe MC, Felippe WT, Alves AM, Bortoluzzi EA, Teixeira CS. Adhesive interface and bond strength of endodontic sealers to root canal dentine after immersion in phosphate-buffered saline. ***Microsc Res Tech*** 2014;77(12):1015-22.
18. Zhou HM, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng YF, Haapasalo M. Physical properties of 5 root canal sealers. ***J Endod*** 2013;39(10):1281-6.
19. Gurgel-Filho ED, Felipe M, Lima J, Montenegro J, Flávia S, Silva E. Comparative evaluation of push-out bond strength of a MTA-based root canal sealer. ***Braz J Oral Sci*** 2014;13(2):114-17.
20. Assmann E, Scarparo RK, Bottcher DE, Grecca FS. Dentin bond strength of two mineral trioxide aggregate-based and one epoxy resin-based sealers. ***J Endod*** 2012;38(2):219-21.
21. Mjor IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F. The structure of dentine in the apical region of human teeth. ***Int Endod J*** 2001;34:346-53.
22. Paque F, Luder HU, Sener B, Zehnder M. Tubular sclerosis rather than the smear layer impedes dye penetration into the dentine of endodontically instrumented root canals. ***Int Endod J*** 2006;39:18-25.
23. Al-Haddad A, Abu Kasim NH, Che A, Aziz ZA. Interfacial adaptation and thickness of bioceramic-based root canal sealers. ***Dent Mater J*** 2015;34(4):516-21.
24. Elyassi Y, Moinzadeh AT, Kleverlaan CJ. Characterization of Leachates from 6 Root Canal Sealers. ***J Endod*** 2019;45(5):623-27.
25. Aleisa K, AL-Dwairi ZN, Alsubait SA, Morgano SM. Pull-out retentive strength of fiber posts cemented at different times in canals obturated with a eugenol-based sealer. ***J Prosthet Dent*** 2016;116(1):85-90.
26. Stiegemeier D, Baumgartner JC, Ferracane J. Comparison of push-out bond strengths of Resilon with three different sealers. ***J Endod*** 2010;36(2):318-21.
27. Kataoka H, Yoshioka T, Suda H, Imai Y. Dentin bonding and sealing ability of a new root canal resin sealer. ***J Endod*** 2000;26(4):230-5.
28. Leonard JE, Gutmann JL, Gua IY. Apical and coronal seal of roots obturated witha dentine bonding agent and resin. ***Int Endod J*** 1996;29:76–83.
29. Orstavik D, Eriksen HM, Beyer-Olsen EM. Adhesive properties and leakage of root canal sealers *in vitro*. ***Int Endod J*** 1983;16(2):59-63.
30. Pane ES, Palamara JE, Messer HH. Critical evaluation of the push-out test for root canal filling materials. ***J Endod*** 2013;39(5):669-73.
31. Neelakantan P, Subbarao C, Subbarao CV, De-Deus G, Zehnder M. The impact of root dentin conditioning on sealing ability and push-out bond strength of an epoxy resin root canal sealer. ***Int Endod J*** 2011;44:491-8.
32. Ersahan S, Aydin C. Dislocation resistance of iRoot SP, a calcium silicate-based sealer, from radicular dentine. ***J Endod*** 2010;36(12):2000-2.
33. Teixeira CS, Alfredo E, Thome LH, Gariba-Silva R, Silva-Sousa YT, Sousa-Neto MD. Adhesion of an endodontic sealer to dentin and gutta-percha: shear and push-out bond strength measurements and SEM analysis. ***J Appl Oral Sci*** 2009;17(2):129-35.
34. Moore A, Howley MF, O'Connell AC. Treatment of open apex teeth using two types of white mineral trioxide aggregate after initial dressing with calcium hydroxide in children. ***Dent Traumatol*** 2011;27:166–73.
35. Jamleh A, Awawdeh L, Albanyan H, Masuadi E, Alfouzan K. Apical gutta percha cone adaptation and degree of tug-back sensation after canal preparation. ***Saudi Endod J*** 2016;6:131-5.
36. Arola D, Ivancik J, Majd H. Microstructure and mechanical behaviour of radicular and coronal dentin. ***Endod Topics*** 2012;20:30–51.