

การประเมินความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพื้นฐานด้านแรงกดของซีลเลอร์อุตคลองรากฟัน
ชนิดมิเนอร์ลไตรออกไซด์แอกริเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
กันยายน 2559

การประเมินความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพื้นฐานด้านแรงกดของซีลเลอร์อุตคลองรากฟัน
ชนิดมีเนอร์ลัไตรออกไซด์แอกริเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
กันยายน 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การประเมินความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพื้นฐานเร่งรัดของซีลเลอร์อุทคลองรากฟัน
ชนิดมีเนอร์ลไตรออกไซด์แอกริเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
กันยายน 2559

ศิริกุล วนาไพศาล. (2559). การประเมินความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพันธะ
ด้านแรงกดของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมินิเอร์ลัไดรออกไซด์แอกริกเกต
ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ทันตกรรมคลินิก). กรุงเทพฯ:
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:
อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. จารุมา ศักดิ์ดี.

วัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด
ของเอ็มทีเอฟเฟลิกซ์ เปรียบเทียบกับเอเอสพลัสและซียูซีลเลอร์ ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

วัสดุและวิธีการ ศึกษาในฟันกรามน้อยแท้รากเดี่ยวจำนวน 100 ซี่ นำมาเตรียมคลองราก
ฟัน โดยจำลองลักษณะฟันปลายรากเปิด หลังจากนั้นนำมาแบ่งออกเป็นสองการศึกษา

ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบความสามารถในการฝึก ศึกษาโดยแบ่งฟันจำนวน 55 ซี่
ออกเป็น กลุ่มทดลองสามกลุ่มกลุ่มละ 15 ซี่ กลุ่มควบคุมบวมและลบกลุ่มละ 5 ซี่ กลุ่มทดลองแบ่งตาม
ชนิดของ ซีลเลอร์ที่ใช้อุดคลองรากฟัน ได้แก่ ซียูซีลเลอร์, เอเอสพลัส และ เอ็มทีเอฟเฟลิกซ์ ทำการ
อุดคลองราก ฟัน หลังจากแช่ชิ้นงานทั้งหมดในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นเวลา 28 วัน
นำชิ้นส่วน รากฟันมาประกอบเข้าสู่แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน ซึ่งเป็นการวัดการรั่วซึมของ
โปรตีนโบรไวน์ เซรัมอัลบูมิน โดยการทำปฏิกิริยากับแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์ และนำไปผ่าน
เครื่องวัดความเข้มของ แสง ค่าวนเป็นหน่วยร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร ที่เวลา 1, 8, 15 และ 28 วัน

ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด ศึกษาโดยแบ่งฟันจำนวน 45 ซี่
ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของซีลเลอร์ข้างต้น หลังจากทำการอุดคลองรากฟันและแช่ชิ้นงานในสาร
ละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นเวลา 28 วัน ส่วนรากฟันจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวแกนฟัน เพื่อให้
ได้ชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาทดสอบความแข็งแรงของพันธะด้านแรงกดโดยเครื่อง
ทดสอบสากล นำชิ้นงานที่สูญเสียการยึดติดกับวัสดุอุดคลองรากฟัน มาทำการศึกษาภายใต้กล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการศึกษา

ตอนที่ 2 ซียูซีลเลอร์มีการรั่วซึมมากที่สุด ขณะที่เอเอสพลัสพบมีการรั่วซึมน้อยที่สุด ตลอด
ระยะเวลาที่ศึกษา การรั่วซึมของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นตามเวลา อย่างมีนัยสำคัญ
ทางสถิติ ($p < 0.05$) วันที่ 8, 15 และ 28 ระดับการรั่วซึมของโปรตีน ในกลุ่มซียูซีลเลอร์ และกลุ่มเอ็มทีเอฟ
เฟลิกซ์ ไม่แตกต่างกัน ขณะที่พบการรั่วซึมน้อยที่สุดในกลุ่มเอเอสพลัส

ตอนที่ 1 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะด้านแรงกดสูงสุด คือ เอเอสพลัส รองลงมาคือ เอ็มทีเอฟ
เฟลิกซ์ และกลุ่มซียูซีลเลอร์ มีความแข็งแรงพันธะน้อยที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุป เอ็มทีเอฟเฟลิกซ์ ซึ่งเป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมินิเอร์ลัไดรออกไซด์
แอกริกเกต มีความสามารถในการฝึก และความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด น้อยกว่าเอเอสพลัสใน
แบบจำลองฟัน ปลายรากเปิด

AN EVALUATION OF THE SEALING ABILITY AND PUSH-OUT BOND STRENGTH OF
MTA-BASED SEALER IN SIMULATED IMMATURE ROOT MODEL

AN ABSTRACT
BY
SIRIKUL WANAPAISARN



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Clinical Dentistry
at Srinakharinwirot University

September 2016

Sirikul Wanapaisarn. (2016). *An evaluation of the sealing ability and push-out bond strength of MTA-based sealer in a simulated immature root model*. Thesis, M.S. (Clinical Dentistry). Bangkok: Graduate School, Srinakarinwirot University.
Advisor Committee: Dr. Jaruma Sakdee.

Objective: The purpose of this study was to compare the sealing ability and push-out bond strength of MTA Fillapex to AH Plus and CU Sealer in simulated immature root model.

Methods: Immature tooth models were created from one hundred extracted premolars and randomly divided into two parts

Part 1 Fifty-five premolars were randomly divided into three groups of fifteen each. Root canals were obturated with gutta-percha and one of the following sealers: CU Sealer, AH Plus and MTA Fillapex. Five roots were served as positive controls with no sealer used and five roots with complete coverage of nail varnish were negative controls. After immersion in phosphate buffered saline for twenty eight days, all specimens were composed in BSA protein leakage models. The amount of BSA leaked through the root canal was measured with spectrophotometer on day one, eight, fifteen and twenty eight.

Part 2 Forty-five premolars were divided equally into three groups on the basis of sealer type and obturated with the same method as part one. After immersion in phosphate buffered saline for twenty eight days, the roots were cut perpendicular to the long axis to create three-mm thick slices from the apical thirds. The bond strength was measured with a universal testing machine. Failure modes after push-out were examined under scanning electron microscopy.

Results:

Part 1 Throughout the experimental period, CU Sealer showed the highest mean cumulative BSA leakage, whereas AH Plus had the least. The significant differences were observed between three experimental groups at all time intervals. ($p < 0.05$). On day eight, fifteen and twenty eight, AH Plus produced a significantly superior seal when compared with CU Sealer and MTA Fillapex ($p < 0.05$).

Part 2 Mean push-out bond strength values were ranked from highest to lowest mean as follows: AH Plus, MTA Fillapex, CU Sealer. Statistically significant differences were found among all groups ($p < 0.05$).

Conclusions: Within the limitations of simulated immature root model in this in vitro study, MTA-based sealer shows lower sealing ability and lower bond strength than AH Plus.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
เงินรายได้โรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2558

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินความสามารถในการฝึกและความแข็งแรงพื้นฐานของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน
ชนิดมิเนอร์ลไตรออกไซด์เอกกรีเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

ของ

ศิริกุล วนาไพศาล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

วันที่ เดือน กันยายน พ.ศ. 2559

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลัก

.....ประธาน

(อาจารย์ ทพญ. ดร. จารุมา ศักดิ์ดี)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. ดร.วรรณณะ สัตตบรรณสุข)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ทพญ. ดร. จารุมา ศักดิ์ดี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ.ดร.ภาวิณีย์ ปฏิพัทธ์วุฒิกุล ดิตรอน)

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ทนตแพทย์หญิง ดร.จรรุมา ศักดิ์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทนตแพทย์หญิง ชินาลัย ปิยะชน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ที่จะนำมาใช้เป็นแนวคิดในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง กรรมการทุกท่านในการให้คำแนะนำที่มีประโยชน์และแก้ไขวิทยานิพนธ์ บุคลากรประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาโอสถวิทยา คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และนางกนกพร สุขยานันท์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือในการวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ทำยนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ทุกคนในครอบครัว และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ศิริกุล วนาไพศาล

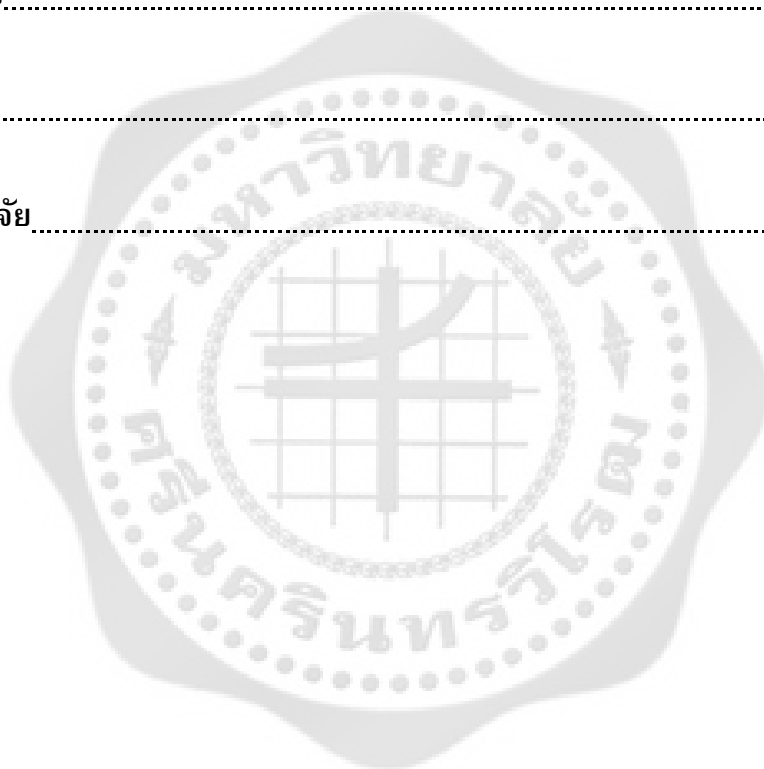


สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	2
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
สมมติฐานในการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทบาทของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน.....	5
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล.....	6
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน.....	8
มีเนอรัลไตรออกไซด์แอกริกเกต และมีเนอรัลไตรออกไซด์แอกริกเกต ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์.....	10
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมีเนอรัลไตรออกไซด์แอกริกเกต.....	11
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ในพื้นที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง.....	13
การทดสอบด้านการรั่วซึม.....	17
การทดสอบความแข็งแรงพันธะ.....	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	25
การเลือกกลุ่มตัวอย่างและการคำนวณขนาดตัวอย่าง.....	27
ขั้นตอนการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	28
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	36
4 ผลการวิจัย.....	37
ตอนที่ 1 ผลการทดสอบการรั่วซึมโดยใช้แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน.....	37
ตอนที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด.....	41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 อภิปรายผล และสรุปผลการวิจัย	44
อภิปรายผล	44
สรุปผลการวิจัย	51
ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	63
ประวัติย่อผู้วิจัย	73



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 องค์ประกอบของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	11
2 การศึกษาด้านความสามารถในการผนึก (Sealing ability) ของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	15
3 การศึกษาด้านความแข็งแรงของพันธะ (bond strength test) ของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	16
4 องค์ประกอบของซีลเลอร์และบริษัทผู้ผลิต.....	26
5 การแบ่งกลุ่มทดลองตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้.....	29
6 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้.....	33
7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ของซีลเลอร์ แต่ละชนิด ในช่วงเวลาต่างๆ.....	39
8 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน 3 ชนิด.....	41
9 อัตราส่วนร้อยละของผลการพิจารณารูปแบบการเสียหายของวัสดุ.....	42
10 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยการรั่วซึมของโปรตีนของซีลเลอร์ 3 ชนิด ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	64
11 ค่าเฉลี่ยอันดับ (Mean rank) ของซีลเลอร์ทั้งสามชนิด เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึม.....	65
12 สถิติทดสอบครัสคัล-วอลลิส (Kruskal-Wallis Test) เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึม ชนิดซีลเลอร์ ที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน.....	67
13 สถิติทดสอบฟรีดแมน (Friedman test) เปรียบเทียบการรั่วซึมของซีลเลอร์ ของซีลเลอร์ทั้งสามชนิด.....	66
14 สถิติทดสอบฟรีดแมน (Friedman test) เปรียบเทียบการรั่วซึมของซีลเลอร์ ชนิดเอเอชพลัสที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน.....	66
15 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึม ระหว่างซีลเลอร์ชนิดซีลเลอร์ และ เอเอชพลัส.....	67
16 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดซีลเลอร์ และ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	67
17 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส และ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	68
18 ค่าเฉลี่ยและผลรวมอันดับ เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่างซีลเลอร์ชนิดซีลเลอร์ และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	68
19 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดซีลเลอร์ และ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์.....	69

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
20 ค่าเฉลี่ยและผลรวมอันดับ เพื่อเปรียบเทียบการร่วซึมระหว่างซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส และเอ็มทีเอฟีลาเพกซ์.....	69
21 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการร่วซึม ระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส และเอ็มทีเอฟีลาเพกซ์.....	70
22 การทดสอบการแจกแจงของประชากรโดยใช้สถิติ โคโมโกรอฟ-สเมอรนอฟ (Kolmogorov-Smirnov test).....	71
23 การทดสอบความแปรปรวนของประชากรโดยใช้สถิติเลวิน (Levene's test).....	72
24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลึกออก โดยใช้สถิติ ANOVA.....	72
25 การเปรียบเทียบรายคู่ (Multiple Comparisons) ภายหลังการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้สถิติเกมส์-โฮเวลล์ (Games-Howell's test).....	72

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวคิดการวิจัย	4
2 ปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation reaction) ของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล	7
3 กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization) ของเอเอชพลัส	8
4 กระบวนการคอมเพลกเซชัน (complexation reaction) ของวัสดุ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์	12
5 แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน	21
6 แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด	23
7 ฟันที่มีลักษณะเป็นไปตามเกณฑ์การคัดเลือก	27
8 การสร้างแบบจำลองฟันที่มีลักษณะปลายรากเปิด	29
9 ตัวอย่างกราฟแสดงความเข้มข้นมาตรฐาน จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย BSA	31
10 แบบจำลองการทดสอบการรั่วซึมของโปรตีน	32
11 การใช้เครื่องสำรวจความหนาวัด รากฟันที่ได้รับการอุดแล้ว ก่อนทำการหล่อแบบ ด้วยเรซิน	33
12 ชิ้นงานหลังทำการหล่อแบบด้วยเรซิน	33
13 แสดงการแบ่งคลองรากฟันออกเป็น 3 ส่วน โดยวัสดุอุดจะอยู่ที่ส่วนปลายราก	34
14 ลักษณะชิ้นงานและการทดสอบความแข็งแรงของพันธะ	35
15 ลักษณะสารละลายจากภาชนะส่วนล่างหลังทำปฏิกิริยากับแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์	37
16 กราฟแบบกล่องแสดงค่าความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้	40
17 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซียูซีลเลอร์ แสดงความล้มเหลว แบบแอตชีฟ	42
18 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซียูซีลเลอร์ แสดงความล้มเหลว แบบผสม	43
19 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซียูซีลเลอร์ แสดงความล้มเหลว แบบโคอีชีฟ	43

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ความสำเร็จของการรักษาทางเอนโดดอนติกส์ ขึ้นกับปัจจัยพื้นฐานสามประการ ประกอบด้วย การทำความสะอาดภายในคลองรากฟันอย่างทั่วถึง, การทำให้ภายในคลองรากฟันปราศจาก เชื้อและการอุดอย่างแนบสนิท จากรายงานการศึกษาพบว่า 58% ของการรักษาที่ล้มเหลวเกิดจา การอุดคลองรากฟันที่ไม่สมบูรณ์ ⁽¹⁾ ดังนั้นวัสดุอุดคลองรากฟันในอุดมคติ ควรสามารถปิดช่องว่างที่มีในคลองรากฟัน เพื่อดำเนินการผ่านเข้ามาของเชื้อแบคทีเรียภายในช่องปาก สามารถปิดผนึกเชื้อที่อาจยังหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟัน และสามารถหยุดการแทรกซึมของของเหลว บริเวณรอบปลายรากได้ (fluid-tight seal)⁽²⁾ เพื่อให้เกิดภาวะที่เหมาะสมต่อการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันสำหรับในฟันที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง (wide apex) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการขยายคลองรากฟันเกิน (over-instrumentation), การหยุดการเจริญพัฒนา หรือเกิดการละลายของปลายราก ขณะที่ยังเจริญไม่สมบูรณ์ บริเวณส่วนปลายของรากฟันดังกล่าวจะพบว่าเป็นส่วนที่มี ลักษณะแตกต่างกับส่วนอื่นของคลองราก เนื่องจากต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์ และสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง ตลอดเวลา⁽³⁾ ซึ่งจะส่งผลต่อความแนบสนิท ของการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีการใช้กัตตาเปอร์ชา ร่วม กับซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน (root canal sealer)

ซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (Zinc oxide eugenol-based sealer) เป็นซีลเลอร์ที่ได้รับการยอมรับ และ ยังคงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน แต่ซีลเลอร์ชนิดดังกล่าวมี ข้อเสีย คือ การไม่ยึดติด (nonadhesion) กับเนื้อฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมี⁽⁴⁾, ค่าความแข็งแรงพันธะ ของซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับซีลเลอร์ชนิดอื่น มีเวลาการก่อตัว (setting time) ที่ยาวนาน และมี การละลายตัว (solubility) สูง จากการศึกษาคุณสมบัติ ด้านเคมีกายภาพ (physicochemical properties) พบว่าซีลเลอร์ ดังกล่าว มีการละลายตัวสูง จากการระเหยของยูจีนอลออกจากซีลเลอร์แมทริกซ์ (sealer matrix) ในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง⁽⁵⁾ เป็นผลให้เกิดการรั่วซึม บริเวณปลายราก และยังส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์อีกด้วย Upadhyay และคณะในปี 2011⁽⁶⁾ ได้ศึกษาการยึดติด (adhesion) และความแนบสนิทของซีลเลอร์ ชนิดซิงค์ออกไซด์กับเนื้อฟัน (dental adaptation) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่อง กรดพบมีช่องว่างเกิดขึ้นหลายตำแหน่ง และสรุปว่าซีลเลอร์ดังกล่าวไม่สามารถให้ความแนบสนิท ที่ดีได้

สำหรับซีลเลอร์ชนิดอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin-based sealer) จากการศึกษาพบว่าเอเอชพลัส มีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมาะสมนอกจากในด้านเสถียรภาพเชิงมิติแล้ว ยังมีความทึบรังสี (radiopacity) สูง การละลายตัว (solubility) ต่ำอีกด้วย⁽⁷⁻⁹⁾ วัสดุดังกล่าวถูกพัฒนาให้มีคุณสมบัติยึดติดกับเนื้อฟันภายในคลองรากได้ ให้ความแนบสนิทที่ดี อย่างไรก็ตามยังคงจัดเป็นวัสดุที่มีความไวต่อน้ำสูง (water-sensible endodontic materials) Roggendorf และคณะ⁽¹⁰⁾ พบว่าการปนเปื้อน ของของเหลวบริเวณส่วนปลายรากฟันมีผลทำให้ เอเอชพลัสมีการรั่วซึมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การเลือกใช้ซีลเลอร์ที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและมีสมบัติชีวกัมมันต์ (bioactive) อาจมีผลให้เกิดความแนบสนิทที่ดีในพื้นที่มีลักษณะปลายรากเปิดและมีความชื้นสูง ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งมาปิดปลายราก ตลอดจนกระตุ้นให้เกิดการสร้างใหม่ของเนื้อเยื่อรอบปลายรากได้⁽¹¹⁾ จากคุณสมบัติที่ดีหลายประการของ มินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีคุณสมบัติส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง (mineralized tissue) กระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อฟันและกระดูก (dentinogenic and osteogenic activity) และสามารถปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อสัมผัสกับสารละลายที่จำลองสภาวะของเหลวในร่างกาย (simulated body fluid)⁽¹²⁾ ซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกตจึงได้ถูกผลิตขึ้น มีรายงานพบว่าซีลเลอร์ดังกล่าว สามารถกระตุ้นให้เกิดการสะสมของแร่ธาตุ และสร้างผลึกอะพาไทต์ (apatite-like crystalline) ได้ตลอดผนังคลองรากฟันส่วนกลางและส่วนปลายรากฟัน⁽¹³⁾ Huffman และคณะ⁽¹⁴⁾ เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดของโปรรูทเอนโดซีลเลอร์ (ProRoot Endo Sealer) ซึ่งเป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกต พบว่ามีค่าสูงกว่าซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซินและมีความสามารถในการผนึกเทียบเท่ากับซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซินเมื่อศึกษาโดยใช้วิธีการซึมผ่านของของเหลว (fluid filtration)⁽¹³⁾

ดังนั้นจากคุณสมบัติดังกล่าว จึงคาดหวังให้ การใช้งานเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ซึ่งเป็นซีลเลอร์ชนิดมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกตที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ในพื้นที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง จะทำให้เกิดความแนบสนิททางชีวภาพ (biologic sealing) ลดการรั่วซึมบริเวณปลายราก และให้การยึดติดที่ดีกับผนังคลองรากฟัน

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึมของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล, อีพอกซีเรซิน และมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล, อีพอกซีเรซิน และมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกต โดยใช้กัตตาเปอร์ชาเป็นวัสดุอุดคลองรากฟัน ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด

ความสำคัญของการวิจัย

อุปสรรคของการอุดคลองรากฟันเพื่อให้เกิดความแนบสนิทที่ดี ในฟันปลายรากเปิด คือการมีความชื้นบริเวณรอบปลายรากฟัน และปลายรากฟันที่กว้าง ทำให้มีพื้นที่ที่ต้องการการผนึกที่มากขึ้น ขณะที่ความแนบสนิทดังกล่าว เป็นปัจจัยหลักที่จะเอื้ออำนวยให้เกิดการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน ดังนั้น ซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดมินเอร์อัลไตรออกไซด์แอกริกเกต ซึ่งมีข้อดีในด้านเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ สามารถก่อดัวได้ในภาวะที่มีความชื้น และมีสมบัติชีวกัมมันต์ จะส่งผลพัฒนาให้การอุดคลองรากฟันในฟันปลายรากเปิด มีความแนบสนิทและการยึดติดที่ดี กับผนังคลองรากฟันได้

ขอบเขตของการวิจัย

เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ในห้องปฏิบัติการ

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ฟันกรามน้อยแท้ของมนุษย์ที่มีหนึ่งคลองรากฟัน รากตรง มีการสร้างรากฟันสมบูรณ์ ปลายรากปิด รากฟันไม่มีรอยแตก, รอยผุ หรือปลายรากละลาย คลองรากฟันมีทางเปิดคลองราก และรูเปิดปลายรากฟันเพียงรูเดียว โดยระยะจากปลายรากฟันถึงรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟัน และ ผิวเคลือบฟันต้องมีความยาวอยู่ในช่วง 14-16 มิลลิเมตร

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ แบ่งเป็นดังนี้

1.1 ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (CU sealer, คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย)

1.2 ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน (AH Plus™, Dentsply, Zurich, Switzerland)

1.3 ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมิเนอร์อัลไตรออกไซด์แอกกรีเกต (MTA fillapex Angelus, Londrina, PR, Brazil)

2. ตัวแปรตาม ได้แก่

2.1 ปริมาณการรั่วซึมของโปรตีน

2.2 ความแข็งแรงของพันธะต้านแรงกดที่ตำแหน่งปลายรากฟันและ รูปแบบการเสียหายของวัสดุ

นิยามศัพท์เฉพาะ

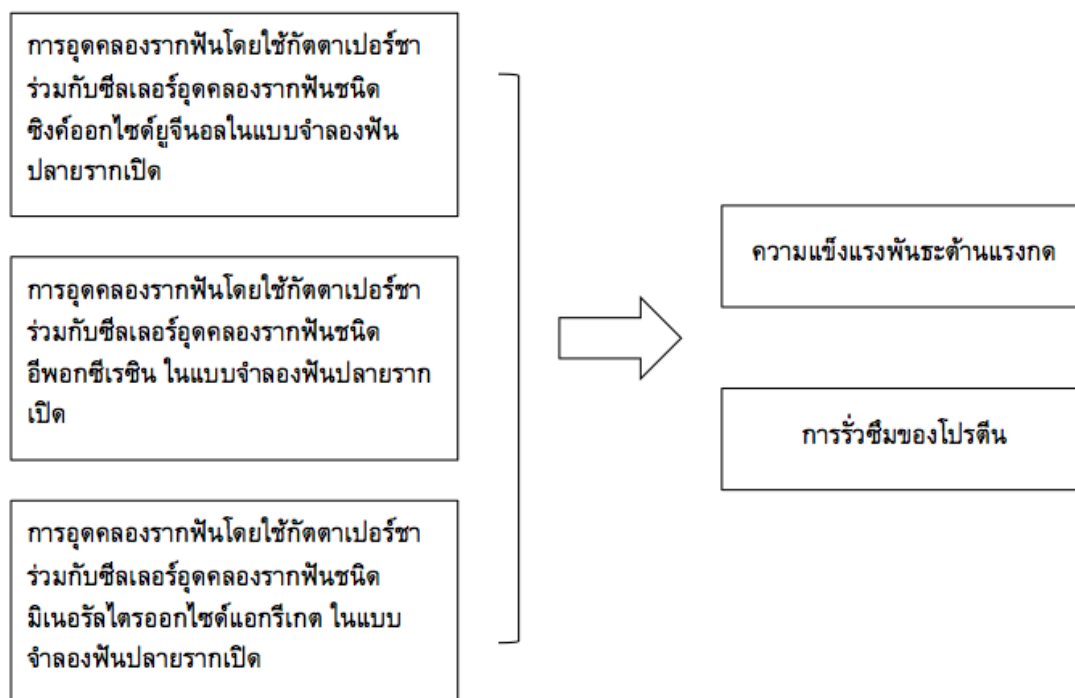
1. **Bond strength** หมายถึง ความแข็งแรงการยึดติด

2. **Push-out test** หมายถึง การทดสอบค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด

3. **Material Failure Modes** หมายถึง รูปแบบการเสียหายของวัสดุ ที่ตรวจพบจากการดูชิ้นเนื้อฟันภายหลังการทดสอบความแข็งแรงพันธะ

4. **Sealing ability** หมายถึง ความสามารถในการผนึก

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

สมมติฐานในการวิจัย

การทดสอบการรั่วซึมโดยใช้แบบจำลองการรั่วซึม

สมมติฐานหลัก (H_0) : ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของโปรตีน ของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล, อีพอกซีเรซิน และมินิเอร์ลัไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด ไม่ต่างกัน

สมมติฐานรอง (H_1) : ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของโปรตีน ของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล, อีพอกซีเรซิน และมินิเอร์ลัไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด แตกต่างกัน

การทดสอบความแข็งแรงพันธะของเนื้อฟัน

สมมติฐานหลัก (H_0) : ค่าความแข็งแรงพันธะด้านแรงกดระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล, อีพอกซีเรซิน และมินิเอร์ลัไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด ไม่ต่างกัน

สมมติฐานรอง (H_1) : ค่าความแข็งแรงพันธะด้านแรงกดระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล, อีพอกซีเรซิน และมินิเอร์ลัไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด แตกต่างกัน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. บทบาทของซิลเลอร้อุดคลองรากฟัน
2. ซิลเลอร้อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล
3. ซิลเลอร้อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน
4. มิเนอร์ลไตรออกไซด์แอกริกเกต และมิเนอร์ลไตรออกไซด์แอกริกเกตในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์
5. ซิลเลอร้อุดคลองรากฟันชนิดมิเนอร์ลไตรออกไซด์แอกริกเกต
6. ซิลเลอร้อุดคลองรากฟัน ในพื้นที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง
7. การทดสอบด้านการรั่วซึม
8. การทดสอบความแข็งแรงพันธะของเนื้อฟัน

บทบาทของซิลเลอร้อุดคลองรากฟัน

เป็นที่ทราบกันดีว่าความสำเร็จของการรักษาทางเอนโดดอนติกส์ ขึ้นกับปัจจัยพื้นฐานสามประการ หรือที่เรียกว่า Endodontic triad ประกอบด้วย การทำความสะอาดภายในคลองรากฟันอย่างทั่วถึง, การทำให้ภายในคลองรากฟันปราศจากเชื้อ และการอุดอย่างสมบูรณ์ โดยมีความมุ่งหมายเพื่อป้องกันและรักษาให้หายจากการอักเสบของโครงสร้างรอบปลายรากฟัน⁽¹⁵⁾ สมาคม ทันตแพทย์คลองรากฟันแห่งสหรัฐอเมริกา (The American Association of Endodontists; AAE) ได้ให้คำจำกัดความ ของการอุดคลองรากฟันว่า “เป็นการเติมเต็มคลองรากฟันตลอดทั้งสามมิติให้ถึงระยะที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเนื้อฟัน (cemento-dentinal junction) มากที่สุด” คุณภาพของการอุดคลองรากฟัน เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพยากรณ์โรค⁽¹⁶⁾ โดย Sundqvist และ Figdor⁽²⁾ ได้กล่าวเกี่ยวกับหน้าที่หลักของวัสดุอุดคลองรากฟัน ได้แก่ มีความแนบสนิทกับผนังคลองรากฟันเพื่อต้านการซึมผ่านเข้ามาของเชื้อแบคทีเรียภายในช่องปาก สามารถปิดผนึกเชื้อแบคทีเรีย ที่อาจยังหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟันและสามารถอุดคลองรากฟันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับที่สามารถป้องกันการสะสมของของเหลว หรือสิ่งที่เป็นแหล่งอาหารของ เชื้อก่อโรคได้ แม้ว่าจะมีการศึกษาจำนวนมากในด้านวัสดุอุดคลองรากฟัน แต่การใช้กัตตาเปอร์ชา ร่วมกับซิลเลอรียังคงเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย

วัสดุกัฏตาเปอร์ชาเพียงอย่างเดียวทำได้เพียงเบียดแนบเข้ากับผนังคลองรากฟัน ไม่สามารถปิดผนึกระบบคลองรากฟันได้ ดังนั้นการใช้วัสดุดังกล่าวร่วมกันจึงมีความจำเป็น โดยกัฏตาเปอร์ชา จะทำหน้าที่ผลักดันให้ซีลเลอร์ไหลแผ่เข้าสู่ช่องว่างที่หลงเหลือภายในคลองรากฟัน และเป็นส่วนที่ สัมผัสกับผนังคลองรากฟัน, เนื้อเยื่อที่อาจหลงเหลือ และอาจรวมถึงเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน เนื่องจาก กัฏตาเปอร์ชาเป็นส่วนที่ของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ (impermeable) หากมีการรั่วซึมเกิดขึ้น จะเกิดระหว่างซีลเลอร์กับส่วนกัฏตาเปอร์ชา หรือซีลเลอร์กับผนังคลองรากฟัน

ลักษณะของซีลเลอร์ที่สมบูรณ์แบบ (Ideal root canal sealer)⁽¹⁷⁾ ได้แก่

1. มีความชื้นเหนียวเมื่อผสม และยึดติด กับผนังคลองรากฟันได้ดี
2. มีระยะเวลาการแข็งตัวที่พอเพียง
3. ให้ความแนบสนิทที่ดีกับผนังคลองรากฟันทุก ๆ ด้าน
4. ทึบรังสีเอกซ์
5. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมิติภายหลังอุดคลองรากฟันแล้ว
6. มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อหรือไม่ส่งเสริมการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย
7. ไม่รบกวนเนื้อเยื่อรอบปลายราก
8. ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือละลายใน tissue fluid
9. ไม่ทำให้ฟันเปลี่ยนสี
10. ทำให้ปราศจากเชื้อได้ง่ายก่อนการนำมาใช้งาน
11. เมื่อมีความจำเป็นจะต้องรื้อออกจากคลองรากฟันได้ง่าย

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ยังไม่มีซีลเลอร์อุดคลองรากฟันใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วน ตามลักษณะซีลเลอร์ที่สมบูรณ์แบบ จึงมีความพยายามในการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าว ระยะเวลาหลังซีลเลอร์ทางเอนโดดอนติกส์หลายชนิดถูกวางจำหน่าย โดยปรับปรุงให้มีความแนบสนิทกับคลองรากฟันมากขึ้น เช่น พัฒนาความสามารถในการยึดติด (adhere) กับผนังคลองรากฟัน ในระดับโมเลกุล เพื่อกำจัดช่องว่างระหว่างวัสดุอุดกับคลองรากหรือใช้วัสดุที่สามารถก่อให้เกิดกิจกรรม ทางชีวภาพ (bioactivity) สามารถสร้างเกิดผลิตภัณฑ์ (product) ใหม่เพื่อซดเซยช่องว่างที่หลง เหลืออยู่ เป็นต้น

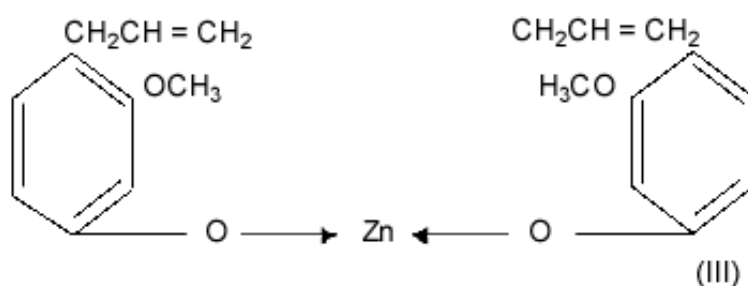
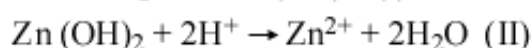
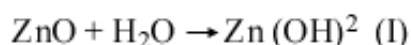
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล

ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลเป็นซีลเลอร์ชนิดดั้งเดิม (conventional root canal sealer) มีต้นแบบมาจาก Grossan's sealer และ Ricket's sealer⁽¹⁷⁾ ถูกนำเสนอ ครั้งแรกในปี 1936 มีการปรับแต่งโดยเติมสารต่าง ๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น องค์ประกอบพื้นฐาน ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นของเหลว คือ ยูจีนอล และส่วนผงคือซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกทำให้ละเอียดเพื่อให้เกิดการไหลแผ่ที่ดี⁽¹⁵⁾ ปฏิกริยาการแข็งตัวของซีลเลอร์ชนิดนี้ คือ ปฏิกริยา คีเลชัน (Chelation reaction)⁽⁴⁾ (ภาพประกอบ 2) เป็นกระบวนการทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างยูจีนอล และซิงค์

ไอออน (Zinc ion) โดยซีลเลอร์ที่แข็งตัวแล้วจะอยู่ในลักษณะของซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ฝังตัวอยู่ในแผ่นเมทริกซ์ของซิงค์ยูจีนโนเลต (zinc eugenolate) ซึ่งมีลักษณะคล้ายผลึก ส่วนเกินของยูจีนโนลจะถูกดูดซึมทิ้งโดยซิงค์ยูจีนโนเลตและ ซิงค์ออกไซด์⁽¹⁸⁾

แม้อยูจีนโนลจะสามารถทำปฏิกิริยากับส่วนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกัตตาเปอร์ชา และทำหน้าที่เป็นตัวทำลายทำให้ กัตตาเปอร์ชาอ่อนตัวขึ้น แต่ซีลเลอร์ชนิดนี้ไม่สามารถยึดติดกับผิวของผนังคลองรากฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมี⁽⁴⁾ ทำให้แรงยึดระหว่างพื้นผิวดังกล่าว ค่อนข้างน้อย ดังจะเห็นได้จากการศึกษาของ Lee และคณะ⁽¹⁹⁾ พบว่า ซิงค์ออกไซด์ยูจีนโนลซีลเลอร์ ให้ค่าความแข็งแรงของพันธะต่อเนื้อฟันต่ำ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.068 เมกะปาสคาล ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า⁽²⁰⁾ ขณะที่ค่าความแข็งแรงพันธะยึดต่อกัตตาเปอร์ชาเท่ากับ 0.99 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าถึง 14.6 เท่า จึงมักพบว่าความล้มเหลวของการยึดติด มักเกิดขึ้นที่พื้นผิวระหว่าง ซีลเลอร์และเนื้อฟัน

มีความพยายามในการเติมสารจำพวกโรซิน(rosin)หรือ Canada balsam^(5, 15) ซึ่งองค์ประกอบหลักคือ กรดเรซิน (resin acid) ซึ่งนอกจากจะช่วยพัฒนาคุณสมบัติด้านการยึดติด (adhesive property) แล้ว สารดังกล่าวมีผลต่อ ส่วนของ lipid ของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เพิ่มการซึมผ่านของสารน้ำเข้าสู่เซลล์ จึงมีฤทธิ์ต้านเชื้อ (antimicrobial effect) ด้วย⁽⁵⁾ มีรายงานการศึกษาพบว่าซิงค์ออกไซด์ยูจีนโนลซีลเลอร์ สามารถออกฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อได้ดีผ่านทางท่อเนื้อฟัน⁽²¹⁾

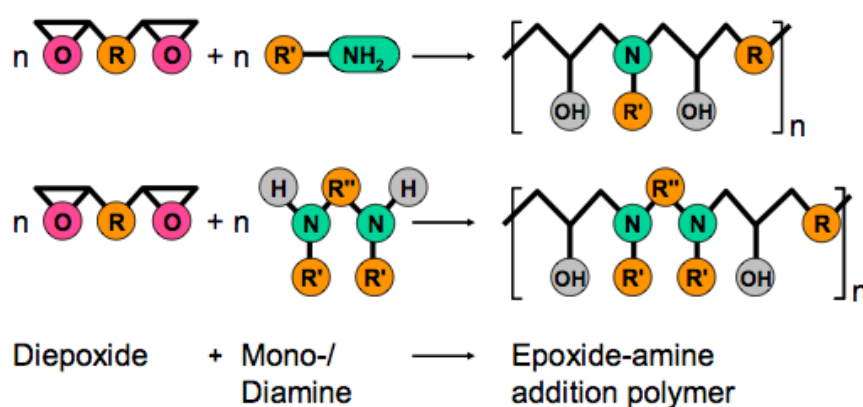


ภาพประกอบ 2 ปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation reaction) ของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนโนล⁽²²⁾

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านเคมีกายภาพ(physicochemical properties) พบว่าซีลเลอร์ดังกล่าว มีการละลายตัวสูง จากการระเหยของยูจีนอลออกจากซีลเลอร์เมทริกซ์ (sealer matrix) ในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการรั่วซึมบริเวณปลายราก และยังส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์อีกด้วย โดยเฉพาะซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลชนิดที่มีฟอร์มาดีไฮด์ (formaldehyde) เป็นองค์ประกอบ⁽⁵⁾จากการศึกษาของ Araki และคณะ⁽²³⁾ พบว่า ยูจีนอลมีความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาส นอกจากนั้นยัง สามารถยับยั้งการทำหน้าที่ของมาโครฟาจ (macrophage) และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการอักเสบบริเวณรอบปลายราก จากข้อด้อยดังกล่าวจึงมีความพยายามในการพัฒนาคุณสมบัติ ซีลเลอร์ ทั้งในด้านความเข้ากันได้ทางชีวภาพ, การป้องกันการรั่วซึม, ยึดติดกับผนังคลองรากฟัน รวมถึงการทำให้รากฟันมีความแข็งแรงมากขึ้น^(18, 24)

ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน

เอเอชพลัส (AH Plus™; Dentsply, Zurich, Switzerland) เป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin-based sealer) ถูกเสนอให้ใช้งานเอนโดดอนติกส์ครั้งแรกโดย Schroeder ในปี 1954 ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน⁽⁸⁾ เอเอชพลัสมีลักษณะเป็นครีมบรรจุในหลอด 2 หลอด (paste-paste system) ซึ่งจะถูกนำมาผสมกันก่อนใช้งาน หลอด A ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ สารบิสฟีนอลเอ อีพอกซีเรซิน (bisphenol-A epoxy resin) และ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) หลอด B ประกอบด้วย ไดเบนซิดามีน (dibenzylamine) และ อะแมนทาดีน (amantadine) อีพอกซี คือสารพอลิเมอร์ (polymer) ที่เมื่อได้รับการผสมกับสารที่ทำให้แข็งตัว จะเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization)⁽²⁵⁾ (ภาพประกอบ 3)



ภาพประกอบ 3 กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization)

ของเอเอชพลัส⁽²⁵⁾

ปฏิกิริยาการแข็งตัวของซิลเลอร์ชนิดนี้ เกิดจากไดอีพอกไซด์ (diepoxide) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของบิสฟีนอลเอ (bisphenol-A) ทำปฏิกิริยากับเอมีน (amine) เกิดเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomers) ซึ่งมี ส่วนปลายเป็นหมู่ของอีพอกไซด์และอะมิโน จะสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้กับโมโนเมอร์ (monomers) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomers) กระบวนการนี้จะสร้างผลิตภัณฑ์ที่มี ลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer) มีเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability) สูง, ด้านทานต่อการเกิดการหดตัวจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerisation shrinkage) ⁽²⁶⁾

อีพอกไซด์ถูกจัดว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีการหดตัว (contraction-free) ขณะเกิดปฏิกิริยา ⁽²⁷⁾ ดังนั้นวัสดุดังกล่าวเมื่อแข็งตัว มีความแนบสนิทที่ดีกับพื้นผิวของผนังคลองรากฟัน นอกจากนี้ปฏิกิริยาแข็งตัวดังกล่าวใช้ระยะเวลาสั้น ทำให้มีเวลาการทำงาน (working time) นานเพียงพอ ⁽²⁶⁾ จากการศึกษาพบว่าเอเอชพลัส มีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมาะสมนอกจากในด้านเสถียรภาพเชิงมิติแล้ว ^(8, 9, 24) ยังมีความทึบรังสีสูง ^(24, 25) การละลายตัวต่ำอีกด้วย ⁽⁷⁻⁹⁾

การที่ซิลเลอร์ชนิดนี้ไม่มียูจินอลเป็นองค์ประกอบ จึงไม่มีผลต่อการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของสารจำพวกเรซินและไม่ขัดขวางการยึดติดของสารบอนด์ดิ้ง McComb และ Smith ⁽²⁸⁾ เปรียบเทียบความแข็งแรงของพันธะดึง (tensile bond strength) ของซิลเลอร์ทางการค้าชนิดต่างๆ ที่วางจำหน่ายในท้องตลาด พบว่ามีเพียงซิลเลอร์ชนิดอีพอกไซด์เรซิน ที่ให้แรงยึดที่ดีกับเนื้อฟัน ขณะที่ซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอื่น ไม่สามารถยึดติดกับเนื้อฟันได้ และให้ข้อคิดเห็นว่าการอุดคลองรากฟันอย่างสมบูรณ์จะทำได้ เมื่อสามารถพัฒนาวัสดุให้สามารถยึดติดในระดับโมเลกุลได้

ซิลเลอร์ชนิดอีพอกไซด์เรซิน สามารถให้แรงยึดที่ดีทั้งต่อเนื้อฟัน และกัตตาเปอร์ชา โดยวัสดุดังกล่าวสามารถยึดกับเนื้อฟันได้ เนื่องจากส่วนวงแหวนอีพอกไซด์ (epoxide ring) ที่เป็นองค์ประกอบในซิลเลอร์ ถูกเปิดออก และทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของคอลลาเจน ภายในท่อเนื้อฟัน เพื่อสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การยึดกับส่วนของกัตตาเปอร์ชา เกิดจากค่าความเป็นกรดของซิลเลอร์ มีผลต่อการเกิดการยึดติดทางพันธะเคมี ⁽¹⁹⁾ จากการศึกษาพบว่าเอเอชพลัส มีค่าแรงยึดพันธะสูงกว่าอีพิฟานี (Epiphany) เนื่องจากความสามารถใน ด้านการคืบ (creeping ability) และระยะเวลาการแข็งตัว (setting time) ที่นาน จึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่ส่วนที่ไม่ราบเรียบ และเพิ่มการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking) ระหว่างผิววัสดุและเนื้อฟันได้ ⁽²⁹⁾

อย่างไรก็ดีพบว่ามีค่าความต้านทานการแตกหักที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับคลองรากฟันที่อุดโดยใช้ซิลเลอร์ประเภทเมทาคริลเลต ⁽³⁰⁾ และจัดเป็นวัสดุที่มีความไวต่อน้ำสูง (water-sensible endodontic materials) นอกจากนั้นจากการศึกษาโดย Huang และคณะ ⁽³¹⁾ พบว่า เอเอชพลัส มีผลทำให้เกิดพิษทางพันธุกรรม (genotoxicity) จากสารบิสฟีนอลเอไดไกลิซิลอีเธอร์ (bisphenol-A diglycidyl-ether) ที่เป็นส่วนประกอบในซิลเลอร์ โดยความเป็นพิษดังกล่าว ขึ้นกับขนาดที่ได้รับ (dose-dependent) สำหรับความเป็นพิษต่อเซลล์จะอยู่ในช่วง ระยะเริ่มแรกของการศึกษาและจะลดน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 4 ชั่วโมงหลังผสม ⁽⁵⁾ เช่นเดียวกับการตอบสนองของเนื้อเยื่อด้วยการอักเสบที่พบได้แต่จะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ⁽³²⁾

มิเนอร์ลไทรออกไซด์แอกริเกต และมิเนอร์ลไทรออกไซด์แอกริเกตในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

มิเนอร์ลไทรออกไซด์แอกริเกต (Mineral Trioxide Aggregate; MTA) ถูกแนะนำให้ใช้ในงานรักษาคคลองรากฟันเป็นวัสดุอุดย่นปลายราก โดย Torabinejad ในปี 1993 และได้รับการรับรองโดยองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Drug Administration, USA) ในปี 1998 องค์ประกอบหลักประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate; $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate; $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (tricalcium aluminate; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite; $(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)⁽³³⁾

เมื่อเอมทีเอแข็งตัวแล้วจะพบว่า มีค่าความเป็นด่างสูง จึงมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อไม่ต่างจากกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีคุณสมบัติเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี มีความแข็งแรงสูง, การละลายตัวที่ต่ำ และต้านทานการรื้อซึมได้ดี นอกจากนี้วัสดุดังกล่าว สามารถส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง (mineralized tissue) กระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อฟันและกระดูก (dentinogenic and osteogenic activity)⁽³⁴⁾ ได้ ในปี 2007 Martin⁽³⁵⁾ ศึกษาในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด โดยใช้เอมทีเอเป็นวัสดุปิดกั้นปลายรากฟัน พบว่าเอมทีเอที่สัมผัสกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate-buffered saline) เป็นเวลา 30 วัน จะมีความแนบสนิทและป้องกันการรื้อซึมได้ดีกว่า กลุ่มทดลองที่สัมผัสสาร 48 ชั่วโมง

Sarkar และคณะ⁽³³⁾ ได้ศึกษาลักษณะของเอมทีเอเมื่อใช้เป็นวัสดุอุดย่นปลายรากฟัน พบว่าเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่จำลองสภาวะของเหลวในร่างกาย (simulated body fluid) จะทำให้เกิดปลดปล่อยแคลเซียมออกจากตัววัสดุ ทำให้เกิดการตกตะกอนของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite crystal) ปกคลุมผิวของเอมทีเอ และแทรกระหว่างเอมทีเอกับเนื้อฟัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Reyes-Carmona⁽¹²⁾ พบว่าสารดังกล่าวเมื่อสัมผัสกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate-buffered saline) ที่มีอยู่ภายในเส้นใยคอลลาเจน จะกระตุ้นการสะสมแร่ธาตุในส่วนเนื้อฟัน ยื่นเข้าไปในท่อเนื้อฟัน (tag-like structures) เกิดเป็นลักษณะทางพันระเคมี ระหว่างวัสดุอุดและเนื้อฟัน และสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดได้จากคุณสมบัติข้างต้นวัสดุดังกล่าวจึงเป็นที่ยอมรับและถูกนำมาใช้งานทางคลินิกในหลายด้าน⁽³⁶⁾

อย่างไรก็ตาม ในด้านการใช้งาน จะพบปัญหาในด้านระยะเวลาการแข็งตัวที่ค่อนข้างนาน⁽³⁷⁾, การมีลักษณะเป็นผง (granular consistency)⁽³⁸⁾ ทำให้การจัดการวัสดุทำได้ไม่ดี ประกอบกับการใช้งานทางด้านเอนโดดอนติกส์ส่วนใหญ่ จะมีความซับซ้อนในการเข้าถึงตำแหน่งที่จะทำงาน การนำวัสดุเข้าไปใช้งานภายในคลองรากฟันทำได้ยาก⁽³⁷⁾ Holland และคณะ⁽¹¹⁾ ได้ศึกษาถึงการตอบสนองของเนื้อเยื่อรอบรากฟันเมื่อใช้เอมทีเอ ร่วมกับพาหะ (vehicle) ชนิดอื่น โดยใช้โพรไพลีนไกลคอล (propyleneglycol) แทนการใช้น้ำกลั่น (distilled water) ในการอุดคลองรากฟัน พบว่าวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ทำให้เกิดการตอบสนองด้านชีวภาพของเนื้อเยื่อรอบปลายราก ไม่แตกต่างกับการใช้น้ำกลั่นเป็นพาหะและสามารถนำเข้าสู่คลองรากฟันได้ง่าย จึงเริ่มมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้ในรูปแบบซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน

ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมิเนอร์ลไตรออกไซด์แอกรีเกต

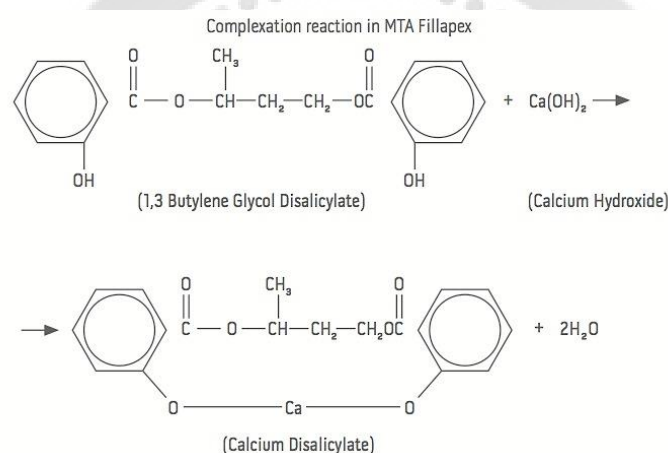
องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ (MTA fillapex®; Angelus, Londrina, PR, Brazil) เป็น mineral trioxide aggregate (MTA) -based salicylate resin sealer⁽³⁹⁾ ถูกวางจำหน่ายครั้งแรกในปี 2010 ส่วนผสม บรรจุในหลอด 2 หลอด (paste-paste system) ได้แก่ หลอดแรก ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ mineral trioxide aggregate หลอดที่สองประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ 1,3 บิวทิลีนไกลโคซาลิไซเลท (1,3 butyleneglycoldisalicylate) สำหรับองค์ประกอบทั้งหมดและหน้าที่ของแต่ละองค์ประกอบย่อยแสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 องค์ประกอบของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์⁽³⁹⁾

COMPONENT NAME	CHEMICAL NAME	FUNCTION
PASTE A		
Salicylate resin	Methyl Salicylate	Ionic polymer formation
	Butylene Glycol	
	Colophony	
Bismuth Trioxide	Bismuth Trioxide	Radiopacity
Fumed Silica	Fumed Silicon Dioxide	Filler
PASTE B		
Fumed Silica Titanium Dioxide	Fumed Silicon Dioxide	Filler
	Titanium Dioxide	Pigment
Mineral Trioxide Aggregate (40%)	Tricalcium silicate	Active ingredient and responsible for ionic polymer formation
	Dicalcium Silicate	
	Calcium Oxide	
	Tricalcium Aluminate	
Base resin	Pentaerythritol	Plasticity
	P - Toluenesulfonamide	Plasticity

ปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมินิเอร์ลไตรออกไซด์แอกรีเกต ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization reaction) แม้จะมีเรซินเป็นส่วนประกอบ แต่เกิดจากปฏิกิริยาที่เรียกว่า คอมเพลกเซชัน (complexation reaction)⁽³⁹⁾ (ภาพประกอบ 4) ซึ่งเกิด ระหว่าง ไอออน (ion) และสารคีเลต (chelating agent) โดยไม่มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนแก่กัน สำหรับ ปฏิกิริยานี้ สารที่มีความสำคัญนอกเหนือจากซาลิไซเลต (salicylate) ที่เป็นสารประกอบหลักแล้ว คือ สาร แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; Ca(OH)_2) ซึ่งเกิดจากการเกิดจากปฏิกิริยา ไฮเดรชัน (hydration reaction) ของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO) ที่มีอยู่มากในเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ดังนั้นการเริ่มปฏิกิริยาจะต้องอาศัยน้ำจากภายนอก การที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สัมผัสกับไดซาลิไซเลตเรซิน (disalicylate resin) ส่งผลให้เกิดการรวมเอาแคลเซียมไอออน เข้าไปในสารประกอบตัวแรก และสร้างโมเลกุลน้ำขึ้นอีก ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ต่อไป⁽³⁹⁾



ภาพประกอบ 4 กระบวนการคอมเพลกเซชัน (complexation reaction) ของวัสดุเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์⁽³⁹⁾

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ พบว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสม ในการใช้งานเป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟันได้แก่ มีการไหลแผ่ที่ดี, มีค่าการละลายตัวต่ำ, ทึบรังสี, เวลาผสมและก่อตัวเหมาะสม⁽⁴⁰⁾ มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์อุดคลองรากฟัน สามารถต้านทานการแตกหักของฟันได้เทียบเท่ากับเอเอชพลัส⁽⁴¹⁾ นอกจากนั้น Kok และคณะ⁽⁴²⁾ ได้ ประเมินการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าสู่ท่อเนื้อฟัน พบว่าวัสดุทั้งสองสามารถแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อ ฟันได้ไม่แตกต่างกัน แม้ว่าบางการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงพันธะของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีค่าใกล้เคียงกับเอเอชพลัส⁽⁴³⁾ แต่จากหลายการศึกษากลับพบว่า มีค่าความแข็งแรงพันธะน้อยกว่า ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอเอชพลัสและซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดแคลเซียมซิลิเกตอื่น^(44, 45) (ตาราง 3)

อย่างไรก็ตาม การที่ซิลเลอร์สามารถแสดงลักษณะกิจกรรมทางชีวภาพโดยกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็งหลังจากสัมผัสกับสารละลายฟอสเฟตบัพเฟออร์ร่วมกับการมีคุณสมบัติการไหลแผ่ที่ดีทำให้วัสดุสามารถแทรกซึมเข้าสู่แขนงคลองราก (accessory canal) หรือส่วนที่ไม่เรียบของคลองรากฟัน (irregularities) อาจมีผลเพิ่มค่าความแข็งแรงพันธะยึดของวัสดุ ต่อเนื้อฟันร่วมคุณสมบัติด้านการคงตัวเชิงมิติสูง⁽⁴⁰⁾ อาจมีผลป้องกันการซึมผ่านของเชื้อได้⁽³⁾

คุณสมบัติด้านการต้านเชื้อ (Antibacterial activities)

Morgental และคณะ⁽⁴⁶⁾ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อฟันและคุณสมบัติต้านเชื้อของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์พบว่าจะมีคุณสมบัติต้านเชื้อ *E. faecalis* ได้ ก่อนที่วัสดุจะ แข็งตัวและลดลงเมื่อวัสดุแข็งตัวสมบูรณ์ ขณะที่หลายการศึกษาพบว่าวัสดุมีฤทธิ์ต้านเชื้อ⁽⁴⁷⁻⁴⁹⁾ โดยจะสามารถออกฤทธิ์ได้ยาวนานถึง 30 วัน เป็นผลจากการที่มีแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ เมื่อสัมผัสความชื้นจากเนื้อฟันจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮโดรเจล และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มสูงขึ้น⁽⁴⁷⁾

คุณสมบัติด้านความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)

องค์ประกอบหลักของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ คือ 1,3 บิวทิลีนไกลโคซาลิไซเลต (1,3 butyleneglycoldisalicylate) ซึ่งมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อมากกว่าอีพอกซีเรซิน (epoxy-based resins)⁽³⁾ Salles LP และคณะ⁽⁵⁰⁾ ได้ทำการศึกษาผลของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ต่อเซลล์ที่คล้ายกับเซลล์อ่อนสร้างกระดูกของมนุษย์ (Human osteoblast-like cells) พบว่าความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) ของวัสดุลดลง หลังจากการแข็งตัว แต่เมื่อศึกษาการตอบสนองของ เนื้อเยื่อต่อวัสดุเปรียบเทียบกับระหว่างซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอนโดฟิล, เอเอชพลัส และ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ที่เวลา 60 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน⁽⁵¹⁾ ในทางกลับกัน Gomes-Filho และคณะ⁽³³⁾ แสดงให้เห็นว่าเนื้อเยื่อที่สัมผัสวัสดุดังกล่าว มีการตอบสนองด้วยการอักเสบ ในระดับต่ำ เทียบเท่ากับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่มีการสะสมของแร่ธาตุจากการย้อมสีวอนคอสซา (Von Kossa staining)

ผลการศึกษาทางคลินิก (Clinical study)

ในทางคลินิก ปี 2013 Thakur และคณะ⁽⁵²⁾ ได้มีการศึกษาผลสำเร็จของการรักษาทางคลินิก เปรียบเทียบระหว่างการใช้ ซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล, ซิลเลอร์อุดคลองราก ฟันชนิดอีพอกซีเรซิน และซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดไมเนอร์ลัไตรออกไซด์แอกทีเกต โดยพิจารณา จากอาการทางคลินิกร่วมกับภาพรังสี พบว่าซิลเลอร์ทั้งสามมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน

ซิลเลอร์อุดคลองรากฟัน ในฟันที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง

เมื่อพิจารณาบริเวณส่วนปลายของรากฟันจะพบว่าเป็นส่วนที่มีลักษณะแตกต่างกับส่วนอื่นของคลองรากฟัน เนื่องจากต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อปริทันต์ และสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูงตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟันที่มีรูเปิดปลายรากฟันกว้าง (wide apex) อาจเนื่องมาจากการขยายคลอง รากฟันเกิน (over-instrumentation), กรณีฟันที่ปลายรากยังเจริญไม่สมบูรณ์ แล้วหยุดการพัฒนา หรือเกิดการละลายของ ปลายรากฟันเนื่องจากการเกิดพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อใน การ

อุดคลองราก ฟันจะยังมีโอกาสสัมผัสความชื้น ภาวะดังกล่าวจะมีความยากในการควบคุมจุดสิ้นสุดของการอุดคลองรากฟัน ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้วิธีการสร้างส่วนกั้นปลายรากฟัน (artificial barrier) แต่ในบางกรณีขนาดของรูเปิดปลายรากฟัน ไม่ได้กว้างเกินขนาดที่จะอุดคลองรากฟันด้วยวิธีการดั้งเดิม การเลือกใช้ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันที่มีความสามารถในการแนบสนิทดี ร่วมกับมีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากน้อย มีความจำเป็น ดังนั้น คุณสมบัติที่ควรมีเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ลักษณะซีลเลอร์ที่สมบูรณ์แบบ คือ ความสามารถในการเหนียวนำไปให้เกิดการซ่อมแซมโดยเนื้อเยื่อแข็งบริเวณรูเปิดปลายรากฟัน และทำให้เกิดความแนบสนิททางชีวภาพ (biologic sealing)⁽³⁾ หรืออาจเรียกลักษณะดังกล่าวว่า การเกิด endodontic grafting

Martin และคณะ⁽³⁵⁾ แนะนำว่า เอ็มทีเอเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นวัสดุปิดกั้นปลายรากฟัน ในฟันปลายรากเปิด ซึ่งจะมีความแนบสนิทที่ดียิ่งขึ้น เมื่อสัมผัสของเหลวที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ (phosphate-containing fluids) Holland และคณะ⁽⁵³⁾ ได้ทำการศึกษา การตอบสนองของเนื้อเยื่อรอบปลายรากในฟันสุนัขอุดคลองรากฟันด้วยวิธีแลทเทอรัลคอนเดนเซชัน (lateral condensation) โดยใช้เอ็มทีเอเป็นซีลเลอร์ จากการศึกษาไม่พบการตอบสนองด้วยการอักเสบ และพบว่ารูเปิดปลายรากฟันถูกปิดด้วยวัสดุเอ็มทีเออย่างสมบูรณ์จากการศึกษาดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดว่าหากใช้วัสดุดังกล่าวเป็นซีลเลอร์หรือใช้เป็นวัสดุอุดรากจะช่วยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งหรือส่วนเคลือบรากฟัน (cementum) ปิดบริเวณรูเปิดปลายราก (apical foramen) ซึ่งจะก่อให้เกิดความแนบสนิทที่ดีโดยเฉพาะในฟันที่มีรูเปิดปลายรากฟันเปิดกว้างได้ ยืนยันได้ผลการศึกษา ของ Prati และคณะ⁽⁵⁴⁾ ที่ศึกษาลักษณะของปลายรากฟัน (apical morphology) และ ความสามารถในการผนึกของเทคไบโอซีลเลอร์เอนโด (TechBiosealer Endo) ซึ่งเป็นซีลเลอร์ชนิดมีเอนรัลไตร ออกไซด์ แอกริเกตที่อุดในฟันปลายรากเปิดที่มีการปนเปื้อนของของเหลว เมื่อเวลาผ่านไป 6 เดือน พบว่าพื้นผิวปลายรากฟันมีความขรุขระ (irregular) เพิ่มขึ้นจากการสะสมของแคลเซียม และฟอสเฟตทั้งบริเวณพื้นผิวและปกคลุมช่องว่างบริเวณขอบรวมถึงให้ความแนบสนิทที่ดีกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

ตาราง 2 การศึกษาด้านความสามารถในการผนึก (Sealing ability) ของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์

การศึกษาด้านความสามารถในการผนึก(Sealing ability)			
ผู้ศึกษา(ปี)	ชนิดซีลเลอร์	วิธีการศึกษา/ระยะเวลา(วัน)	ผลการศึกษาเปรียบเทียบการรั่วซึม
Gomes-Filho et al.(2011) ^(55)	MTA FillapexEndo-CPM Sealapex	Dye penetration/ 7วัน	MTA Fillapex = Sealapex<Endo-CPM-Sealer
Sonmez et al.(2012) ^(56)	MTA Fillapex ProRootMTA AHPlus	Dye penetration/ 3 วัน	ProRootMTA=AHPlus < MTA Fillapex
Ferreira et al.(2013) ^(57)	MTAFillapex Topseal	Radioactive isotopes/ 7 วัน / 28วัน	Topseal < MTAFillapex MTAFillapex< Topseal
Sadeghi et al.(2013) ^(58)	MTA Fillapex MTA AH26	Dye penetration/ 7 วัน	MTAFillapex=MTA < AH26
Razavian et al.(2014) ^(59)	MTA Fillapex AH26	Bacterial leakage/ 90 วัน	AH26 < MTAFillapex

ตาราง 3 การศึกษาด้านความแข็งแรงของพันธะ (bond strength test) ของเอนิเมที่เอพิลลาเพกซ์

การศึกษาด้านความแข็งแรงของพันธะ (bond strength test)			
ผู้ศึกษา(ปี)	ชนิดซีลเลอร์	วิธีการศึกษา	ผลการศึกษา
Sagsen et al.(2011) ⁽⁴⁵⁾	MTAFillapex	Push-out test / coronal segment	MTAFillapex = I Root SP = AHPlus
	I Root SP	/ middle segment	iRoot SP = AHPlus > MTAFillapex
	AHPlus	/ apical segment	iRoot SP = AHPlus > MTAFillapex
Assmann et al.(2012) ⁽⁴³⁾	MTA Fillapex Endo-CPM	Push-out test	Endo-CPM > AHPlus = MTA Fillapex
	AH Plus		
Sönmez et al.(2013) ⁽⁴⁴⁾	MTA Fillapex	Push-out test	ProRootMTA > AHPlus > MTA Fillapex
	ProRootMTA		
	AHPlus		
Forough et al.(2014) ⁽⁶⁰⁾	Epiphany	Push-out test	Epiphany > MTA-Fillapex > Dorifill
	MTA-Fillapex		
	Dorifill		

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุอุดคลองรากฟันแบ่งประเภทการศึกษาออกได้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและเคมี (physicochemical) ทางด้านชีวภาพ (biological) การต้านเชื้อ (antimicrobial) และการจำลองลักษณะของการใช้งานจริงในห้องทดลอง (functional laboratory models)⁽¹⁷⁾

การยึดติด (adhesion) ของซีลเลอร์กับคลองรากฟัน เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่พึงมีของ ซีลเลอร์ที่ดี คือ มีลักษณะเหนียว(tacky)ขณะผสม และเมื่อแข็งตัวควรทำให้เกิดแรงยึดที่เพียงพอ - ระหว่างวัสดุกับคลองรากฟัน⁽⁶¹⁾ การยึดติดของวัสดุอุดกับผ่านคลองรากฟันมีความสำคัญทั้งในภาวะสถิตย์ (static) คือสามารถกักจัดช่องว่าง ทำให้เกิดความแนบสนิท และป้องกันการเคลื่อนผ่านของสารน้ำผ่านทางรอยต่อดังกล่าวและในภาวะพลวัต (dynamic) คือสามารถต้านทานการหลุดออก ของวัสดุที่เกิดจากความเครียดทางกล (mechanical stress) ที่มากระทำ ปัจจัยด้านคุณสมบัติ วัสดุ ที่มีผลดีต่อความสามารถในการฉีก^(62, 63) ได้แก่ การมีความสามารถในการไหลแผ่ที่ดี (adequate flow properties), การมีเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability) สูง, การละลายตัว (solubility) ต่ำ, มีความหนาของฟิล์ม (film thickness) ที่บาง ซึ่งจะสามารถช่วยลดการหดตัวเชิงปริมาตร (volumetric shrinkage) ของวัสดุได้⁽⁶²⁾

สำหรับการศึกษาด้านความสามารถในการฉีก และความแข็งแรงพันธะของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ที่ผ่านมายังมีไม่มากนัก มีความพยายามในการศึกษาเปรียบเทียบกับเอ็มทีเอเนื่องจาก ซีลเลอร์ดังกล่าวมีเอ็มทีเอเป็นส่วนประกอบ แม้การนำเอ็มทีเอมาอุดคลองรากฟัน อาจไม่เหมาะสมแต่เป็นที่ยอมรับว่ามีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ และพบรายงานความสำเร็จจากการใช้ เป็นวัสดุอุดคลองรากฟัน⁽⁶⁴⁾ และเนื่องจากการมีเรซินเป็นองค์ประกอบ จึงมักศึกษาเปรียบเทียบกับ ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเรซินโดยเฉพาะเอเอสพลัส ซึ่งนิยมใช้งานทางคลินิก^(44, 57, 65) (ตาราง 2 และ 3)

การทดสอบด้านการรั่วซึม (Leakage test)

ความสามารถในการฉีกของวัสดุอุดภายในคลองรากฟัน มีความสำคัญเนื่องจากความล้มเหลวของการรักษาทางเอนโดดอนติกส์ส่วนใหญ่ เกิดจากการอุดคลองรากฟันที่ไม่สมบูรณ์ คุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการของซีลเลอร์ทางเอนโดดอนติกส์ ถูกกำหนดโดยองค์การระหว่างประเทศ ว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO) อย่างไรก็ตามไม่มีคุณสมบัติใดในข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง กับคุณสมบัติด้านความสามารถในการฉีก เนื่องจากวิธีการทดสอบยังไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจน ความสำเร็จของการอุดคลองรากฟันและวัสดุอุดที่ใช้อาจประเมินได้จากการศึกษาทางคลินิก^(52, 66) แต่มีข้อจำกัดมากผลการศึกษาขึ้นกับหลายปัจจัย รวมถึงต้องใช้ ระยะเวลาในการศึกษานานดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของการอุดคลองรากฟัน และความสามารถในการฉีกของวัสดุทางเอนโดดอนติกส์ จึงมักถูกศึกษาผ่านแบบจำลองการศึกษาการรั่วซึมของวัสดุ (leakage model) ซึ่งส่วนใหญ่จะเปรียบเทียบโดยการให้สารทดสอบ (tracer agent) ซึมผ่านคลองรากฟันที่ได้รับการอุดแล้ว สารทดสอบที่นิยมใช้ ได้แก่ สีย้อม (dye), แบคทีเรียและ ผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรีย (bacteria and by products), กลูโคส (glucose), โปรตีน (protein) หรือวิธีการอื่นๆ เช่น วิธีการซึมผ่านของของเหลวและ การสกัดแยกสีย้อม (dye extraction)

เนื่องจากการศึกษาดังกล่าว วัสดุจะถูกนำมาทดสอบผ่านแบบจำลองที่สร้างขึ้นจึง มักถูกวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์กับทางคลินิก (clinical relevance) และความสามารถในการทำซ้ำได้ (reproducibility)⁽⁶⁷⁾ รวมถึงประเภทสารทดสอบเองเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ถูกพิจารณาทั้งในเรื่องของขนาดและการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุที่ศึกษา สำหรับวิธีการศึกษาแต่ละรูปแบบ มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน

วิธีการซึมผ่านของสีย้อม (dyes penetration method) โดย Grossman ในปี 1939 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเหตุผลหลัก คือ ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน หลักการโดยคร่าวๆ คือ ให้รากฟันแช่อยู่ในสีย้อม โมเลกุลสีย้อมจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างผนังคลองรากและวัสดุขึ้นมาโดยอาศัยปรากฏการณ์แคพิลลารี (Capillary phenomena)⁽⁶⁸⁾ โมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็ก หากวัสดุอุดคลองรากฟันสามารถป้องกันการซึมผ่านได้ บ่งบอกถึงคุณสมบัติที่ดีของวัสดุในการป้องกันการรั่วซึม โดยสีย้อมที่นิยมใช้ ได้แก่ เมทิลีนบลู (methylene blue) เนื่องจากมีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กและมีความสามารถในการซึมผ่านได้สูง การเปรียบเทียบระยะทางที่เกิดการรั่วซึมของสี อาจทำได้จากการตัดฟันเป็นลักษณะตามยาว (longitudinal) ตามขวาง (transverse) หรือใช้วิธีการทำให้ชิ้นงานใส (clearing technique) ข้อจำกัดของการศึกษานี้คือ ไม่สามารถศึกษาการรั่วซึมอย่างต่อเนื่องในระยะยาวได้เนื่องจากชิ้นงานจะถูกทำลาย การตัดชิ้นงานตามแนวยาวอาจให้ผลการศึกษาแบบสุ่มเพียงระนาบเดียว ซึ่งอาจไม่สะท้อนให้เห็นถึงการรั่วซึมทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาไม่น่าเชื่อถือได้⁽⁶⁹⁻⁷²⁾ สำหรับการติดตามขวางอาจทำให้สูญเสียโครงสร้างของฟันจากความหนาของไบมิตและอาจมีผลต่อความแม่นยำของวิธีการซึมผ่านของสีย้อมได้⁽⁷³⁾ นอกจากนั้นสีของสารทดสอบที่ใช้ อาจละลายไป จากขั้นตอนการทำให้ชิ้นงานใส⁽⁶⁹⁾

วิธีการซึมผ่านของของเหลว (fluid filtration or fluid transportation) เป็นการทดสอบความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของวัสดุ โดยประเมินจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศภายในหลอดแก้ว ถูกปรับปรุงโดย Wu และคณะ⁽⁷⁴⁾ เพื่อให้เหมาะสมกับการศึกษาในวัสดุอุดคลองรากฟันแบบจำลองประกอบด้วยชิ้นงานที่ได้รับการอุดคลองราก ส่วนตัวฟัน (coronal portion) เชื่อมต่อกับหลอดแก้วซึ่งบรรจุน้ำภายใต้ความดันบรรยากาศ เช่นเดียวกับส่วนปลายรากเชื่อมกับหลอดแก้วยาวภายในบรรจุน้ำ หลังจากนั้นจะให้ความดันความดัน 0.1 บรรยากาศ ผ่านส่วนตัวฟัน ซึ่งแรงดังกล่าวจะผลักดันน้ำให้เคลื่อนผ่านช่องว่างที่มีอยู่ตลอดความยาวคลองรากฟัน ข้อดีของวิธีการศึกษานี้คือชิ้นงานจะไม่ถูกทำลาย ดังนั้นจะสามารถศึกษาได้ในระยะยาว ได้ผลการศึกษาในเชิงปริมาณ(quantitative)ซึ่งสามารถบันทึกได้อัตโนมัติ ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ศึกษา (operator error) และมีความไวในการทดสอบ (sensitivity)⁽⁶⁹⁾ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ มีหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้องและไม่มีมาตรฐานของการศึกษาทั้งในแง่ของความดัน เวลาที่ใช้ รวมถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้วที่บรรจุฟองอากาศ ดังกล่าว อาจทำให้ผลการทดลองมีความผันแปรไปได้⁽⁷⁵⁾

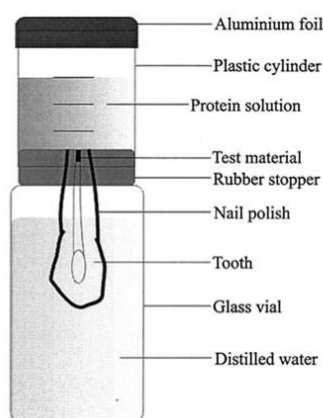
การสกัดแยกสีย้อม (dye extraction method or dye dissolution method) หลักการเริ่มแรกทำเช่นเดียวกับวิธีการซึมผ่านของสีย้อม หลังจากแช่พื้นที่ได้รับการอุดคลองรากฟันในสีย้อมตามระยะเวลาที่ศึกษา ชิ้นงานจะถูกนำไปแช่ในกรด เพื่อสกัดสีย้อมดังกล่าวออกมา และนำไปวัดการดูดกลืนแสง (optical density)⁽⁶³⁾ วิธีการนี้ สามารถวัดการรั่วซึมได้ในเชิงปริมาณ (quantitative measurement) เช่นเดียวกับวิธีการซึมผ่านของของเหลว และอาจมีข้อดีเหนือกว่า เนื่องจากการซึมผ่านของของเหลวมักจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป⁽⁶⁸⁾ นอกจากนั้นวิธีการนี้สามารถทำได้รวดเร็ว เครื่องมือ หาได้ง่าย อย่างไรก็ตาม วิธีการข้างต้นอาจมีข้อจำกัดคือ สีที่สกัดออกมาจากชิ้นงานไม่สามารถ บอกได้ว่าซึมผ่านทางใด อาจผ่านจากบริเวณพื้นผิวของเนื้อฟันปลายรากที่ไม่ได้ถูกเคลือบปิด⁽⁷⁶⁾ นอกจากนั้นวิธีการทดสอบที่ใช้สีย้อมเป็นสารทดสอบ ขนาดโมเลกุลของสีที่ใช้ มักมีขนาดเล็กกว่า เชื้อแบคทีเรีย สามารถซึมผ่านไปยังบริเวณที่แบคทีเรียไม่สามารถเข้าถึงได้ ดังนั้นมีโอกาสทำให้ผล การศึกษามีค่าเกินความเป็นจริง (overestimate)^(70, 76) , การซึมผ่านของสีที่มีลักษณะ passive บางครั้ง อาจไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่าง ภายในชิ้นงานที่ทดสอบได้ นอกจากนั้น ความคลาดเคลื่อน ของการศึกษาอาจเกิดได้จาก ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารทดสอบซึ่งมีผลต่อการซึมผ่าน หรือ ปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reactivity) ที่เกิดขึ้น รวมถึงสามารถทำให้เกิดการละลาย ตัวของชั้นเคลือบฟันได้ จากการศึกษาโดย Wu และคณะ⁽⁷⁷⁾ พบว่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูร้อยละ 1 (1% methylene blue) สามารถจางหายไป (decoloration) เมื่อสัมผัสวัสดุอุดหลายประเภท โดย พบว่า เอ็มทีเอ มีผลต่อสีของสารละลายมากที่สุด ซึ่งอาจส่งผลให้การศึกษาการรั่วซึมของเอ็มทีเอ โดยใช้สีย้อมดังกล่าว ขาดความน่าเชื่อถือได้

วิธีการซึมผ่านของเชื้อแบคทีเรีย และผลิตภัณฑ์ของเชื้อ (Bacteria and toxin infiltration) แบบจำลองการศึกษา ประกอบด้วยภาชนะ (chamber) สองส่วน คือ ส่วนที่อยู่ทางตัวฟัน และที่อยู่ทางปลายรากฟัน เมื่อสารทดสอบซึ่งประกอบด้วยเชื้อจุลชีพ (microorganism) รั่วซึมจากส่วนบนลงสู่ส่วนล่างที่บรรจุอาหารเลี้ยงเชื้อจะทำให้มีลักษณะขุ่นขึ้น (turbidity)⁽⁶⁹⁾ Krakow และคณะ⁽⁷⁸⁾ ทำการศึกษาการรั่วซึมของวัสดุอุดชั่วคราว ให้ความเห็นว่าการศึกษาโดยใช้จุลชีพเป็นสารทดสอบ เป็นวิธีที่มีความคล้ายคลึงกับลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในคลินิกมากที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจากเมื่อเชื้อสามารถผ่านคลองรากฟันที่ได้รับการอุดลงมาสู่อาหารเลี้ยงเชื้อแล้ว จะสามารถเพิ่มจำนวนได้ การทดสอบดังกล่าว จึงไม่สามารถให้ผลการทดสอบในเชิงปริมาณได้⁽⁷⁹⁾ มีเชื้อหลากหลายชนิด ถูกใช้ในการศึกษา ทำให้บางครั้งผลการศึกษาไม่สอดคล้องกัน, การคงสภาวะปราศจากเชื้อ (aseptic condition) ตลอดทุกขั้นตอนการศึกษาทำได้ยาก⁽⁸⁰⁾ นอกจากนั้นซีลเลอร์บางชนิดมีคุณสมบัติต้านเชื้อได้ แบบจำลองดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้นัก Trope และคณะ⁽⁸¹⁾ ศึกษาการซึมผ่านของเอนโดทอกซิน เข้าสู่คลองรากฟันที่ได้รับการอุด โดยมีสมมติฐานว่าอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบได้ แม้อยู่ห่างไกลจากบริเวณที่มีเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามผลของ endotoxin ต่อกัตตาเปอร์ชา, ซีลเลอร์ หรือเนื้อฟัน รวมถึงการซึมผ่านของสารดังกล่าวยังไม่ได้มีการศึกษามากนัก

วิธีการซึมผ่านของกลูโคส (Glucose filtration method) Xu และคณะ⁽⁸⁰⁾ ได้แนะนำวิธีการใหม่ในการศึกษาการรั่วซึมของวัสดุในทางเอนโดดอนติกส์ หลักการคือ การตรวจสอบการซึมผ่านของสารทดสอบ คือ กลูโคส ไปตามคลองรากฟันที่ได้รับการอุด ความเข้มข้นของสารจะถูกวัดได้จากการใช้เอนไซม์ที่มีความไวและความจำเพาะต่อกลูโคส หลังจากทำปฏิกิริยา ท้ายสุดจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดง (oxidized chromogen) และจะสามารถวัดในเชิงปริมาณได้ โดยใช้เครื่อง วัดความเข้มของแสง สาเหตุสำหรับการใช้กลูโคสเป็นสารทดสอบ เนื่องจากการมีขนาดของโมเลกุลเล็กและสารดังกล่าวเป็นอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรีย ถ้าสามารถซึมผ่านจากภายในช่องปากเข้าสู่คลองรากฟันที่ได้รับการอุดลงสู่ปลายราก ย่อมเป็นสาเหตุให้เกิดการเจริญของเชื้อและก่อให้เกิดการอักเสบได้ ข้อดีของวิธีการนี้นอกจากมีความไวจากสารที่ใช้ทดสอบแล้ว⁽⁷¹⁾ สามารถวัดในเชิงปริมาณได้ต่อเนื่อง⁽⁸⁰⁾ แบบจำลองทำได้ไม่ยากนักและลักษณะแบบจำลองจะทำให้ เกิดความดันเล็กน้อยขณะเกิดการซึมผ่านซึ่งจะช่วยกำจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม Shemesh และคณะ⁽⁸²⁾ พบว่าสารทดสอบที่ใช้สามารถ ทำปฏิกิริยากับเอ็มทีเอสส่งผลให้การตรวจ วัดค่าความเข้มข้นของกลูโคสมีความคลาดเคลื่อนไปและให้ข้อสรุปว่าวิธีการ glucose filtration ไม่เหมาะสม ในการนำมาทดสอบการรั่วซึมของเอ็มทีเอส

แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน (Protein leakage model) เริ่มนำมาใช้ โดย Valois และ Costa ในปี 2004⁽⁷⁰⁾ เป็นการตรวจสอบการซึมผ่านของโปรตีนไปตามคลองรากฟันที่ได้รับการอุด โดยโปรตีนที่ใช้เป็นสารทดสอบคือ โบวีนเซรัมอัลบูมินร้อยละ 22 (22% bovine serum albumin) แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ภาชนะ (chamber) สองส่วน คือ ส่วนที่อยู่ทางตัวฟัน จะบรรจุสารทดสอบ และส่วนที่อยู่ทางปลายรากฟันบรรจุน้ำกลั่น โดยหันส่วนตัวฟันลงทางด้านล่าง (downward) ภาชนะทั้งสองดังกล่าว จะถูกคั่นกลางโดยจุกยาง (rubber stopper) การรั่วซึมของสารทดสอบผ่านคลองรากฟัน จากส่วนบนลงสู่ส่วนล่าง สามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการวัดปริมาณโปรตีนของแบรดฟอร์ด (Bradford's protein assay)⁽⁸³⁾ โดยใช้สารคูแมสซีบีบลีเยนบลูจี (Coomassie Brilliant Blue G reagent) เมื่อสัมผัสกับสารทดสอบจะเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อน (protein-dye complex) ซึ่งมีสีฟ้า การทดสอบจะสามารถวัดได้ในเชิงปริมาณ โดยใช้เครื่องวัดความเข้มของแสง การทดสอบโดยวิธีนี้จัดว่ามีความไวสูง และ ไม่ถูกรบกวนจากสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่โปรตีน (nonprotein compounds)⁽⁸⁴⁾ สามารถวัดการรั่วซึม ได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากชิ้นงานไม่ถูกทำลาย⁽⁸⁵⁾ (ภาพประกอบ4) แม้การศึกษาส่วนใหญ่จะใช้ ทดสอบกับวัสดุ MTA^(70, 84, 85) แต่ Malcic และคณะ⁽⁸⁶⁾ รายงานว่าโปรตีนดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการเสื่อมสลาย (disintegration) ของวัสดุ ไออาร์เอ็ม (IRM) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือซิงค์ออกไซด์จึงมีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาการรั่วซึมของซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ได้

ข้อดีของวิธีการนี้ได้แก่กระบวนการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเกิดได้รวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาประมาณ 2 วินาที ขณะที่สีที่เกิดขึ้นอยู่เป็นระยะเวลานาน ทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างจำนวนมากได้ในเวลาเดียวกัน, ขนาดของโปรตีนที่ใช้มีความใกล้เคียงกับโมเลกุลไลโปโพลีแซคคาไรด์ (lipopolysaccharide) ของแบคทีเรียและสามารถตรวจสอบการรั่วซึมที่เกิดได้ทุกระนาบ จึงมีความสัมพันธ์กับสภาวะที่เกิดจริงทางคลินิกมากกว่าวิธีการอื่น⁽⁸⁴⁾



ภาพประกอบ 5 แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน⁽⁷⁰⁾

ในทางทฤษฎีการมีความแนบสนิทที่ดี ควรมีผลให้ซีลเลอร์ชนิดนั้นสามารถยึดติดกับเนื้อฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ⁽⁸⁷⁾ McComb และ Smith⁽²⁸⁾ จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบ คุณสมบัติในด้านการยึดติดของซีลเลอร์กับเนื้อฟัน เพื่อจะอ้างอิงไปยังคุณสมบัติในด้านความแนบสนิทและความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม อย่างไรก็ตามจากการศึกษาโดย Ørstavik และ คณะ⁽⁸⁷⁾ เปรียบเทียบการศึกษาด้านความแข็งแรงของพันธะต่อเนื้อฟันกับการศึกษาด้านการรั่วซึมของวัสดุอุดคลองรากฟันโดยใช้ซีลเลอร์ชนิดเดียวกัน กลับไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาอ้างอิงเปรียบเทียบกันได้ นอกจากนั้นการอุดคลองรากฟันโดยใช้กัตตาเปอร์ชาพร้อมกับซีลเลอร์ การยึดติดของวัสดุอุดจะเกิดได้ทั้งจากการยึดระหว่างกัตตาเปอร์ชากับซีลเลอร์, ซีลเลอร์กับผนังคลองรากฟันและภายในเนื้อซีลเลอร์เองการศึกษาด้านการรั่วซึมจะไม่สามารถ บ่งบอกได้ว่าความไม่แนบสนิทนั้นเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวใด⁽¹⁹⁾

การทดสอบความแข็งแรงพันธะ (Bond strength test)

การศึกษาเรื่องความแข็งแรงของพันธะ (bond strength test) ของวัสดุต่อเนื้อฟัน แสดงถึงความมีเสถียรภาพของวัสดุอุดในคลองรากในการต้านทานการหลุดระหว่างการเตรียมการบูรณะบริเวณส่วนต้นและส่วนกลางของคลองรากฟัน⁽⁸⁸⁾ และสามารถในการคงความแนบสนิทได้เมื่อได้รับแรงดัดของฟัน (tooth flexure) จากการใช้งาน และความต้านทานการแตกหักของฟันที่ได้รับการ รักษา^(89, 90) การยึดอยู่ที่ไม่ดี อาจมีความสัมพันธ์กับโอกาสการเกิดการรั่วซึมบริเวณปลายราก⁽⁹¹⁾ ดังนั้นการล้มเหลวของการยึดติดบริเวณดังกล่าวจะเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดการล้มเหลวทั้งด้าน การรักษาคลองรากฟัน และการบูรณะภายหลังการรักษา

การทดสอบความแข็งแรงของพันธะของ วัสดุอุดคลองรากฟันมีหลายวิธี ในปี 1976 Grossman⁽²⁰⁾ ศึกษาโดยการยึดวัสดุติดของพื้นผิวแก้วที่ ทำให้ขรุขระเพื่อจำลองลักษณะของเนื้อฟัน แต่ลักษณะดังกล่าว แตกต่างจากลักษณะเนื้อฟันที่แท้ จริงมาก ปี 1990 Wennberg และ Ørstavik⁽⁹²⁾ ได้พยายามจำลองลักษณะการยึดติดของซีลเลอร์ทาง คลินิกโดยใช้ซีลเลอร์ที่มีลักษณะเป็นชั้น บางๆ อยู่ระหว่าง ส่วนของกัตตาเปอร์ชาและเนื้อฟัน (bovine dentin) รูปแบบการทดสอบดังกล่าว เป็นการทดสอบความแข็งแรงของพันธะดึง (tensile bond strength test) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการ ศึกษาอื่นๆ ในเวลาต่อมา^(19, 93) แต่การทดสอบลักษณะนี้ เมื่อใช้กับซีลเลอร์ทางเอนโดดอนติกส์ อาจไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากมีความแข็งแรงพันธะต่ำ ควรใช้พื้นที่ผิวในการยึดติดมากเพียงพอ และต้องใช้ซีลเลอร์ ในลักษณะปริมาณมวลมาก (bulk)⁽¹⁹⁾ นอกจากนั้น การทดสอบความแข็งแรงของพันธะ ดึงไม่ว่ารูปแบบใด จะมีโอกาสที่ชิ้นงานจะถูกแรงกระทำในแนว (transverse force) ทั้งจากเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดสอบ และการจัดวางชิ้นงานที่มีการควบคุมไม่ดีพอ⁽⁸⁷⁾

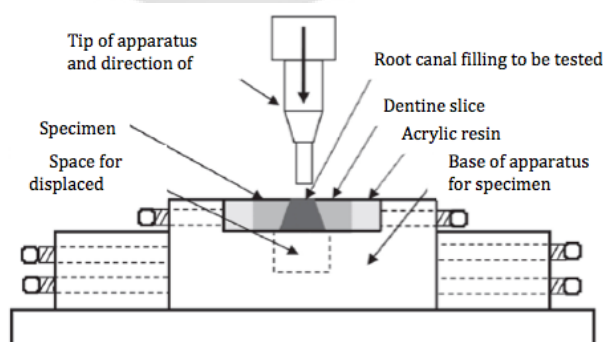
Tagger และคณะ⁽⁶¹⁾ เห็นว่า การการศึกษาจำลองจากทางคลินิกโดยใช้ซีลเลอร์ที่มีลักษณะ บาง อยู่ระหว่างกัตตาเปอร์ชาและเนื้อฟันนั้น มีความซับซ้อน ทำซ้ำได้ยาก ค่าความแข็งแรงพันธะ ที่ ได้ เป็นค่าที่เกิดร่วมกัน ทั้งจากแรงยึดระหว่างซีลเลอร์กับเนื้อฟัน หรือซีลเลอร์กับกัตตาเปอร์ชา หรือ ในตัวซีลเลอร์เอง ในขณะที่ซีลเลอร์ทางเอนโดดอนติกส์ผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การ เปรียบเทียบทำได้ยาก จึงพยายามเลือกใช้แบบจำลองที่สามารถทำได้ง่าย สามารถทำซ้ำ และนำไปใช้ ในการศึกษาอื่นได้ โดยสร้างรูปแบบการทดสอบ เป็นการวัดความแข็งแรงของพันธะเฉือน (shear bond strength test) แยกศึกษาเป็นการยึดติดระหว่างซีลเลอร์ กับกัตตาเปอร์ชาที่ถูกหลอม และอัดเป็น แผ่นกลม และ ซีลเลอร์กับเนื้อฟัน โดยใช้เนื้อฟันบริเวณตัวฟันเหนือต่อส่วนยอดเนื้อเยื่อใน (pulp horn) เนื่องจากสามารถควบคุมลักษณะทางกายวิภาคให้ได้มาตรฐานได้ง่าย

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการทดสอบความแข็งแรงของพันธะทั้งแบบพันธะดึงและพันธะ เฉือน คือ ค่าแรงยึดที่ได้จากการทดสอบทั้งสองสามารถผันแปรไปได้ง่าย ขึ้นกับการจัดสภาวะต่างๆ ของการทดลอง เช่น ตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม ทั้งของวัสดุที่ใช้ทดสอบ (material) และสารตั้งต้น (substrate), การกระจายของแรงบนพื้นผิวที่กว้าง มักมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) ทำให้ ความเครียดเกิดขึ้นเพียงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง การแตกหักอาจเกิดที่ตำแหน่งที่มีความบกพร่อง (flaw) ในส่วนวัสดุที่ใช้ทดสอบ ทำให้ค่าแรงที่ได้ไม่ใช่ตัวแทนของค่าความแข็งแรงพันธะที่แท้จริง^(94, 95)

Sano และคณะ ในปี 1994⁽⁹⁶⁾ ได้พัฒนารูปแบบของการทดสอบความแข็งแรงของพันธะ เพื่อ แก้ปัญหาการกระจายแรงที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบ ด้วยการลดขนาด พื้นผิว โดยการตัด(section)เป็นส่วนย่อยและแต่งเล็ม(trim) ให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำมายึดกับเครื่องมือจับยึด (microgrip) เพื่อทดสอบความแข็งแรงของพันธะดึง เรียกรูปแบบการทดสอบดังกล่าวว่า microtensile bond strength test ลักษณะเช่นนี้ จะลดขนาดและจำนวนของส่วนวัสดุที่มีความบกพร่องลง ส่งผลให้ ค่าแรงที่วัดได้เพิ่มสูงขึ้น จัดว่าเป็นวิธีที่ให้ค่าความแข็งแรงของพันธะใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง⁽⁹⁴⁾ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุอุดคลองรากฟันเนื่อง จากมีโอกาสเกิดความ ล้มเหลวก่อนการทดสอบและค่าที่ได้จากการทดสอบมีความผันแปรมาก⁽⁹⁷⁾

การทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด (Push-out test) ถูกใช้ศึกษาครั้งแรกทางด้านทันตกรรม ในการประเมินความแข็งแรงพันธะ ของวัสดุอุดภายในโพรงฟันส่วนตัวฟันที่เตรียมเป็นแผ่นบาง เรียกวิธีดังกล่าวว่า "Extrusion test" และได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินความแข็งแรง ของพันธะของวัสดุอุดในคลองรากฟันจำนวนมาก โดยหลักการ คือการตัดขวางส่วนของรากฟัน ในแนวตั้งฉากกับแกนฟัน ให้ได้ลักษณะเป็นแผ่นบาง วัสดุอุดจะถูกทำให้หลุดออกจากคลองรากฟัน ด้วยแรงกดจากแท่งกด (plunger) ความแข็งแรงของพันธะเฉือนระหว่างพื้นผิว (interfacial shear bond strength) ถูกกำหนดโดยค่าแรงที่ทำให้วัสดุหลุดออกและพื้นที่ผิวระหว่างวัสดุอุดและผนังคลองรากฟัน (ภาพประกอบ 6) อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยจำนวนมากที่มีผลต่อความแข็งแรงของ พันธะ ทั้งการเลือกและเตรียมชิ้นงาน, ลักษณะการเก็บ, การเตรียมพื้นผิวสำหรับการยึดติด⁽⁹⁸⁾ การปรับเปลี่ยนวิธีการเพียงเล็กน้อย จะมีผลต่อค่าความแข็งแรงของพันธะได้แตกต่างกัน 2-4 เท่า⁽⁹⁹⁾ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน มีความพยายามในการกำหนดมาตรฐานการศึกษาความแข็งแรงพันธะขึ้นแต่ไม่เป็นที่นิยมนัก การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบแต่ละการศึกษาไม่สามารถทำได้ ทำได้เพียงการเปรียบเทียบภายในการศึกษาเดียวกัน

แม้ว่าการทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด จะมีข้อเสียคือ การกระจายตัวของแรงที่ไม่สม่ำเสมอ (nonuniform stress distribution) และอาจมีการเสียรูปร่างของวัสดุอุดชนิด เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เมื่อได้รับแรงกดขณะทำการทดสอบ⁽⁹⁴⁾ แต่ข้อดีของวิธีการนี้ ได้แก่ สามารถจำลองลักษณะคล้ายการใช้งานจริงทางคลินิกทั้งด้านรูปร่างคลองรากและลักษณะการเรียงตัวของท่อเนื้อฟัน⁽¹⁰⁰⁾ การจัดวางตำแหน่งชิ้นงานสามารถทำได้ง่าย⁽¹⁰¹⁾ สามารถใช้ประเมินผลได้ดีกว่า การทดสอบความแข็งแรงของพันธะเฉือนแบบดั้งเดิม (conventional shear bond strength test)^(45, 102) ความแตกต่างกันเล็กน้อยของชิ้นงานและการกระจายของแรงไม่ส่งผลต่อการทดสอบมากนัก⁽¹⁰³⁾ นอกจากนี้ สามารถทดสอบได้กับซิลิเคอร์อุดคลองรากฟันบางชนิด ที่อาจมีแรงยึดต่อฟันไม่มากนัก^(101, 104)



ภาพประกอบ 6 แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด⁽¹⁰⁵⁾

สำหรับความหนาของแผ่นเนื้อฟันที่ใช้ศึกษามีหลากหลายตั้งแต่ 0.6 - 7.0 มิลลิเมตร^(105, 106) จากการศึกษาพบว่าการตัดรากฟันให้ได้ลักษณะเป็นแผ่นบาง (thin-slice push-out test) สามารถทำให้การกระจายแรงทำได้อย่างสม่ำเสมอ (uniformity) นอกจากนั้นทำให้สามารถวัดค่าความแข็งแรงของพันธะของวัสดุติดกับคลองรากฟันในหลายๆระดับ⁽⁹⁵⁾ จึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในด้านทันตกรรมบูรณะและทางเอนโดดอนติกส์ Pane และคณะ⁽¹⁰⁰⁾ ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ของวัสดุอุดภายในคลองรากฟัน ได้แก่ ความแข็งตัวของวัสดุแกนกลาง (core material stiffness) การจัดวางตำแหน่งของชิ้นงาน (specimen orientation), ขนาดของฟันช์ (punch sizes) และเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟัน (root canal diameters) ที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้กั๊ดตาเปอร์ชา อาจทำให้เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ได้ และจะให้ค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดที่ต่ำกว่าการใช้วัสดุแกนกลางที่มีความแข็งตึงมาก ในด้านการจัดวางตำแหน่งของชิ้นงาน พบว่าไม่มี ผลมากนัก เมื่อใช้กั๊ดตาเปอร์ชาเป็นวัสดุแกนกลาง โดยองศาในแนวแกนตั้งที่เบี่ยงเบนน้อยกว่า 10 องศา ไม่มีผลต่อความแข็งแรงพันธะ สำหรับขนาดของฟันช์พบว่า เมื่อฟันช์มีขนาด 70%-90% ของเส้นผ่านศูนย์กลางคลองรากฟัน จะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะ สอดคล้องกับการศึกษาของ Nagas และคณะ⁽¹⁰⁷⁾ และให้ข้อสรุปว่า แม้ว่าจะมีข้อจำกัดต่างๆ แต่การทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดโดยการใช้กั๊ดตาเปอร์ชา เป็นวัสดุแกนกลางยังคงเป็นการศึกษาที่เหมาะสมในการจัดลำดับความแข็งแรงของพันธะ เนื่องจากความล้มเหลวที่เกิดเมื่อได้รับแรงเกิดที่บริเวณรอยต่อ มากกว่าภายในเนื้อวัสดุแกนกลาง⁽¹⁰⁰⁾

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
2. การเลือกกลุ่มตัวอย่างและการคำนวณขนาดตัวอย่าง
3. ขั้นตอนการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ฟันมนุษย์จำนวน 100 ซี่ ซึ่งได้มาจากฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งและสอง ซึ่งมีคลองรากเดียว
2. แสนด์พีซความเร็วสูง
3. แสนด์พีซความเร็วต่ำ
4. หัวกรอกากเพชรทรงกลมละเอียด
5. หัวกรอสแตนเลสสตีลรูปทรงกลม
6. เค ไฟล์ (K-file; Dentsply Maillefer; Ballaigues, Switzerland)
7. พีโซรีมเมอร์ดริล (Peeso reamer drills)
8. น้ำยาโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย)
9. น้ำยาอีดีทีเอ 17% (17%EDTA คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย)
10. กัตตาเปอร์ชา (Gutta percha; Dentsply Maillefer; Ballaigues, Switzerland)
11. ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (CU sealer; คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย) (ตาราง 4)
12. ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดอีพอกซีเรซิน (AH Plus®; Dentsply, Zurich, Switzerland) (ตาราง 4)
13. ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดมินิเอนรัลไตรออกไซด์แอกทีเกต (MTA fillapex; Angelus, Londrina, PR, Brazil) (ตาราง 4)
14. คิววิท จี (Cavit G; 3M-ESPE, St Pual, MN, USA)
15. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer saline solution)
16. ขี้ผึ้งชนิดเหนียว (sticky wax; Kerr Inc., Orange, CA, USA)
17. กาวไซยาโนอะคริเลตชนิดแข็งตัวเร็ว (rapid-setting cyanoacrylate glue)
18. ยาทาเล็บ (nail vanish; Revlon, Jakarta, Indonesia)
19. กระบอกพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร
20. คูแมสซีบริลเลียนบลู (Coomassie Brilliant Blue; G-250, Bio-Rad Corporation, USA)

23. โบวีนเซรัมอัลบูมิน 22% (22% Bovine Serum Albumin; BSA)
24. เอทานอล 95% (95% Ethanol)
25. กรดฟอสฟอริก 85% (85% Phosphoric acid)
26. น้ำกลั่นประเภทที่ 1 (Type I Distilled water)
27. เครื่องสำรวจความขนาน (Surveyor)
28. เครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer; Asys UVM 340 Microplate Reader, Biochrom, Cambridge, UK)
29. เครื่องตัดชนิดใบเลื่อยกากเพชรความเร็วรอบต่ำ (Low speed diamond saw; ISOMET 1000, Buehler Ltd., Lake bluff, IL, USA)
30. เครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine: EZ Test Series, Shimadzu, Kyoto, Japan)
31. แท่งกดสแตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร
32. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope JSM-6510LV; JEOL, Tokyo, Japan)
33. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper)

ตาราง 4 องค์ประกอบของซีลเลอร์และบริษัทผู้ผลิต

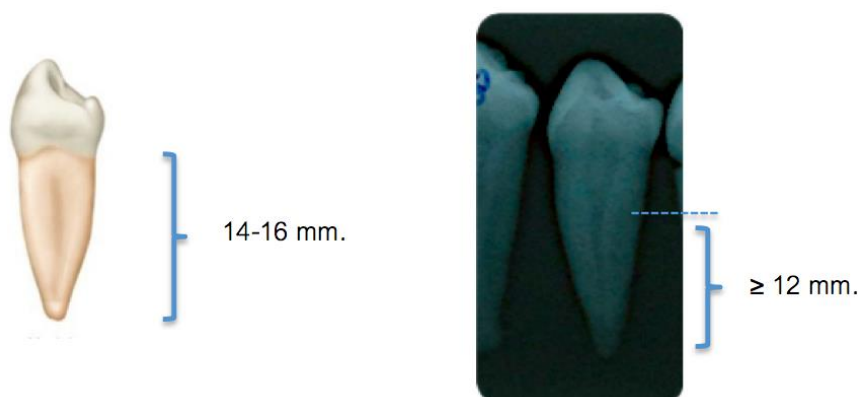
ซีลเลอร์	องค์ประกอบ	บริษัทผู้ผลิต
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (CU sealer) 	Zinc Oxide Eugenol	คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิด อีพอกซีเรซิน (AH Plus™) 	Paste A : epoxy resin, calcium tungstate; zirconium oxide; aerosil and iron oxide Paste B: aminoadamantane, N,N'-dibenzyl-5-oxa- nonandiamine-1,9, TCD- diamine; calcium tungstate, zirconium oxide, aerosil, silicone oil	Dentsply, Zurich, Switzerland

ตาราง 4 (ต่อ)

ซีลเลอร์	องค์ประกอบ	บริษัทผู้ผลิต
ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิด มินิเอร์ล ไทรออกไซด์แอกทีเกต (MTA fillapex) 	Paste A : Salicylate resin, Bismuth Trioxide, Fumed Silica Paste B : Fumed Silica Titanium Dioxide, MTA	Angelus, Londrina, PR, Brazil

การเลือกกลุ่มตัวอย่างและการคำนวณขนาดตัวอย่าง

เลือกใช้ฟันกรามน้อยแท้ของมนุษย์ ในการทดสอบการรั่วซึม โดยใช้แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีนจำนวน 55 ซี่ และทดสอบความแข็งแรงพันธะของเนื้อฟันจำนวน 45 ซี่ หลังจากถอนออกมาแล้ว จะถูกเก็บในสารละลายไธมอล (Thymol) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิห้อง ฟันที่นำมาคัดเลือก เพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นฟันที่มีรากตรงรากเดียว ที่มีการสร้างรากฟัน สมบูรณ์ ปลายรากปิด รากฟันไม่มีรอยแตก รอยผุ หรือปลายรากละลาย ระยะจากรอยต่อระหว่าง เคลือบรากฟันและผิวเคลือบฟันถึงปลายรากฟัน มีความยาว 14-16 มิลลิเมตร เมื่อผ่านเกณฑ์ข้างต้นแล้วนำมาตรวจสอบลักษณะคลองรากฟันด้วยการถ่ายภาพรังสีทั้งทางด้านแก้มลิ้น และทางด้านใกล้กลาง ไกลกลาง คัดเลือกฟันที่มีลักษณะเป็นคลองรากฟันเดียว มีความสอบของคลองรากฟัน เป็นความยาวอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมขนาดคลองรากฟันหลังการเตรียม (ภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 7 ฟันตัวอย่างที่มีลักษณะคลองรากฟันและรากฟันตามเกณฑ์การคัดเลือก

การคำนวณขนาดตัวอย่าง คำนวณจากสูตร

$$n = \frac{\sigma^2 Z^2}{e^2}$$

n = ขนาดตัวอย่างที่ต้องการ

e = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

Z = ค่า Z ที่ระดับความเชื่อมั่นหรือระดับนัยสำคัญ ถ้าระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 มีค่า $Z = 1.96$

σ = Standard deviation ของความแตกต่างของค่าเฉลี่ย = 0.82

ได้จากการทำการศึกษานำร่อง และทบทวนงานวิจัยที่ใช้เครื่องมือชนิดเดียวกัน และมีการศึกษาในลักษณะแนวทางเดียวกัน

$$n = \frac{0.82^2 1.96^2}{0.45^2} = 12.76$$

ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 15

ขั้นตอนการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ตอนที่ 1 การทดสอบการรับรู้โดยใช้แบบจำลองการรับรู้ของโปรตีน

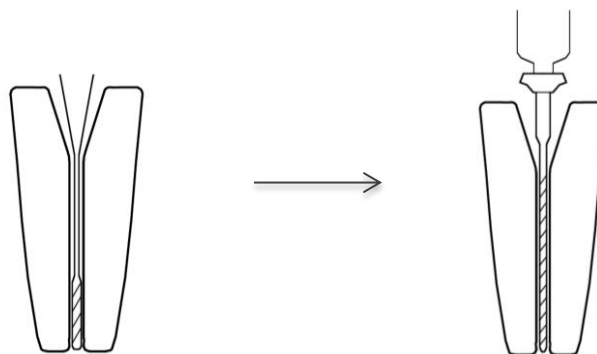
1. การเตรียมฟันตัวอย่าง

1.1 นำมาทำความสะอาด ขูดเศษเนื้อเยื่อและหินน้ำลายออก โดยใช้เครื่องมือขูดหินน้ำลายอัลตราโซนิค หลังจากนั้นตัดส่วนปลายรากฟันออก 2 มิลลิเมตร ด้วยหัวกรอกากเพชรทรงกระบอก (Cylinder diamond bur) ขนาด 020 ที่มีน้ำหล่อเย็น (coolant) เพื่อกำจัดคลองรากฟันหลัก ที่ไม่ได้อยู่กลางรากฟันและจำลองลักษณะของฟันที่ไม่มีจุดคอดปลายราก ตัดส่วนตัวฟันออกให้ได้ความยาวฟันจากปลายสุดของรากฟันถึงส่วนตัวฟัน 14 มิลลิเมตร ด้วยหัวกรอกากเพชรทรงกระบอก (Cylinder diamond bur) ขนาด 020 ที่มีน้ำหล่อเย็น เพื่อให้ทางเข้าสู่คลองรากฟันเป็นเส้นตรง (straight line access) ตรวจสอบความยาวรากฟันให้ยาวเท่ากับ 14 มิลลิเมตร โดยใช้ ไฟล์เบอร์ 15 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ใส่ในคลองรากฟันจนสามารถมองเห็นปลายไฟล์พอดีปลายรากฟัน

1.2 กำจัดเนื้อเยื่อในฟันโดยใช้บาร์บโบรช (Barbed broach) ทำการขยายคลองรากฟันเพื่อสร้างแบบจำลองฟันที่มีลักษณะปลายรากกว้าง ด้วยพีโซรีมเมอร์ (Peeso reamer) ขนาด 1 จนถึงความยาวรากฟัน จะได้ขนาดความกว้าง ในส่วนปลายรากฟันประมาณ 0.7 มิลลิเมตร จากนั้นใช้เคไฟล์ (K-file) ขนาด 80 ตะไบจากทางส่วนตัวฟันและวัดขนาดคลองราก ฟันบริเวณปลายรากให้ มีขนาดเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรเท่ากันทุกคลองรากฟัน (ภาพประกอบ 8) จะได้ลักษณะคลองราก ฟันที่ค่อนข้างขนาน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายรากฟัน เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ถ่ายภาพรังสี เพื่อตรวจสอบรูปร่าง และขนาดของคลองรากฟันอีกครั้ง

Peeso Reamer No.1

K-file size 80

ภาพประกอบ 8 การสร้างแบบจำลองฟันที่มีลักษณะปลายรากเปิด⁽¹⁰⁸⁾

1.3 ล้างคลองรากฟันด้วยน้ำยาโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ทุกครั้งที่เปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ขยายทั้งพีโซรีเมอร์และไฟล์ ล้างครั้งละ 2 มิลลิลิตร รวมปริมาณน้ำยาที่ใช้ทั้งหมด ในแต่ละคลองรากฟันเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อคลองรากฟัน หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำยาอีดีทีเอ (EDTA) ร้อยละ 17 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที ล้างคลองรากฟันครั้งสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร

1.4 ฝังส่วนของรากฟันลงใน ฟลอรัลโฟม (floral foam) เพื่อจำลองสถานการณ์ทางคลินิกแทนส่วนเนื้อเยื่อปริทันต์ เพื่อให้มีแรงต้านจากรอบปลายรากฟันขณะทำการอุดคลองรากฟัน

1.5 ขับคลองรากฟันให้แห้งด้วยแท่งกระดาษซับ (paper point) ลองกัตตาเปอร์ชา แท่งหลักขนาด 80 ความสอ 0.02 ให้รู้สึกถึงแรงต้านที่ส่วนปลายราก (tug back) หลังจากนั้น ทำการอุดคลองรากฟัน โดยรากฟันจะถูกแบ่งอย่างสุ่ม ออกเป็น 3 กลุ่มทดลอง กลุ่มละ 15 ซี่ และ กลุ่มควบคุม กลุ่มละ 5 ซี่ ดังแสดง (ตาราง 5)

ตาราง 5 การแบ่งกลุ่มทดลองตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้

กลุ่มทดลอง	วิธีการอุด / ซีลเลอร์	จำนวนฟัน
กลุ่มที่ 1	Lateral condensation / Zinc oxide eugenol-based sealer	15
กลุ่มที่ 2	Lateral condensation / Epoxy resin-based sealer (AH Plus)	15
กลุ่มที่ 3	Lateral condensation / MTA-based sealer (MTA fillapex)	15
กลุ่มควบคุม		
Positive control	Lateral condensation / -	5
Negative control	-	5

ซีลเลอร์ทุกชนิดผสมตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ซีลเลอร์จะถูกผสมโดยผ่านเกลียวผสมสำเร็จรูป (mixing tip) ที่ต่อกับกระบอกฉีดของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นนำกัตตาเปอร์ชามาเคลือบซีลเลอร์ทันที ให้มีลักษณะเป็นชั้นของซีลเลอร์บางๆ ซีลเลอร์ทุกชนิดจะเคลือบบนกัตตาเปอร์ชาแห่งหลักก่อนใส่ลงในคลองรากฟัน และขยับขึ้นลงให้เคลือบอย่างทั่วถึง ในคลองรากฟันก่อนทำการอุดด้วยวิธีเลทเทอร์อัลคอนเดนเซชัน สำหรับกลุ่มควบคุมบวก อุดคลองรากฟันโดยวิธีเลทเทอร์อัลคอนเดนเซชัน โดยไม่ได้ใช้ซีลเลอร์ ส่วนกลุ่มควบคุมลบไม่ได้ทำการอุดคลองรากฟัน

1.6 หลังจากอุดคลองรากฟัน ทำการตรวจสอบคุณภาพการอุดคลองรากฟันให้แน่นเต็มด้วยภาพรังสี หลังจากนั้นทำการห่อหุ้มรากฟันทั้งหมดด้วยผ้าก๊อซที่ชื้น เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้ซีลเลอร์แข็งตัวสมบูรณ์

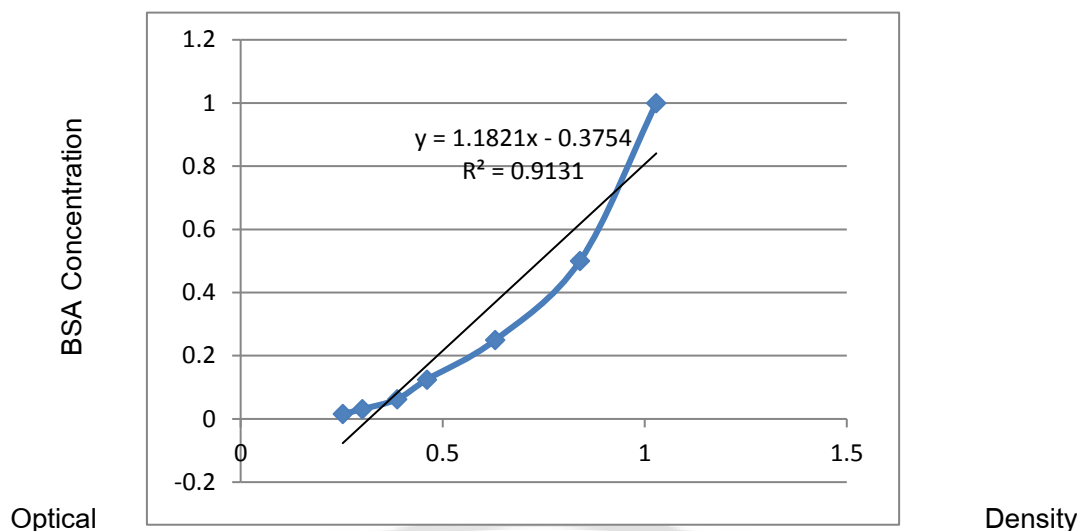
1.7 แช่ฟันกลุ่มทดลองทั้งหมดในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffered saline solution, pH7.2) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน โดยจะทำการเปลี่ยนสารละลายทุก 7 วัน

2. การทดสอบการรั่วซึมของโปรตีน

2.1 นำฟันออกจากสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ทำให้แห้งและเคลือบพื้นผิว รากฟันทั้งหมดด้วยน้ำยาทาเล็บสองชั้น ยกเว้นส่วนรอบปลายรากฟัน 2 มิลลิเมตร สำหรับกลุ่มควบคุมลบ ส่วนปลายรากรวมทั้งรูเปิดปลายรากฟันและพื้นผิวรากฟันทั้งหมดจะเคลือบปิดด้วยน้ำยาทาเล็บสองชั้น

2.2 การเตรียมสารที่ใช้ทดสอบ หรือแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนต์ (Bradford protein reagent) เตรียมโดยวิธีการของ Bradford⁽⁸³⁾ คือ นำคูแมสซีบิลเลียนบลู ไปละลายในเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมกรดฟอสฟอริกร้อยละ 85 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และนำมาเจือจาง ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งได้ปริมาตรสุดท้าย เท่ากับ 1 ลิตร ดังนั้น ความเข้มข้นสุดท้ายของสารที่ใช้ทดสอบ คือ คูแมสซีบิลเลียนบลูร้อยละ 0.01 เอทานอลร้อยละ 4.7 และ กรดฟอสฟอริกร้อยละ 8.5 โดยมวลต่อปริมาตร กรองสารละลายที่เตรียมได้และเก็บในภาชนะแก้วทึบแสง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.3 สร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (calibration curve) โดยการนำสารละลายโบไวน์เซรัมอัลบูมินร้อยละ 22 ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน มาทดสอบด้วยแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนต์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่องวัดความเข้มของแสง (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร นำความสัมพันธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ จากนั้นเมื่อทำการทดลอง จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่รั่วซึม ได้จากสมการเชิงเส้นของกราฟมาตรฐานที่ได้ทำขึ้นในครั้งนี้ แสดงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ตัวอย่างกราฟแสดงความเข้มข้นมาตรฐาน จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน x) และ ความเข้มข้นของสารละลาย BSA (แกน y)

2.4 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ดัดแปลงมาจาก การศึกษาของ Vaois และ Costa⁽⁷⁰⁾ ประกอบด้วยภาชนะส่วนล่างและภาชนะส่วนบน ส่วนภาชนะส่วนล่างเป็นขวดพลาสติกขนาดเล็ก บรรจุน้ำกลั่น ขนาด 5 มิลลิลิตร

ส่วนภาชนะส่วนบน เป็นฝาครอบพลาสติกขนาดแนบสนิทพอดีกับส่วนล่าง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ส่วนฝาจะถูกทำให้เป็นรูโดยหัวกรอช้า และความร้อนเพื่อให้เป็นที่ยึดของชิ้นพื้นตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบโดยหันส่วนตัวพื้นขึ้นสู่ภาชนะส่วนบน ยึดชิ้นพื้นตัวอย่าง กับฝาพลาสติกด้วยขี้ผึ้งชนิดเหนียว (sticky wax) จากนั้นใช้น้ำยาทาเล็บเคลือบปิดผิวของฝาพลาสติก และบริเวณรอยต่อของชิ้นพื้นตัวอย่าง 2 รอบ ทั้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ด้านบนปิดด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบาง (ภาพประกอบ 10) เป็นส่วนที่ใช้บรรจุ โปรตีนที่ใช้ทดสอบการรั่วซึม คือ โบไวน์เซรัมอัลบูมินร้อยละ 22 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ดังนั้นแบบจำลองดังกล่าวจะมีลักษณะ ดังนี้ คือ ส่วนปลายรากฟันจะแช่น้ำกลั่น ในภาชนะส่วนล่าง ส่วนของรากฟันทางด้านตัวพื้น (coronal) จะอยู่ในภาชนะส่วนบนสัมผัสกับโปรตีนที่ใช้ทดสอบตลอดเวลา ก่อนการศึกษาจะนำน้ำกลั่นจากภาชนะส่วนล่างไปวัดการรั่วซึมของโปรตีนก่อน เพื่อยืนยันว่าปราศจากโปรตีนเจือปนก่อนการทดสอบ

แบบจำลองทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการศึกษา โดยจะทำการเปลี่ยนสารละลายโปรตีนในภาชนะส่วนบน ทุกวัน โปรตีนจะมีปริมาตรคงที่เท่ากับ 1 มิลลิลิตรตลอดเวลา รวมถึงเติมน้ำกลั่นเพิ่ม ในภาชนะส่วนล่าง เมื่อนำสารละลายในภาชนะส่วนล่างไปวัดปริมาณโปรตีนที่รั่วซึมผ่านชั้นงาน เพื่อควบคุม ให้มีปริมาตรน้ำกลั่นเท่าเดิมตลอดการทดลอง



ภาพประกอบ 10 แบบจำลองการทดสอบการรั่วซึมของโปรตีน

2.5 วิธีวัดการรั่วซึม ทำโดยวัดปริมาณโปรตีน (protein assay) โดยการปิเปตสารละลายจากภาชนะส่วนล่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ให้สารทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 15 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ทำซ้ำ 3 ครั้งเพื่อนำมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย โดยทำการวัดค่าสารละลายแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 20 ไมโครลิตรเพื่อเป็นค่าของสารละลายมาตรฐาน ก่อนเริ่มวัดการละลายจากแบบจำลองของกลุ่มทดลองทุกครั้ง นำค่าที่วัดได้จากแบบจำลองของกลุ่มทดลองมาคำนวณหาความเข้มข้นของโบวีนเซอร์อัลบูมิน จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากกราฟมาตรฐาน สารละลายที่ใช้ทดสอบจาก ทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง จะถูกนำมาวัดค่าการ รั่วซึม ที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน

ตอนที่ 2 การทดสอบความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด

1. การเตรียมฟันที่ใช้ในการทดลอง

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างฟันในการทดสอบการรั่วซึมจนถึงขั้นตอนการอุดคลองรากฟัน รากฟันจะถูกแบ่งออกเป็นสามกลุ่มตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้ (ตาราง 6) ทำการอุดคลองรากฟันบริเวณส่วนปลายราก จนถึงระดับ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน หลังจากนั้นปิดด้วยวัสดุอุดชั่วคราว ทำการห่อหุ้มรากฟันทั้งหมดด้วยผ้าก๊อชที่ชื้น เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้ซีลเลอร์แข็งตัวสมบูรณ์ แخذตัวอย่างฟันกลุ่มทดลองทั้งหมดในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เป็นเวลา 28 วัน

ตาราง 6 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามชนิดของซีลเลอร์ที่ใช้

กลุ่มทดลอง	วิธีการอุด / ซีลเลอร์	จำนวนฟัน
กลุ่มที่ 1	Lateral condensation / Zinc oxide eugenol-based sealer	15
กลุ่มที่ 2	Lateral condensation / Epoxy resin-based sealer (AH Plus)	15
กลุ่มที่ 3	Lateral condensation / MTA-based sealer (MTA fillapex)	15

2. การเตรียมชิ้นฟันตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบความแข็งแรงพันธะของเนื้อฟัน

2.1 นำรากฟันที่ได้รับการอุดแล้วไปฝังในบล็อกเรซิน ให้มีลักษณะตั้งฉากกับฐานของบล็อก วัดโดยเครื่องสำรวจความขนาน (surveyor) (ภาพประกอบ 11 และ 12)



ภาพประกอบ 11 การใช้เครื่องสำรวจความขนานวัด รากฟันที่ได้รับการอุดแล้ว ก่อนทำการหล่อแบบด้วยเรซิน



ภาพประกอบ 12 ชิ้นงานหลังทำการหล่อแบบด้วยเรซิน

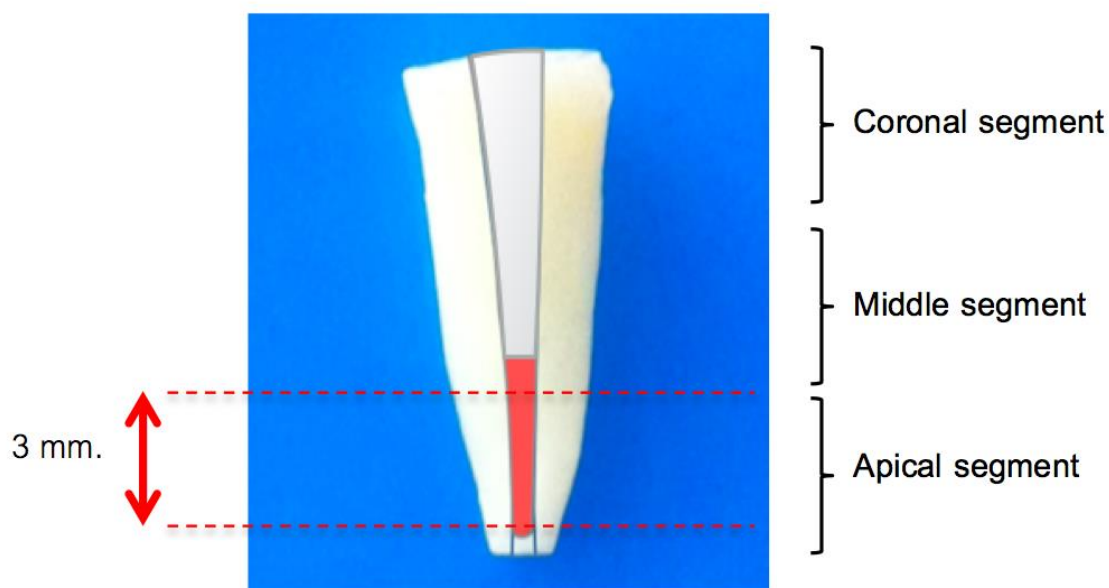
2.2 ตัดชิ้นงานเฉพาะส่วนปลายรากที่ต้องการศึกษาให้ได้ความหนาของชิ้นงานที่ทดสอบเท่ากับ 3 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 12) ด้วยเครื่องตัดชนิดใบเลื่อยกากเพชรความเร็วรอบต่ำ วัดความหนาของชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์

2.3 คัดเลือกชิ้นงานภายใต้กล้องกำลังขยาย 4 เท่า เลือกเฉพาะตัวอย่างที่มีรูปร่างกลมสมมาตร เพื่อให้การกระจายแรงทั่วถึงเท่าๆกัน ตัวอย่างชิ้นงานที่พื้นหลุดออกจากบล็อกระชินหรือวัสดุอุดคลองรากพื้นหลุดออกจากชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ (premature debonding) หรือชิ้นงานที่มีฟองอากาศใน ส่วนวัสดุอุดคลองรากพื้น หรือมีรอยร้าว จะไม่นำมาทดสอบ

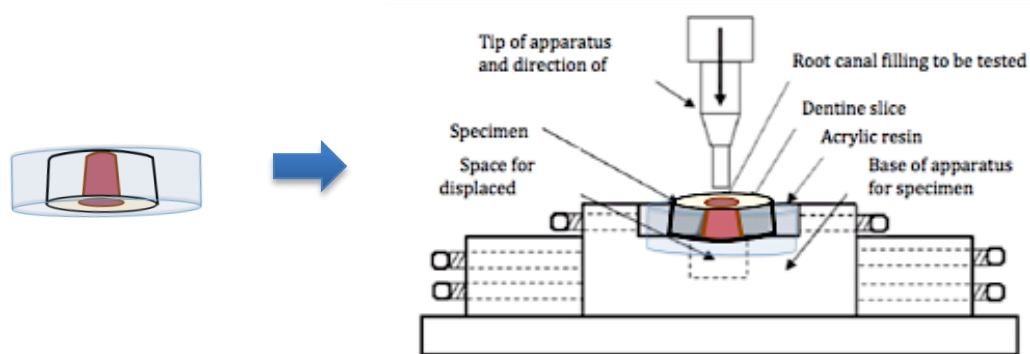
3. การทดสอบความแข็งแรงของพันธะต้านแรงกด

ชิ้นงานจะถูกทดสอบโดยเครื่องทดสอบสากล โดยวางชิ้นงานที่จะทดสอบบนแท่งโลหะ ทรงกลมที่มีรูตรงกลาง โดยจัดให้ส่วนรากฟัน (apical) ของชิ้นงานหันขึ้นด้านบน และตำแหน่งของวัสดุอุดในคลองรากฟันตรงกับรูกลวงของแท่งโลหะ เลือกใช้แท่งโลหะไร้สนิมที่มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟัน เป็นตัวกด (plunger) ซึ่งจะสัมผัสวัสดุอุดคลองรากฟัน กดในแนวตั้งฉากกับชิ้นงานด้วยความเร็วหัวทดสอบ (crosshead speed) 0.5 มิลลิเมตร ต่อนาที ทิศทางจากส่วนรากฟันไปทางตัวฟัน (apical to coronal) (ภาพประกอบ 14) จนกระทั่งวัสดุหลุดออกจากผนังคลองรากฟัน

ค่าแรงกดที่ลดลงแสดงถึงการสูญเสียแรงยึดพันธะบันทึกค่าแรงที่มากที่สุดก่อนที่วัสดุจะหลุดออกจากผนังคลองรากฟัน หน่วยเป็นนิวตัน (Newton; N) นำมาคำนวณค่าความแข็งแรงพันธะ ในหน่วยเมกะปาสคาล (Megapascal; MPa)



ภาพประกอบ 13 การแบ่งคลองรากฟันออกเป็น 3 ส่วน โดยวัสดุอุดจะอยู่ที่ส่วนปลายราก



ภาพประกอบ 14 ลักษณะชิ้นงานและการทดสอบความแข็งแรงของพันธะ⁽¹⁰⁵⁾

สูตรการคำนวณค่าความแข็งแรงของพันธะ

$$\text{Bond strength (MPa)} = \frac{\text{Maximum failure load (N)}}{\text{Adhesion area of root canal filling (mm}^2\text{)}}$$

โดยค่าพื้นที่ผิวยึดติดเท่ากับ $\pi(R+r)[h^2+(R-r)^2]^{0.5}$

$$\pi = 3.1416$$

R แทน รัศมีของคลองรากฟันส่วนใกล้ตัวฟัน หน่วยเป็น มิลลิเมตร

r แทน รัศมีของคลองรากฟันส่วนใกล้ปลายรากฟัน หน่วยเป็น มิลลิเมตร

h แทน ความหนาของแผ่นรากฟัน หน่วยเป็น มิลลิเมตร

4. วิเคราะห์รูปแบบการเสียหาย (Mode of failure analysis)

นำชิ้นงานที่สูญเสียการยึดติดกับวัสดุอุดคลองรากฟัน มาทำการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จัดแบ่งรูปแบบการเสียหายที่เกิดขึ้นออกเป็น ประเภทแรก ความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) คือ ความเสียหายทั้งหมดเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซีลเลอร์กับเนื้อฟัน ประเภทที่สอง ความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (Cohesive failure) คือ ความเสียหายทั้งหมดอยู่ภายในเนื้อซีลเลอร์ และความล้มเหลวแบบผสม (Mixed failure) คือ ความเสียหายเกิดขึ้นทั้งภายในชั้นของซีลเลอร์ และระหว่างชั้นของซีลเลอร์กับเนื้อฟัน คำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละของจำนวนชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดในแต่ละกลุ่ม บันทึกผล

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากค่าความเข้มข้นของโบวีนเซรัมอัลบูมินที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์จากกราฟ แสดงความเข้มข้นมาตรฐาน และค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด นำมาทดสอบว่ามีการแจกแจงเป็นโค้งปกติหรือไม่ โดยใช้การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov- Smirnov test) รวมทั้ง ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่าความแปรปรวนของตัวแปรตามทุกกลุ่มเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity of variance) การศึกษาตอนที่ 1 การทดสอบการร่วซึมโดยใช้แบบจำลองการร่วซึมของโปรตีน จากการ ทดสอบพบว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ ทำการเปรียบเทียบการร่วซึมของซีลเลอร์ทั้งสาม ชนิดในช่วงเวลาเดียวกัน ด้วยสถิติครัสคัล-วอลล์ลีส (Kruskal-Wallis test) หลังจากนั้นเปรียบเทียบรายคู่ด้วยสถิติแมนนิตนีย์ยู (Mann-Whitney U test) และเปรียบเทียบการร่วซึมของซีลเลอร์ชนิด เดียวกันที่ช่วงเวลาต่างๆด้วยสถิติทดสอบฟรีดแมน (Friedman test)

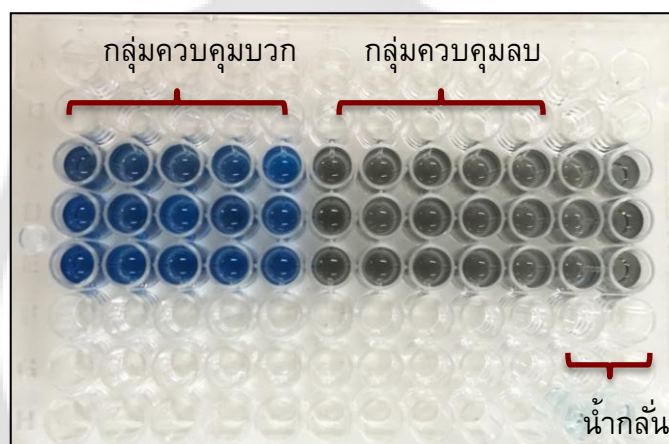
สำหรับการศึกษาตอนที่ 2 การทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด พบว่ามีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) จากนั้นทำการเปรียบเทียบภายหลังการวิเคราะห์ข้อมูล โดยวิธีการทดสอบของเกมส์โฮเวลล์ (Games-Howell test) ทั้งสองการศึกษาประมวลผลการทดลองด้วยโปรแกรม IBM SPSS รุ่น 21 (SPSS, Chicago, IL, USA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ผลการทดสอบการรั่วซึมโดยใช้แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน

จากการนำสารละลายจากภาชนะส่วนล่าง มาวัดค่าความเข้มข้น ของโปรตีนโบไวน์เซรัม อัลบูมินที่รั่วซึม พบว่ากลุ่มควบคุมบวก ทุก ตัวอย่าง ตรวจพบการรั่วซึมของโปรตีนตั้งแต่ 24 ชั่วโมงแรก โดยเห็นได้จากสีที่เปลี่ยนไปเป็นสีฟ้าอย่างชัดเจน เมื่อสัมผัสกับสารละลายแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์ กลุ่มควบคุมลบ ไม่พบการรั่วซึมตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ภาพประกอบ 15)



ภาพประกอบ 15 ลักษณะสารละลายจากภาชนะส่วนล่าง หลังทำปฏิกิริยากับสารละลายแบรดฟอร์ดโปรตีนรีเอเจนท์

การรั่วซึมของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันทั้งสามชนิด เพิ่มขึ้นตามเวลาในทุกช่วงเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุด ของซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์ เอเอชพลัส และ เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ แสดงดังตาราง 7

ในวันที่ 1 พบว่าซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซียูซีลเลอร์ มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีน โบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้มากที่สุด ร้อยละ 2.13×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร รองลงมา คือ ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอเอชพลัส ร้อยละ 1.18×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ขณะที่ไม่พบการรั่วซึมจากซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ โดยที่กลุ่มซียูซีลเลอร์ มีการรั่วซึมไม่แตกต่างกับเอเอชพลัส แต่ทั้งสองมีการรั่วซึมที่แตกต่างจากเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

วันที่ 8 ซียูซีลเลอร์ และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัม อัลบูมินที่ตรวจวัดได้ร้อยละ 39.39×10^{-4} และ 23.37×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตรตามลำดับ ทั้งสองมีการรั่วซึมไม่แตกต่างกัน ขณะที่เอเอสพลัสวัดค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินได้น้อยที่สุด ร้อยละ 1.61×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ต่างจากซียูซีลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ

วันที่ 15 ซียูซีลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัม อัลบูมินที่ตรวจวัดได้ร้อยละ 42.20×10^{-4} และ 40.29×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ตามลำดับ ทั้งสองมีการรั่วซึมไม่แตกต่างกัน ขณะที่เอเอสพลัส วัดค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินได้น้อยที่สุด ร้อยละ 31.77×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ต่างจากซียูซีลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ อย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ

หลังจากผ่านไป 28 วัน ซียูซีลเลอร์ และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ร้อยละ 231.57×10^{-4} และ 131.03×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ตามลำดับ ทั้งสองมีการรั่วซึมไม่แตกต่างกัน ขณะที่เอเอสพลัสวัดค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินได้น้อยที่สุด ร้อยละ 111.33×10^{-4} โดยมวลต่อปริมาตร ต่างจากซียูซีลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

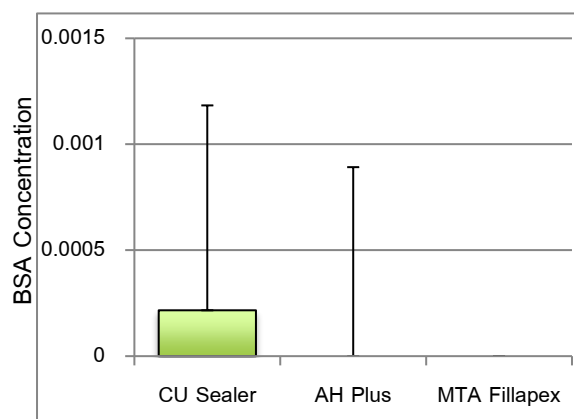
เมื่อเวลาผ่านไป กลุ่มที่ใช้ซียูซีลเลอร์ และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เป็นซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน มีแนวโน้มเกิดการรั่วซึมมากกว่าเอเอสพลัส โดยลักษณะการกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของโปรตีนโบไวน์เซรัมอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ แยกตามชนิดของซีลเลอร์ในแต่ละช่วงเวลา แสดงในรูปแบบกราฟแบบ กล่อง (Boxplot) (ภาพประกอบ 16)

นำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบการรั่วซึมของซีลเลอร์ทั้งสามชนิด พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากนั้นทดสอบเปรียบเทียบรายคู่ พบว่าทั้งกลุ่มซียูซีลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ รั่วซึมมากกว่าเอเอสพลัส ในวันที่ 8 15 และ 28 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

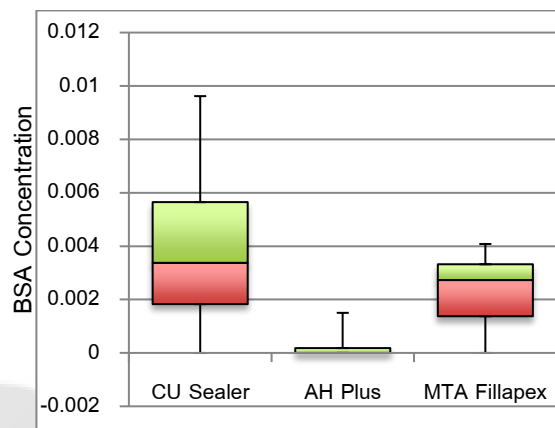
ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีนโปวไน์เซรั่มอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุด ของซีลเลอร์ แต่ละชนิด ในช่วงเวลาต่างๆ

Time (day)	Sealers (n=15)	BSA leakage ± SD (Percent mass by volume x10 ⁻⁴)	Mean mass (Percent mass by volume x10 ⁻⁴)	Minimum (Percent mass by volume x10 ⁻⁴)	Maximum (Percent mass by volume x10 ⁻⁴)
Day 1	CU sealer	2.13 ± 4.02		0.00	11.84
	AH Plus	1.18 ± 3.11		0.00	8.92
	MTA fillapex	0.00 ± 0.00		0.00	0.00
Day 8	CU sealer	39.39 ± 29.7		0.00	96.20
	AH Plus	1.61 ± 3.86		0.00	15.02
	MTA fillapex	23.37 ± 13.8		0.00	40.81
Day 15	CU sealer	42.20 ± 16.2		23.67	69.25
	AH Plus	31.77 ± 19.9		19.08	99.55
	MTA fillapex	40.29 ± 20.65		20.58	87.19
Day 28	CU sealer	231.75 ± 173.7		96.30	620.70
	AH Plus	111.33 ± 39.2		94.35	251.40
	MTA fillapex	131.03 ± 36.19		102.15	221.40

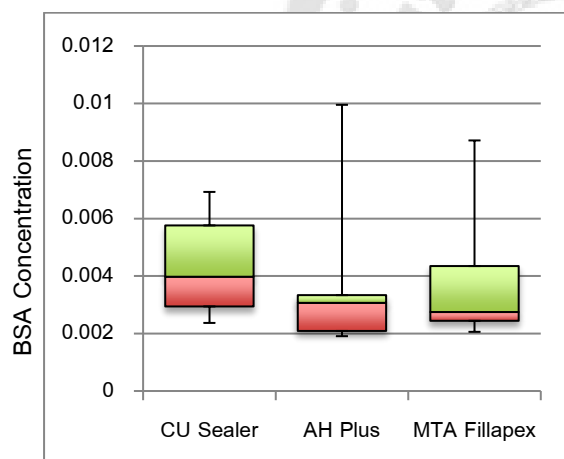
วันที่ 1



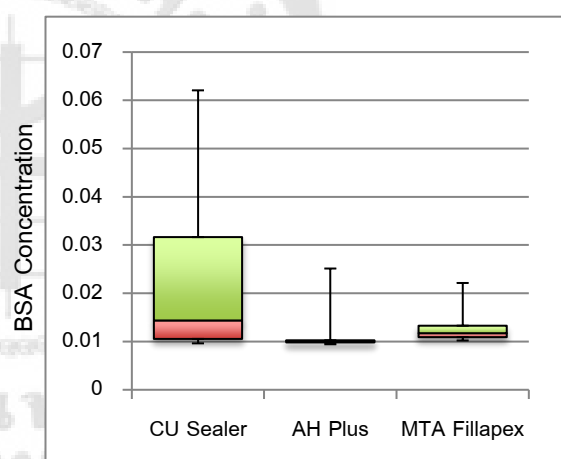
วันที่ 8



วันที่ 15



วันที่ 28



ภาพประกอบ 16 กราฟแบบกล่องแสดงค่าความเข้มข้นของโปรตีนโบวีนเซรั่มอัลบูมินที่ตรวจวัดได้ แสดงค่ามัธยฐาน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ขอบเขตเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และ 75 แยกตามช่วงเวลา

ตอนที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด

จากการประเมินค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน 3 ชนิด ได้ผลดังตาราง 8

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน 3 ชนิด

Sealers	n	Push-out bond strength Mean $\pm$ SD (MPa)	Minimum (MPa)	Maximum (MPa)
CU sealer	15	0.11 $\pm$ 0.03 ^a	0.08	0.18
AH Plus	15	1.05 $\pm$ 0.07 ^b	0.61	1.64
MTA Fillapex	15	0.29 $\pm$ 0.08 ^c	0.18	0.42

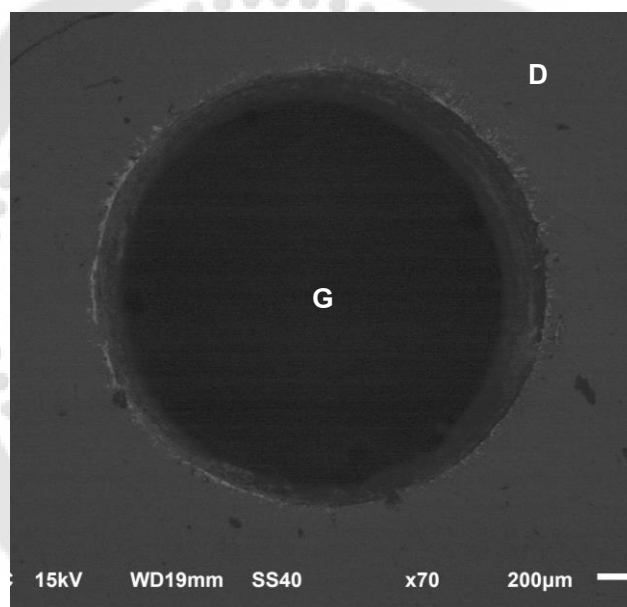
ตัวอักษร a,b,c ที่ต่างกันแสดงถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

จากการประเมินค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ระหว่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันสามชนิด กับเนื้อฟันส่วนปลายราก พบว่ากลุ่มเอเอชพลัส มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดมากที่สุด คือ 1.05 เมกะปาสคาล รองลงมาคือ กลุ่มเอ็มทีเอฟฟิลลาเพกซ์ มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด 0.29 เมกะปาสคาล และ กลุ่มซียูซีลเลอร์ มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดต่ำที่สุด คือ 0.11 เมกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดของซีลเลอร์อุดคลองรากฟันแต่ละกลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

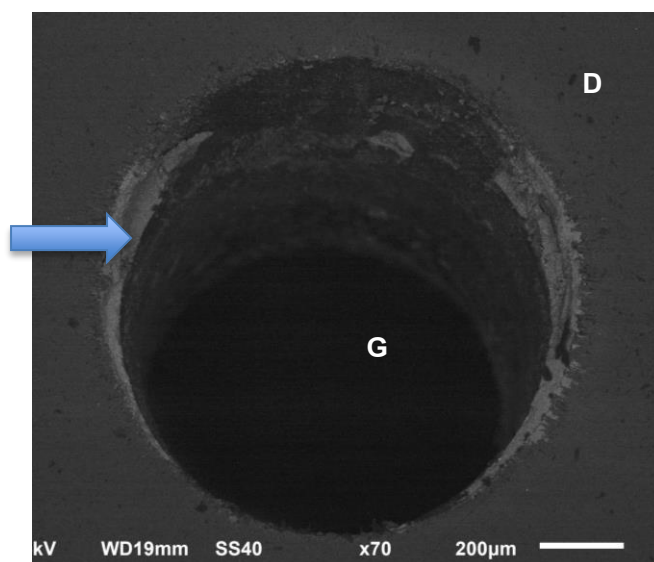
ในด้านรูปแบบความเสียหายของวัสดุ ตารางที่ 9 แสดงอัตราส่วนเป็นร้อยละของ รูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่สูญเสียการยึดติดของวัสดุกับผนังคลองรากฟัน กลุ่มซียูซีลเลอร์ พบความล้มเหลวแบบแอตชีฟมากที่สุด ถึงร้อยละ 73 และไม่พบความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟเลย กลุ่มเอเอชพลัส พบความล้มเหลวแบบผสมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 60 โดยไม่พบว่าเกิดความล้มเหลวแบบแอตชีฟ ส่วนกลุ่มเอ็มทีเอฟฟิลลาเพกซ์ เกิดความล้มเหลวแบบแอตชีฟและแบบผสมมากที่สุดเท่ากัน คิดเป็นร้อยละ 47 ภาพตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงรูปแบบการเสียหายของวัสดุ ดังภาพประกอบ 17-19

ตาราง 9 อัตราส่วนร้อยละของผลการพิจารณารูปแบบการเสียหายของวัสดุ

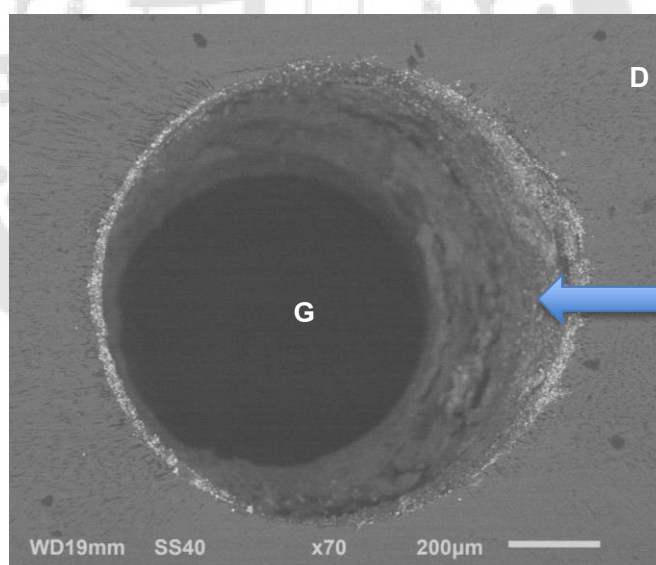
Sealers (n=15)	Mode of failure (%)		
	Adhesive	Mixed	Cohesive
CU sealer	73	27	0
AH Plus	0	60	40
MTA Fillapex	47	47	6



ภาพประกอบ 17 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซียูซีลเลอร์ แสดงความล้มเหลวแบบแอตชีฟ ที่เกิดระหว่างผนังคลองรากฟัน และซีลเลอร์ โดย D คือเนื้อฟัน G คือ บริเวณที่เคยเป็นที่อยู่ของกัตตาเปอร์ชา



ภาพประกอบ 18 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุตสาหกรรมจากพื้นที่แอชเพลส แสดงความล้มเหลวแบบผสม โดย D คือเนื้อพื้น G คือ บริเวณที่เคยเป็นที่อยู่ของกัตาเปอร์ชา ลูกศรแสดงซีลเลอร์ที่หลงเหลือในบริเวณที่เกิดการเสียหาย



ภาพประกอบ 19 ภาพตัวอย่างจากซีลเลอร์อุตสาหกรรมจากพื้นที่แอชเพลส แสดงความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ ที่เกิดภายในชั้นซีลเลอร์ โดย D คือเนื้อพื้น G คือ บริเวณที่เคยเป็นที่อยู่ของกัตาเปอร์ชา ลูกศรแสดงซีลเลอร์ที่หลงเหลือในบริเวณที่เกิดการเสียหาย

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผล

การอุดคลองรากฟันได้อย่างแนบสนิททั้ง 3 มิติ เป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้การรักษาคลองรากฟันประสบผลสำเร็จ ซึ่งการใช้แท่งกัฏตาเปอร์ชาเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำได้ ซีลเลอร์อุดคลองรากฟันจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ เพื่อหวังผลให้เกิดการเติมเต็มช่องว่างที่เหลืออยู่ภายในคลองรากฟัน ทำให้เกิดความแนบสนิทอย่างสมบูรณ์ จากการศึกษาตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่าไม่มีซีลเลอร์ชนิดใด สามารถป้องกันการรั่วซึมได้ทั้งหมด ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะมีการรั่วซึมเพิ่มมากขึ้นตามเวลา⁽¹¹⁵⁾ ปัจจัยด้านความแนบสนิทของซีลเลอร์กับผนังเนื้อฟัน (interfacial adaptation) การละลายตัว (solubility) ความพรุน (porosity) ความหนาของชั้นซีลเลอร์ (sealer thickness) การไหลแผ่ (flow) และการมีเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability)^(113,114) ล้วนมีผลต่อการรั่วซึมของซีลเลอร์อุดคลองรากฟัน

ผลการศึกษาค้นคว้าพบว่าซีลเลอร์ มีการรั่วซึมมากกว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ในวันแรกและรั่วซึมมากกว่าเอเอสพลัสตั้งแต่วันที่ 7 เป็นต้นไป อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องมาจากซีลเลอร์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิงค์ออกไซด์ยูจินอลมีสมบัติการละลายตัวสูง^(7,8) นอกจากนั้น ลักษณะการผสมผงเข้ากับส่วนน้ำโดยใช้มือ อาจมีโอกาสดำเนินการทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อซีลเลอร์⁽¹¹⁶⁾ Camelleri และคณะ⁽¹¹⁵⁾ ศึกษาเปรียบเทียบฟัลป์คาแนลซีลเลอร์ (Pulp Canal Sealer) ซึ่งเป็นซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล กับมินเนอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกตซีลเลอร์ (Mineral Trioxide Aggregate Sealer) เมื่อแช่ในสารละลายแฮงก์บาลานซ์ซอลท์ (Hank's balanced salt solution; HBSS) พบว่าซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล จะตรวจพบลักษณะที่เป็นรูพรุน และไม่พบการสะสมของผลึกแร่ธาตุใดๆที่พื้นผิวของสาร ขณะที่ มินเนอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกตซีลเลอร์ จะสามารถพบผลึกของแคลเซียม และฟอสเฟตสะสมบริเวณ พื้นผิวหลังการแช่สารละลายเดียวกัน การตกผลึกของแร่ธาตุดังกล่าว อาจมีผลลดรูพรุนบริเวณพื้นผิว ของซีลเลอร์ได้บางส่วนและส่งผลลดการซึมผ่านของสารทดสอบได้

การพัฒนาซีลเลอร์ที่มีองค์ประกอบเป็นเอ็มทีเอ เช่น เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์นี้ เกิดขึ้นด้วยความคาดหวังว่าจะเป็นซีลเลอร์ที่ให้ความแนบสนิทที่ดี เนื่องจากเอ็มทีเอมีการขยายตัวจากปฏิกิริยาการแข็งตัว (setting expansion)⁽⁵⁵⁾ ตรงข้ามกับวัสดุทางทันตกรรมส่วนใหญ่ ที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการหดตัว แยกออกจากพื้นผิวรอยต่อ ส่งผลให้เกิดช่องว่างและการซึมผ่านของสิ่งปนเปื้อนตามมา โดยปฏิกิริยาการแข็งตัวของเอ็มทีเอเมื่อสัมผัสน้ำจะเกิดผลิตภัณฑ์ เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตปิตรียอดต่อดังกล่าว

Gomes-Filho ศึกษาการรั่วซึมของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ โดยใช้สารทดสอบเป็นสีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) ทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมงพบว่า สามารถป้องกันการรั่วซึมในระดับที่ยอมรับได้⁽⁵⁵⁾ จากการศึกษาี้ หลังจากการวัดครั้งแรกที่เวลา 24 ชั่วโมงผ่านไป ทั้งกลุ่มเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ และซีลูซิลเลอร์ พบการรั่วซึมของโปรตีนมากกว่าเอเอสพลัส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่เวลา 7 15 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาของ Razavian และคณะ⁽⁵⁹⁾ ที่ทำการศึกษาการรั่วซึมของ ซีลูซิลเลอร์ ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์เปรียบเทียบกับเอเอส 26 ซึ่งเป็นซีลูซิลเลอร์ชนิดอีพอกซีเรซิน โดยใช้แบบจำลองการรั่วซึมของแบคทีเรียเป็นเวลา 90 วัน และให้ข้อสรุปว่าเอเอส 26 มีความแนบสนิทที่ดีกว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการที่เอเอสพลัสให้ความแนบสนิทที่ดีกว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ดังผลการศึกษานี้ น่าจะเกิดจากสาเหตุสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ประเภทการยึดติดของวัสดุกับผนังคลองรากฟัน ความสามารถในการละลายตัว และความสามารถในการตกตะกอนแร่ธาตุของวัสดุ

เอเอสพลัสเป็นซีลูซิลเลอร์กลุ่มอีพอกซีเรซิน มีการยึดติดของวัสดุกับผนังคลองรากฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่อะมิโนในคอลลาเจน กับอีพอกซีเรซินสร้างเป็นพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ทำให้พอลิเมอร์มีความคงทน รวมถึงมีเสถียรภาพเชิงมิติที่ดี นอกจากนี้ อีพอกซีจัดว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีการหดตัว (contraction-free) ขณะเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อวัสดุตั้งกล้าแข็งตัวจึงมีความแนบสนิท ที่ดีกับผนังคลองรากฟัน Al-Haddad และคณะ⁽¹¹⁴⁾ ศึกษาเปรียบเทียบความแนบสนิทระหว่างพื้นผิวของ ซีลูซิลเลอร์กับผนังคลองรากฟัน ในซีลูซิลเลอร์ชนิดไบโอเซรามิก (bioceramic sealers) สามชนิด เปรียบเทียบกับเอเอสพลัส พบว่าซีลูซิลเลอร์กลุ่มเอเอสพลัสมีช่องว่างระหว่างซีลูซิลเลอร์กับผนังคลองรากฟันน้อยกว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เนื่องจากเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีแนวโน้มที่จะยึดติดกับผนังคลองรากฟันด้วยการ ยึดติดทางกลเพียงอย่างเดียวโดยอาศัยการแทรกซึมของสารไปตามส่วนที่ไม่ราบเรียบของผนังคลองรากฟัน

ประการที่สองด้านความสามารถในการละลายตัว มีการศึกษาจำนวนมาก^(113,118,119) พบว่าซีลูซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีการละลายตัวสูง แม้โดยปกติแล้วสารจำพวกแคลเซียม ซิลิเกตส่วนใหญ่ก็มีสมบัติการละลายตัวสูง เช่น การศึกษาของ Singh และคณะ⁽¹²⁰⁾ พบว่าทั้งไบโอเดนทีน (Biodentine) และโปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot MTA) มีการละลายตัวสูง ทำให้เกิดการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดการสะสมของแร่ธาตุอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา แต่ในเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กลไกการละลายตัวเกิดจากการมีบิสมัทออกไซด์ (bismuth oxide) เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณสูง ซึ่งมีการศึกษาพบว่า บิสมัทออกไซด์ มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับคุณสมบัติการละลายตัว และการเกิดรูพรุนในเนื้อวัสดุ⁽¹²¹⁾ โดยที่ Borges และคณะ⁽¹¹⁹⁾ ไม่พบการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีลูซิลเลอร์นี้ และเมื่อทำการศึกษากายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์สัมผัสน้ำเป็นระยะเวลา 7 วัน ส่งผลให้เกิดรอยแยกและรูพรุนในส่วนของเรซินแมทริกซ์ โดยพบว่าพื้นผิวมีการตกตะกอนของแร่ธาตุน้อยมากเมื่อเทียบกับสารจำพวกแคลเซียมซิลิเกตอื่น สอดคล้องกับ Marciano และคณะ⁽¹¹³⁾ พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีค่าการละลายตัวสูงรวมทั้งมีรูพรุนที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเอเอสพลัส ทั้งด้านขนาดและจำนวน

ประการที่สามความสามารถในการตกตะกอนของแร่ธาตุของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์อยู่ในระดับต่ำ ไม่เพียงพอที่จะชดเชยช่องว่างที่เกิดจากการละลายตัวของสาร แม้ซิลเลอร์ดังกล่าวจะมีเอ็มทีเอฟเป็นองค์ประกอบถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า เอ็มทีเอฟมีคุณสมบัติสร้างผลึกอะพาไทต์เมื่อสัมผัส กับสารละลายที่จำลองสภาวะของเหลวในร่างกาย แต่ Maciano และคณะ⁽¹¹³⁾ พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปล่อยจากสารซิลเลอร์นี้มีน้อยมาก เนื่องจากส่วนเรซินที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งในเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ขัดขวางกระบวนการไฮดรอกซิ ทำให้การปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้ปริมาณผลึกแคลเซียมฟอสเฟตเกิดขึ้นน้อย ที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาใดวัดคุณภาพและปริมาณผลึกแร่ธาตุที่เกิดจากเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เมื่อสัมผัสสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์เลย มีเพียงการศึกษาของSallesและคณะ⁽⁵⁰⁾ ที่พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ สามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเทส (alkaline phosphatase) ของเซลล์สร้างกระดูก ทำให้เกิดการตกตะกอนของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้มากกว่าซิลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลและอีพิฟานี (Epiphany) ซึ่งเป็นซิลเลอร์ชนิดเรซิน ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงไม่หนักแน่นพอ ที่จะสนับสนุนว่าซิลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์จะทำให้เกิดการสะสมของแร่ธาตุเพียงพอ ที่จะสามารถต้านการซึมผ่านของสารทดสอบได้

วิธีการที่มักใช้ในประเมินการรั่วซึมของวัสดุอุดภายในคลองรากฟัน คือ ตรวจวัดการผ่านของสารทดสอบ (tracer) ในระหว่างรอยต่อของวัสดุที่ต้องการทดสอบกับผนังคลองรากฟัน โดยสารทดสอบที่นิยมที่สุดตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน คือ สีย้อม (dyes) อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้ คือ การวัดการรั่วซึม ทำโดยการตัดชิ้นงานตามแนวยาว จะให้ผลการศึกษาแบบสุ่มเพียงระนาบเดียว และสีย้อมส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงทำให้สามารถแทรกผ่านบางบริเวณที่โปรตีนหรือเชื้อแบคทีเรียไม่สามารถเข้าไปได้⁽⁷⁰⁾ จึงให้ผลการรั่วซึมมากเกินไปกว่าที่นาจะเป็นในทางคลินิก นอกจากนี้พบว่าสีของสารละลายเมทิลีนบลู (methylene blue) ความเข้มข้นร้อยละ 1 สามารถจางหายไปเมื่อสัมผัสกับเอ็มทีเอฟ⁽⁷⁷⁾ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้โปรตีนเป็นสารทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น

โปรตีนโบรไวน์เซรัมอัลบูมินเป็นโปรตีนประจุลบ ประกอบด้วยกรดอะมิโน 583 ตัว มีน้ำหนักโมเลกุล 66 กิโลดาลตัน (kDa) ขนาดของโมเลกุลจะเล็กกว่าขนาดเซลล์แบคทีเรียแต่มีขนาดใกล้เคียงกับไลโปโพลีแซคคาไรด์ของเชื้อแบคทีเรีย จึงมีความไวในการทดสอบมาก⁽⁷⁰⁾ นอกจากนี้ปัจจัยด้านขนาดโมเลกุลที่สามารถทำให้สารทดสอบเคลื่อนผ่านช่องว่าง (pore size) ลงในภาชนะส่วนล่าง (lower chamber) ได้แล้ว สารทดสอบจะต้องคงสภาพอยู่ได้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา การศึกษานี้ได้ควบคุมปัจจัยที่มีผลทำให้โปรตีนเสื่อมสภาพไว้ทั้งหมดแล้ว ปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่ อุณหภูมิ (temperature) ภาวะความเป็นกรด (acidic condition) ค่าความแรงไอออน (ionic strength) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) อุณหภูมิที่ทำให้โปรตีนชนิดนี้เสื่อมสภาพอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดต่าง ที่เริ่มมีผลเท่ากับ 5⁽¹¹⁰⁾ ซึ่งตลอดการศึกษานี้ทำภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ สภาวะความเป็นกรดต่างควบคุมได้จากน้ำกลั่นที่ใช้ ตลอดจนความเป็นกรดต่าง ของซิลเลอร์อุดคลองรากฟันทุกชนิดที่ทดสอบ ไม่มีซิลเลอร์ชนิดใดมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 5⁽¹¹¹⁾ สำหรับค่าความแรงไอออน และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ควบคุมโดยการเลือกใช้ น้ำกลั่นประเภทที่ 1 เป็นน้ำปราศจากสารอินทรีย์ หรือน้ำบริสุทธิ์สูง (organically-free pure water) ซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดไอออนของเกลือแร่ และโมเลกุลอินทรีย์ที่ไม่มีประจุออกทั้งหมด⁽¹¹²⁾

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ ดัดแปลงรูปแบบมาจากแบบจำลองของ Valois และ Costa⁽⁷⁰⁾ อาศัยหลักการแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลโปรตีนในน้ำกลั่นผ่านช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส และวัดความเข้มข้นของโปรตีนที่อยู่ในภาชนะส่วนล่าง โดยไม่ได้ทำการยัดติดส่วนภาชนะบนและล่างอย่างถาวร แต่ใช้อย่างวงหุ้มรอบขอบภาชนะส่วนบน และปิดทับด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบาง เพื่อให้เกิดความแนบสนิท แต่ยังสามารถทำการตรวจวัดได้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา การเตรียมพื้นที่ใช้ทดสอบ ทำโดยผู้วิจัยเพียงคนเดียว และเตรียมคลองรากฟันโดยใช้เครื่องมือโรตารี เพื่อควบคุมคลองรากฟันให้มีรูปร่างที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด การศึกษานี้พบว่ากลุ่มควบคุมบวก ตรวจพบการรั่วซึมของโปรตีนตั้งแต่วันแรกของการศึกษา ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้ซิลเลอร์ในการอุดคลองรากฟัน ขณะที่กลุ่มควบคุมลบตรวจไม่พบการรั่วซึมของโปรตีนตลอดการศึกษาเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้

กลไกการยัดติดของวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือการยัดติดทางกลและการยัดติดทางเคมี โดย การยัดติดทางกล จะอาศัยความขรุขระของพื้นผิวเพื่อให้เกิดการแทรกซึมของสารยัดติด ขณะที่การยัดติดทางเคมีพบว่าจะสามารถยัดติดกับพื้นผิวเรียบได้ดีกว่า⁽⁹³⁾

การยัดติดทางกลเกิดจากลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระของเนื้อฟัน ร่วมกับความสามารถในการไหลแผ่ของสารยัดติด เพื่อให้แทรกซึมเข้าไปกับพื้นผิวของสิ่งที่ต้องการยัด ปัจจัยที่มีผลต่อการยัดติดของซิลเลอร์กับผิวฟัน ได้แก่ แรงตึงผิว (surface tension) ของสารยัดติด ความสามารถในการไหลแผ่ (wetting ability) ไปบนพื้นผิวเนื้อฟันของสารยัดติด พลังงานพื้นผิว (surface energy) ของสิ่งที่ต้องการยัด และความสะอาดพื้นผิวของสิ่งที่ต้องการยัด⁽¹²²⁾ สำหรับปัจจัยด้านพลังงานพื้นผิวและความสะอาดของพื้นผิวที่ต้องการยัด ควบคุมได้จากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานให้ได้มาตรฐานเดียวกัน ทำการปรับสภาพและทำความสะอาดพื้นผิวของผนังคลองรากฟันด้วยสารละลายอีดีทีเอร้อยละ 17 เพื่อกำจัดชั้นเสมียร์ซึ่งนอกจากเป็นที่อยู่ของเชื้อจุลินทรีย์แล้ว การกำจัดชั้นเสมียร์ จะเพิ่มการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าสู่ท่อเนื้อฟัน ส่งเสริมการยัดติดของซิลเลอร์กับผนังคลองรากฟัน

แม้ว่าซิลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์สามารถไหลแผ่ ทำให้เกิดลักษณะคล้ายการยื่นเข้าไปใน ท่อเนื้อฟัน (tag-like structures) แต่พบว่าให้การยัดติดที่ไม่มีคุณภาพ^(41,123,126) เนื่องจากไม่เกิดการ สะสมของแร่ธาตุตามกระบวนการแข็งตัวของสาร จะเห็นได้จากการศึกษาของ Tedesco และคณะ⁽¹²³⁾ ซึ่งศึกษาบริเวณพื้นผิวที่ยัดติด และลักษณะการแทรกซึมของซิลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เปรียบเทียบกับเอเอสพลัส ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าส่วนที่ยื่นเข้าไปในท่อเนื้อฟันเพื่อเพิ่มการยัดติดของซิลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ มีปริมาณน้อยกว่าเอเอสพลัส และไม่พบการสะสมของผลึกแร่ธาตุในท่อเนื้อฟัน สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ไม่ได้ศึกษาลักษณะการยัดเกาะของซิลเลอร์กับผนังคลองรากฟัน และการตกผลึกของแร่ธาตุภายในท่อเนื้อฟัน โดยใช้กล้องกำลังขยายสูง ดังนั้นหากจะทำการทดลองลักษณะนี้ในอนาคตอาจเพิ่มเติมการศึกษาลักษณะดังกล่าว

ในด้านความสามารถของการไหลแผ่ไปบนผิวเนื้อฟันของสารยึดติด Tummala และคณะ⁽¹²⁷⁾ ศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวของเอเอสพลัส เปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซิลเลอร์ โดยวัดจากมุมสัมผัส (contact angle) เมื่อใช้น้ำยาล้างคลองรากฟันรูปแบบต่างๆ กัน พบว่า เอเอสพลัสมีความสามารถในการไหลแผ่ดีกว่าซิลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับอิตีทีโอความเข้มข้นร้อยละ 17 จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการไหลแผ่ไปบนพื้นผิวเนื้อฟันของเอเอสพลัสมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ซิลเลอร์ชนิดเอเอสพลัส แทรกซึมเข้ากับส่วนที่ไม่ราบเรียบของผนังคลองรากฟันได้ดี และเพิ่มการยึดติดของวัสดุได้

สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ยังไม่มีการศึกษาความสามารถในการไหลแผ่ไปบนผิวเนื้อฟัน แต่มีหลายการศึกษา^(42,123,124) ทดสอบความสามารถแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟัน (sealer penetration) และไม่พบความแตกต่างระหว่างซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กับซิลเลอร์อุดคลองรากฟัน ชนิดเอเอสพลัส เนื่องจากทั้งสองมีพฤติกรรมไหลของสารเป็นแบบพลาสติกเทียม (pseudoplastic behavior)⁽¹²⁸⁾ ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมของของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อได้รับความเค้นเฉือน (shear stress) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อได้รับแรงเฉือนจากการอุดคลองรากฟันแบบเลทเทอร์ลคอนเดนเซชัน ทำให้ มีค่าความหนืดลดลง จึงมีการไหลแผ่บนผนังคลองรากฟันได้ดีขึ้น จึงพบว่าความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟันของซิลเลอร์ทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกัน

Assmann และคณะ⁽⁴³⁾ ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดของซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ กับซิลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดเอเอสพลัส พบว่ามีค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดเท่ากับ 2.041 และ 3.034 เมกะปาสคาลตามลำดับ โดยสรุปว่าทั้งลักษณะการใช้งาน ค่าความแข็งแรงพันธะ และรูปแบบความล้มเหลวของการยึดติดของเอเอสพลัส และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ไม่ต่างกัน เนื่องจากสารทั้งสองมีเรซินเป็นองค์ประกอบเหมือนกัน อย่างไรก็ตามการศึกษา ของ Assmann และคณะ ศึกษาจากชิ้นงานที่มีความหนาเพียง 0.68 มิลลิเมตร และตำแหน่งของชิ้น งานที่นำมาทดสอบ เตรียมจากทุกระดับของคลองรากฟัน ซึ่งแตกต่างจากการศึกษานี้ที่ใช้เฉพาะชิ้นงานส่วนปลายรากซึ่งมักพบว่ามีลักษณะสเคลอโรติก (sclerotic) คือมีท่อเนื้อฟันน้อย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจมีผลต่อการยึดติดและค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด แม้เมื่อพิจารณาความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์และเอเอสพลัสที่ได้จากการทดลองนี้ จะพบว่ามีค่าน้อยกว่าการศึกษาข้างต้น ของ Assmann และคณะ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างวิธีการทดลองในของการศึกษาของ Assmann และคณะ กับการศึกษานี้ คือขนาดของคลองรากฟันที่เตรียมแตกต่างกัน การไม่ได้แช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และความเร็วหัวทดสอบที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงพันธะแตกต่างกัน

นอกเหนือจากการยึดติดทางกลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ปฏิกริยาทางเคมีเป็นอีกกลไกหนึ่งที่มีผล ต่อค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด การทดลองนี้พบว่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดของ เอเอชพลัส มีค่า 1.0506 เมกะปาสคาล สูงกว่ากลุ่มเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.2883 เมกะปาสคาล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Sagsen⁽⁴⁵⁾ และ การศึกษาของ Sönmez⁽⁴⁴⁾ ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานการหลุดออกของวัสดุอุดคลองรากฟัน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าสู่ท่อเนื้อฟันเพียงอย่างเดียว^(14,117) โดยเฉพาะเนื้อฟันในส่วนปลายราก แรงยึดที่สูง อาจเกิดจากซิลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนสามารถทำให้เกิดการยึดติด กับเนื้อฟัน โดยการปรับสภาพผิวฟันเพิ่มเติมคล้ายกับสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ ซึ่งลักษณะดังกล่าว ไม่พบในซิลเลอร์ในกลุ่มไบโอเซรามิก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง (alkaline bioceramic-based sealer)⁽¹¹⁴⁾ นอกจากนั้นความเป็นกรดอ่อน จากการเตรียมผิวฟัน โดยใช้สารละลายอีดีทีเอความเข้มข้นร้อยละ 17 ทำให้เกิดการเผยผิของเส้นใยคอลลาเจนในท่อเนื้อฟัน ส่งเสริมการเกิดการยึดจับทางเคมีระหว่างหมู่อะมิโนของคอลลาเจนกับอีพอกซีเรซินได้⁽¹²⁷⁾

สำหรับการยึดติดของซิลเลอร์ในกลุ่มเอ็มทีเอ คาดหวังให้มีค่าแรงยึดที่สูงจากการสร้างผลึก อะพาไทต์สะสมภายในท่อเนื้อฟัน เมื่อสัมผัสกับสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ดังเช่น การศึกษา ของ Hufmann และคณะ⁽¹⁴⁾ เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงพันธะระหว่างเอเอชพลัส กับโปรรูทเอนโดซิลเลอร์ ซึ่งเป็นซิลเลอร์ที่มีองค์ประกอบคล้ายเอ็มทีเอ โดยจุ่มแช่แผ่นชิ้นฟันตัวอย่างที่อุดด้วยซิลเลอร์ที่ทดสอบ ในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าทำให้ค่าแรงในการต้านการหลุดออกของโปรรูทเอนโดซิลเลอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนแช่ในสารละลาย และมีความมากกว่าเอเอชพลัส อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งก่อนและหลังการแช่ในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และพบการสะสมของ แคลเซียมฟอสเฟตเป็นลักษณะทรงกลม (spherical) สะสมระหว่างผิวของเนื้อฟันและชั้นซิลเลอร์ อย่างไรก็ตามการศึกษาข้างต้นศึกษาโดยการเจาะรูบนแผ่นเนื้อฟันที่ตัดตามแนวยาว (longitudinal tooth slabs) อุดโดยใช้ซิลเลอร์เพียงอย่างเดียวไม่ใช้กั๊กตาเปอร์ชา และแช่แผ่นฟันในสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซิลเลอร์จะมีโอกาสสัมผัสสารละลายมากกว่าการศึกษานี้ จึงอาจเกิดการสะสมผลึกอะพาไทต์ในท่อเนื้อฟันได้ดีกว่า จึงทำให้ผลการศึกษาของโปรรูทเอนโดซิลเลอร์ มีค่าความแข็งแรงพันธะ ที่ดีกว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ของการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนั้นซิลเลอร์ที่ใช้ศึกษาคือโปรรูทเอนโดซิลเลอร์ มีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต คล้ายกับเอ็มทีเอ จึงให้ผลค่าแรงยึดสูง แต่สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์นั้น ประกอบด้วยสารที่กล่าวมา ข้างต้นในอัตราส่วนที่น้อยกว่า นอกจากนั้นยังมีซาลิไซเลตเรซินเป็นส่วนประกอบด้วย ทำให้ค่าความ แข็งแรงพันธะต้านแรงกดของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการศึกษาของ Hufmann และคณะ

การที่เอเอชพลัสให้ค่าแรงยึดติดสูงหลังสัมผัสสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เนื่องจากการยึดติดกับเนื้อฟันด้วยแรงยึดทางเคมี ร่วมกับคุณสมบัติที่จะเกิดการขยายขนาดเมื่อดูดซับสารละลาย (sorption) ทำให้มีแรงเสียดทานขณะทดสอบเพิ่มค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดได้⁽¹⁴⁾

การศึกษานี้พบว่า ซิยูซิลเลอร์ให้ค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดต่ำที่สุด โดยการยึดติดของซิลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอลเกิดจากส่วนยูจินอล สามารถทำปฏิกิริยากับส่วนซิงค์ออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกัตตาเปอร์ชา และทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายทำให้กัตตาเปอร์ชาอ่อนตัวขึ้น แต่ซิลเลอร์ชนิดนี้ไม่สามารถยึดติดกับผิวของผนังคลองรากฟันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกลเลย⁽⁴⁾ ทำให้แรงยึดระหว่างพื้นผิวดังกล่าวน้อย

การทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ไม่สามารถอ้างอิงไปยังคุณสมบัติด้านความแนบสนิทของวัสดุได้⁽⁸⁷⁾ การศึกษานี้จึงทดสอบคุณสมบัติวัสดุทั้ง 2 ด้านร่วมกัน เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ ไปใช้งานจริงทางคลินิกได้ดียิ่งขึ้น ในภาวะพลวัต (dynamic) การยึดติดที่ดี จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุอุดในคลองรากฟัน ขณะที่มีความเครียดทางกล (mechanical stress) มากระทำ⁽¹⁰²⁾ เช่น ด้านทานการหลุดออกขณะเตรียมพื้นที่สำหรับเดือยฟัน มีการศึกษาหลายวิธี เพื่อประเมินคุณสมบัติการยึดติดในภาวะพลวัต ได้แก่ ไมโครเทนไซล์ (microtensile) ไมโครชีียร์ (microshear) สำหรับการศึกษาใช้การทดสอบพุชเอาท์หรือทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด เนื่องจากหลีกเลี่ยงการเกิดความล้มเหลวของพันธะก่อนการทดสอบ (premature debonding) ที่อาจเกิดได้จากเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ ซึ่งพบได้บ่อยในวิธีการศึกษาแบบไมโครเทนไซล์⁽⁸⁷⁾ นอกจากนี้วิธีการทดสอบความแข็งแรงพันธะต้านแรงกด ทำการเตรียมชิ้นงานได้ง่าย⁽¹⁰¹⁾ สามารถจำลองลักษณะทางคลินิกทั้งในด้านความหนาแน่นและการเรียงตัวของท่อเนื้อฟัน⁽¹⁰⁰⁾ การเตรียมคลองรากฟันในการศึกษานี้ พยายามจำลองลักษณะฟันปลายรากเปิด ลักษณะคลองรากฟันที่ได้จากการเตรียมจึงมีขนาดใหญ่ คลองรากฟันมีหน้าตัดกลมเท่ากันและ คลองรากฟันค่อนข้างตรง ทำให้สามารถควบคุมให้ขั้นตอนการเตรียมและการล้างคลองรากฟัน ทำได้อย่างทั่วถึง สำหรับความหนาของแผ่นเนื้อฟันที่ใช้ศึกษาในการศึกษาที่ผ่านมา มีหลากหลาย ตั้งแต่ 0.6-7.0 มิลลิเมตร^(104,105) ซึ่งจากการทำการศึกษานำร่องพบว่าหากชิ้นงานบางกว่า 3 มิลลิเมตร จะเกิดการหลุดของวัสดุอุดคลองรากฟันออกจากผนังคลองรากฟันก่อนการทดสอบ ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตร

ในด้านรูปแบบความเสียหายของวัสดุ พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ส่วนใหญ่เกิดความล้มเหลว ระหว่างชั้นซิลเลอร์กับเนื้อฟัน และความล้มเหลวแบบที่เกิดขึ้นทั้งสองส่วน สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Sönmez⁽⁴⁴⁾ ซึ่งศึกษาในเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เอเอสพลัส และโปรรูทเอนโดซีลเลอร์ พบว่าเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์เกิดความล้มเหลวแบบแอตอีซีฟและความล้มเหลวแบบผสมในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน ขณะที่ซิลเลอร์กลุ่มเอเอสพลัสไม่พบความล้มเหลวแบบแอตอีซีฟเลย แต่จะให้ผลไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Shokouhinejad⁽¹²⁹⁾ ซึ่งศึกษาซิลเลอร์ชนิดเอนโดซีเควนบีซีซีลเลอร์ (EndoSequence BC sealer) และ Huffman และคณะ⁽¹⁴⁾ ซึ่งศึกษาซิลเลอร์ชนิดโปรรูทเอนโดซีลเลอร์ ซึ่งทั้งสองเป็นซิลเลอร์ที่มีองค์ประกอบคล้ายเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ พบว่าซิลเลอร์ทั้งสองมักเกิดความล้มเหลวในชั้นซิลเลอร์ สำหรับเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์จะมีส่วนประกอบอื่นที่เพิ่มเติมเข้ามาได้แก่ เรซินหรือซิลิกาทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ จึงทำให้รูปแบบความเสียหายที่พบในซิลเลอร์ชนิดเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เกิดความล้มเหลวทั้งระหว่างชั้นซิลเลอร์กับเนื้อฟัน และความล้มเหลวแบบที่เกิดขึ้นทั้งสองส่วน

รูปแบบความเสียหายจากผลการศึกษาครั้งนี้ มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงพันธะยึด โดยหากวัสดุให้ค่าแรงต้านทานการหลุดออกต่ำ จะมีแนวโน้มที่จะเกิดความล้มเหลวระหว่างชั้น ซีลเลอร์ กับเนื้อฟัน ดังจะเห็นได้จากซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล พบเกิดความล้มเหลวแบบแอตอีซีฟ เป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นชัดเจนว่าซีลเลอร์ดังกล่าวไม่สามารถให้การยึดติดที่ดีกับเนื้อฟัน ขณะที่ซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัสซึ่งมีค่าความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดมากที่สุด พบว่ามักเกิดความล้มเหลวแบบโคอีซีฟ ภายในชั้นซีลเลอร์ สอดคล้องกับการยึดติดที่ดีกับผนังคลองรากฟัน

สรุปผลการวิจัย

ภายใต้ข้อจำกัดของการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่าการใช้เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ซึ่งเป็นซีลเลอร์ชนิดมินิเอร์ไลไตรออกไซด์แอกริกเกต ในแบบจำลองฟันปลายรากเปิด ให้ผลในด้านความ แนบสนิทไม่แตกต่างซีลเลอร์อุดคลองรากฟันชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจินอล ขณะที่ให้ผลในด้านความแข็งแรงพันธะต้านแรงกดที่มากกว่า ส่วนซีลเลอร์ชนิดอีพอกซีเรซินมีคุณสมบัติที่ดีสุดจากทั้งสองการทดสอบ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น เพียงเพื่อให้ได้ข้อมูลในด้านการผนึก และความแข็งแรงพันธะของเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ภายใต้เงื่อนไขที่จำลองขึ้น แม้จากการศึกษาในครั้งนี้ จะให้ผลไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติที่คาดหวัง แต่ยังคงต้องอาศัยข้อมูลจากการศึกษาเพิ่มเติมอีกหลายด้าน เช่น การศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อประเมินความแนบสนิทของซีลเลอร์ ชนิดนี้เมื่อสัมผัสกับสารละลายน้ำเกลือฟอสเฟสพฟเฟอร์ ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน การวิเคราะห์ธาตุในเชิง ปริมาณและคุณภาพ รวมถึงลักษณะพื้นผิวของซีลเลอร์เมื่อสัมผัส สารละลายน้ำเกลือฟอสเฟสพฟเฟอร์

นอกจากนั้น ปัจจัยด้านขั้นตอนการเตรียมคลองรากฟัน เช่น ผลของน้ำยาล้างคลองรากฟันต่อซีลเลอร์ หรือระดับความชื้นของคลองรากฟันขณะอุด เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงเพื่อเอื้อประโยชน์ให้ซีลเลอร์สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Ingle JI, Beveridge EE, Glick, DH, Weichman, JA. Endodontic success & failure: the Washington Study. Baltimore: Williams & Wilkins; 1994. 21-45.
2. Sundqvist G, David F. Essential Endodontology. Prevention and Treatment of Apical Periodontitis. Oxford Blackwell; 1998.
3. Rawtiya M, Singh S, Munuga S, Khan S. MTA-Based Root Canal Sealers. J Orofac Res 2013; 3(1): 16-21.
4. Copeland H, Sweeney WT, Forziati AF. Setting reaction of zinc oxide and eugenol. J Res Natl Bur Stand. 1995; 55(3): 133-8.
5. 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.
6. 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): 881.
7. McMichen FR, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K. A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers. Int Endod J. 2003; 36(9): 629-35.
8. Resende LM, Rached-Junior FJ, Versiani MA, Souza-Gabriel AE, Miranda CE, Silva-Sousa YT, et al. A comparative study of physicochemical properties of AH Plus, Epiphany, and Epiphany SE root canal sealers. Int Endod J. 2009; 42(9): 785-93.
9. Yigit DH GN. Evaluation of resin/silicone based root canal sealers. Part I: physical properties. Dig J Nanomater Biostruct. 2012; 7(1): 107-15.
10. 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 Jan; 33(1): 31-3.
11. Holland R, Mazuqueli L, de Souza V, Murata SS, Dezan Junior E, Suzuki P. Influence of the type of vehicle and limit of obturation on apical and periapical tissue response in dog's teeth after root canal filling with mineral trioxide aggregate. J Endod. 2007; 33(6): 693-7.
12. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomineralization Ability and Interaction of Mineral Trioxide Aggregate and White Portland Cement With Dentin in a Phosphate-containing Fluid. J Endod. 2009; 35(5): 731-6.

13. Weller RN, Tay KC, Garrett LV, Mai S, Primus CM, Gutmann JL, et al. Microscopic appearance and apical seal of root canals filled with gutta-percha and ProRoot Endo Sealer after immersion in a phosphate-containing fluid. *Int Endod J*. 2008; 41(11): 977-86.
14. 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.
15. Endodontics: Colleagues for Excellence. Obturation of root canal systems. Amer Assoc of Endodontists. 2009; Fall: 4.
16. Sjögren ULF, Hagglund B, Sundquist G, K W. Factors affecting the long term results of endodontic treatment. *J Endod*. 1990; 16: 498-504.
17. Ørstavik D. Materials used for root canal obturation: technical, biological and clinical testing. *Endodontic Topics*. 2005; 12: 25-38.
18. Tyagi S MP, Tyagi P. Evolution of root canal sealers: An insight story. *European J Gen Dent*. 2013; 2: 199-218.
19. Lee KW, Williams MC, Camps JJ, Pashley DH. Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. *J Endod*. 2002 Oct; 28(10): 684-8.
20. Grossman LI. Physical properties of root canal cements. *J Endod*. 1976; 2(6): 166-75.
21. Arenholt-Bindslev D, Horsted-Bindslev P. A simple model for evaluating relative toxicity of root filling materials in cultures of human oral fibroblasts. *Endod Dent Traumatol*. 1989; 5(5): 219-26.
22. Sousa Neto MD, Guimaraes LF, Gariba Silva R, Saquy PC, Pecora JD. The influence of different grades of rosins and hydrogenated resins on the powder-liquid ratio of Grossman cements. *Braz Dent J*. 1998; 9(1): 11-8.
23. Araki K, Suda H, Spangberg LS. Indirect longitudinal cytotoxicity of root canal sealers on L929 cells and human periodontal ligament fibroblasts. *J Endod*. 1994 Feb; 20(2): 67-70.
24. Marin-Bauza GA, Silva-Sousa YT, da Cunha SA, Rached-Junior FJ, Bonetti-Filho I, Sousa-Neto MD, et al. Physicochemical properties of endodontic sealers of different bases. *J Appl Oral Sci : revista FOB*. 2012; 20(4): 455-61.
25. Marciano MA, Guimaraes BM, Ordinola-Zapata R, Bramante CM, Cavenago BC, Garcia RB, et al. Physical properties and interfacial adaptation of three epoxy resin-based sealers. *J Endod*. 2011; 37(10): 1417-21.
26. Richard VN. *Introduction to Dental Materials*. 3rd ed. Sydney: Mosby; 2007.

27. Schroeder A. Endodontics: science and practice—a textbook for student and practioner. Chicago, IL: Quintessence; 1981.
28. McComb D, Smith DC. Comparison of physical properties of polycarboxylate-based and conventional root canal sealers. *J Endod.* 1976; 2(8): 228-35.
29. Nunes VH, Silva RG, Alfredo E, Sousa-Neto MD, Silva-Sousa YT. Adhesion of Epiphany and AH Plus sealers to human root dentin treated with different solutions. *Braz Dent J.* 2008; 19(1): 46-50.
30. Monteiro J, de Ataíde Ide N, Chalakkal P, Chandra PK. In vitro resistance to fracture of roots obturated with Resilon or gutta-percha. *J Endod.* 2011; 37(6): 828-31.
31. Huang FM, Tai KW, Chou MY, Chang YC. Cytotoxicity of resin-, zinc oxide-eugenol-, and calcium hydroxide-based root canal sealers on human periodontal ligament cells and permanent V79 cells. *Int Endod J.* 2002 Feb; 35(2): 153-8.
32. Scarparo RK, Grecca FS, Fachin EV. Analysis of tissue reactions to methacrylate resin-based, epoxy resin-based, and zinc oxide-eugenol endodontic sealers. *J Endod.* 2009; 35(2): 229-32.
33. Gomes-Filho JE, Watanabe S, Lodi CS, Cintra LT, Nery MJ, Filho JA, et al. Rat tissue reaction to MTA FILLAPEX(R). *Dent Traumatol.* 2012; 28(6): 452-6.
34. Tavares CO, Bottcher DE, Assmann E, Kopper PM, de Figueiredo JA, Grecca FS. Tissue reactions to a new mineral trioxide aggregate-containing endodontic sealer. *J Endod.* 2013; 39(5): 653-7.
35. Martin RL, Monticelli F, Brackett WW, Loushine RJ, Rockman RA, Ferrari M. Sealing properties of mineral trioxide aggregate orthograde apical plugs and root fillings in an in vitro apexification model. *J Endod.* 2007; 33(3): 272-5.
36. Torabinejad M, Chivian N. Clinical applications of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 1999; 25(3): 197-205.
37. Bogen G, Kuttler S. Mineral trioxide aggregate obturation: a review and case series. *J Endod.* 2009; 35(6): 777-90.
38. Islam I, Chng HK, Yap AU. Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement. *J Endod.* 2006; 32(3): 193-7.
39. Angelus, MTA Scientific Profile 2011. Available from: <http://www.angelus.ind.br>. [accessed 26 June 2014]
40. Vitti RP, Prati C, Silva EJ, Sinhoreti MA, Zanchi CH, de Souza e Silva MG, et al. Physical properties of MTA Fillapex sealer. *J Endod.* 2013; 39(7): 915-8.
41. Sagsen B, Ustun Y, Pala K, Demirbuga S. Resistance to fracture of roots filled with different sealers. *Dent Mater J.* 2012; 31(4): 528-32.

42. 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 Techniq.* 2014; 77(6): 467-71.
43. 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 Feb; 38(2): 219-21.
44. 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.
45. 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.
46. Tanalp J, Dikbas I, Malkondu O, Ersev H, Gungor T, Bayirli G. Comparison of the fracture resistance of simulated immature permanent teeth using various canal filling materials and fiber posts. *Dent Traumatol.* 2012; 28(6): 457-64.
47. Ustun Y SB, Durmaz S, Percin D. Antimicrobial efficiency of different root canal sealers against *Enterococcus faecalis*. *Eur J Gen Dent.* 2013; 2(2): 134-8.
48. Tanomaru-Filho M, Tanomaru JM, Barros DB, Watanabe E, Ito IY. In vitro antimicrobial activity of endodontic sealers, MTA-based cements and Portland cement. *J Oral Sci.* 2007; 49(1): 41-5.
49. Kuga MC CE, Viscardi PH, Carrilho PZ, Xavier FC, Silvestre NP. Hydrogen ion and calcium releasing of MTA Fillapex and MTA-based formulations. *RSBO.* 2011; 8: 271-6.
50. Salles LP, Gomes-Cornelio AL, Guimaraes FC, Herrera BS, Bao SN, Rossa-Junior C, et al. Mineral trioxide aggregate-based endodontic sealer stimulates hydroxyapatite nucleation in human osteoblast-like cell culture. *J Endod.* 2012; 38(7): 971-6.
51. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Brink F. Chemical differences between white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005; 31(2): 101-3.
52. Thakur S, Emil J, Paulaian B. Evaluation of mineral trioxide aggregate as root canal sealer: A clinical study. *J Conserv Dent.* 2013; 16(6): 494-8.
53. Holland R, de Souza V, Nery MJ, Otoboni Filho JA, Bernabe PF, Dezan Junior E. Reaction of dogs' teeth to root canal filling with mineral trioxide aggregate or a glass ionomer sealer. *J Endod.* 1999; 25(11): 728-30.

54. 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.
55. Gomes-Filho JE, Moreira JV, Watanabe S, Lodi CS, Cintra LTA, Dezan Junior E, et al. Sealability of MTA and calcium hydroxide-containing sealers. *J Appl Oral Sci*. 2012; 20: 347-51.
56. Sonmez IS, Oba AA, Sonmez D, Almaz ME. In vitro evaluation of apical microleakage of a new MTA-based sealer. *Eur Arch Paediatr*. 2012; 13(5): 252-5.
57. Ferreira M AM, Ferreira H, Carrilho E and Botelho M. Comparison of the apical seal on filled root canals with Topseal® vs MTA Fillapex® sealers: A quantitative scintigraphic analysis. *Open Journal of Stomatology*. 2013; 3: 128-32.
58. Sadeghi S, Ali Akbari A. Ex-vivo Apical Seal Comparison of Root Canal Obturation Using MTA Fillapex Versus MTA Orthograde. *J Dent Radiol Pathol Surg*. 2013; 2(2): 28-31.
59. Razavian H, Barekatin B, Shadmehr E, Khatami M, Bagheri F, Heidari F. Bacterial leakage in root canals filled with resin-based and mineral trioxide aggregate-based sealers. *Dent Res J*. 2014; 11(5): 599-603.
60. Forough Reyhani M, Ghasemi N, Rahimi S, Salem Milani A, Mokhtari H, Shakouie S. Push-Out Bond Strength of Dorifill, Epiphany and MTA-Fillapex Sealers to Root Canal Dentin with and without Smear Layer. *Iran Endod J*. 2014; 9(4): 246-50.
61. Tagger M, Tagger E, Tjan AH, Bakland LK. Measurement of adhesion of endodontic sealers to dentin. *J Endod*. 2002; 28(5): 351-4.
62. Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR. Leakage of AH26 and Ketac-Endo used with injected warm gutta-percha. *J Endod*. 1997; 23(5): 331-6.
63. AliGhamdi A, Wennberg A. Testing of sealing ability of endodontic filling materials. *Endod Dent Traumatol*. 1994; 10(6): 249-55.
64. Panzarini SR, Holland R, de Souza V, Poi WR, Sonoda CK, Pedrini D. Mineral trioxide aggregate as a root canal filling material in reimplanted teeth. Microscopic analysis in monkeys. *Dent Traumatol*. 2007; 23(5): 265-72.
65. Brackett MG, Martin R, Sword J, Oxford C, Rueggeberg FA, Tay FR, et al. Comparison of seal after obturation techniques using a polydimethylsiloxane-based root canal sealer. *J Endod*. 2006; 32(12): 1188-90.

66. Eriksen HM, Orstavik D, Kerekes K. Healing of apical periodontitis after endodontic treatment using three different root canal sealers. *Endod Dent Traumatol.* 1988; 4(3): 114-7.
67. Wu MK, Wesselink PR. Endodontic leakage studies reconsidered. Part I. Methodology, application and relevance. *Int Endod J.* 1993; 26(1): 37-43.
68. Camps J, Pashley D. Reliability of the dye penetration studies. *J Endod.* 2003; 29(9): 592-4.
69. Verissimo DM, do Vale MS. Methodologies for assessment of apical and coronal leakage of endodontic filling materials: a critical review. *J Oral Sci.* 2006; 48(3): 93-8.
70. Valois CR, Costa ED, Jr. Influence of the thickness of mineral trioxide aggregate on sealing ability of root-end fillings in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2004; 97(1): 108-11.
71. Shemesh H, Wu MK, Wesselink PR. Leakage along apical root fillings with and without smear layer using two different leakage models: a two-month longitudinal ex vivo study. *Int Endod J.* 2006; 39(12): 968-76.
72. Conte G M, M , Cerroni L , Costantini M and Cianconi L. Fluid filtration and dye leakage testing of Resilon/Epiphany and guttapercha/Pulp Canal Sealer root canal fillings. *Open Journal of Stomatology.* 2013; 3: 14-21.
73. Limkangwalmongkol S, Burtcher P, Abbott PV, Sandler AB, Bishop BM. A comparative study of the apical leakage of four root canal sealers and laterally condensed gutta-percha. *J Endod.* 1991; 17(10): 495-9.
74. Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR. Fluid transport and dye penetration along root canal fillings. *Int Endod J.* 1994; 27(5): 233-8.
75. Pommel L, Camps J. Effects of pressure and measurement time on the fluid filtration method in endodontics. *J Endod.* 2001; 27(4): 256-8.
76. Kaya OS, Yavuz I, Aydin H. Comparison of Dye Extraction or Dye Penetration Methods to Quantitatively Determine Microleakage of Three Different Root Canal Sealers. *Dentistry.* 1(2): 1-5.
77. Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR. Decoloration of 1% methylene blue solution in contact with dental filling materials. *J Dent.* 1998; 26(7): 585-9.
78. Krakow AA, Stoppelaar JD, Gron P. In vivo study of temporary filling materials used in endodontics in anterior teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1977; 43(4): 615-20.

79. Chailertvanitkul P, Saunders WP, Saunders EM, Mackenzie D. An evaluation of microbial coronal leakage in the restored pulp chamber of root-canal treated multirooted teeth. *Int Endod J.* 1997; 30(5): 318-22.
80. Xu Q, Fan MW, Fan B, Cheung GS, Hu HL. A new quantitative method using glucose for analysis of endodontic leakage. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2005; 99(1): 107-11.
81. Trope M, Chow E, Nissan R. In vitro endotoxin penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1995; 11(2): 90-4.
82. Shemesh H, Souza EM, Wu MK, Wesselink PR. Glucose reactivity with filling materials as a limitation for using the glucose leakage model. *Int Endod J.* 2008; 41(10): 869-72.
83. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 1976; 7: 248-54.
84. Shahi S, Rahimi S, Hasan M, Shiezadeh V, Abdolrahimi M. Sealing ability of mineral trioxide aggregate and Portland cement for furcal perforation repair: a protein leakage study. *J Oral Sci.* 2009; 51(4): 601-6.
85. Vosoughhosseini S, Lotfi M, Shahmoradi K, Saghiri MA, Zand V, Mehdipour M, et al. Microleakage comparison of glass-ionomer and white mineral trioxide aggregate used as a coronal barrier in nonvital bleaching. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2011; 16(7): e1017-21.
86. Malcic A, Jukic S, Brzovic V, Miletic I, Anic I. Leakage of bovine serum albumin in root canals obturated with super-EBA and IRM. *J Endod.* 2006; 32(4): 368-71.
87. Ørstavik D, Eriksen HM, Beyer-Olsen EM. Adhesive properties and leakage of root canal sealers in vitro. *Int Endod J.* 1983; 16(2): 59-63.
88. 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.
89. Teixeira FB, Teixeira EC, Thompson JY, Trope M. Fracture resistance of roots endodontically treated with a new resin filling material. *J Am Dent Assoc.* 2004; 135(5): 646-52.
90. Hammad M, Qualtrough A, Silikas N. Effect of new obturating materials on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Endod.* 2007; 33(6): 732-6.

91. 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.
92. Wennberg A, Orstavik D. Adhesion of root canal sealers to bovine dentine and gutta-percha. *Int Endod J.* 1990; 23(1): 13-9.
93. 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.
94. Sudsangiam S, van Noort R. Do dentin bond strength tests serve a useful purpose? *J Adhes Dent.* 1999 Spring; 1(1): 57-67.
95. Goracci C, Grandini S, Bossu M, Bertelli E, Ferrari M. Laboratory assessment of the retentive potential of adhesive posts: a review. *J Dent.* 2007; 35(11): 827-35.
96. Sano H, Ciucchi B, Matthews WG, Pashley DH. Tensile properties of mineralized and demineralized human and bovine dentin. *J Dent Res.* 1994; 73(6): 1205-11.
97. Chen WP, Chen YY, Huang SH, Lin CP. Limitations of push-out test in bond strength measurement. *J Endod.* 2013; 39(2): 283-7.
98. Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM. Adhesion testing of dentin bonding agents: A review. *Dent Mater.* 1995; 11(2): 117-25.
99. Øilo G, Olsson S. Tensile bond strength of dentin adhesives: a comparison of materials and methods. *Dent Mater.* 1990; 6(2): 138-44.
100. Pane ES, Palamara JEA, Messer HH. Critical Evaluation of the Push-out Test for Root Canal Filling Materials. *J Endod.* 2013; 39(5): 669-73.
101. Amara L SV, Rajesh LV. Push-out bond strengths of the dentine-sealer interface with and without a main cone: A comparative study using different sealers and cone systems. *Endodontology.* 2012; 24(1): 56-64.
102. Uppalapati L, Mandava J. Evaluation of push-out bond strengths of two different adhesive root canal obturation systems: An *in vitro* study. *J Dr NTR Univ Health Sci.* 2012; 1(2): 111-5.
103. Jainan A, Palamara JE, Messer HH. Push-out bond strengths of the dentine-sealer interface with and without a main cone. *Int Endod J.* 2007; 40(11): 882-90.
104. Ersahan S, Aydin C. Dislocation resistance of iRoot SP, a calcium silicate-based sealer, from radicular dentine. *J Endod.* 2010; 36(12): 2000-2.
105. 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 : revista FOB.* 2009; 17(2): 129-35.

106. Demiryurek EO, Kulunk S, Yuksel G, Sarac D, Bulucu B. Effects of three canal sealers on bond strength of a fiber post. *J Endod*. 2010; 36(3): 497-501.
107. Nagas E, Uyanik O, Durmaz V, Cehreli ZC. Effect of plunger diameter on the push-out bond values of different root filling materials. *Int Endod J*. 2011 Oct; 44(10): 950-5.
108. Hachmeister DR, Schindler WG, Walker WA, 3rd, Thomas DD. The sealing ability and retention characteristics of mineral trioxide aggregate in a model of apexification. *J Endod*. 2002 May; 28(5): 386-90.
109. Quinlan GJ, Martin GS, Evans TW. Albumin: Biochemical properties and therapeutic potential. *Hepatology*. 2005; 41: 1211-19.
110. Estey T, Kang J, Schwendeman SP, and Carpenter JF. BSA degradation under acidic conditions: a model for protein instability during release from PLGA delivery systems. *J Pharm Sci*. 2006; 95: 1626-39.
111. Prati C, Gandolfi MG. Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dent Mater*. 2015; 31(1): 351-70.
112. ASTM international. Standard Specification for Reagent Water 2011. Available from: <http://www.ccdpy.com/download/ASTM/Standard Specification for Reagent Water>. [accessed 4 Feb 2016]
113. Marciano MA, Duarte MA, Camilleri J. Calcium silicate-based sealers: Assessment of physicochemical properties, porosity and hydration. *Dent Mater*. 2016; 32(2): 30-40.
114. 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.
115. Camilleri J, Gandolfi MG, Siboni F, Prati C. Dynamic sealing ability of MTA root canal sealer. *Int Endod J*. 2011; 44: 9–20.
116. Bouillaguet S, Shaw L, Barthelemy J, Krejci I, Wataha JC. Long-term sealing ability of Pulp Canal Sealer, AH-Plus, GuttaFlow and Epiphany. *Int Endod J*. 2008; 41: 219–226.
117. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. *J Dent Res*. 2012; 91(5): 454-9.
118. Viapiana R, Flumignan DL, Guerreiro-Tanomaru JM, Camilleri J, Tanomaru-Filho M. Physicochemical and mechanical properties of zirconium oxide and niobium oxide modified Portland cement-based experimental endodontic sealers. *Int Endod J*. 2014; 47: 437–448.

119. Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, Rached-Júnior FA, De-Deus G, Miranda CE, Pécora JD. Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test. *Int Endod J*. 2012; 45(5): 419-28.
120. Singh S, Podar R, Dadu S, Kulkarni G, Purba R. Solubility of a new calcium silicate-based root-end filling material. *J Conserv Dent*. 2015; 18(2): 149–153.
121. Coomaraswamy K, Lumley P, Hofmann M. Effect of bismuth oxide radiopacifier content on the material properties of an endodontic portland cement–based (MTA-like) system. *J Endod*. 2007; 33: 295–8.
122. Bayne S. Bonding to dental substrates. In: Craig RG, Powers JM. *Restorative Dental Materials*. 11th edn. St. Louis: Mosby Inc; 2011.
123. Tedesco M, Felipe MC, Felipe 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.
124. Akcay M, Arslan H, Durmus N, Mese M, Capar ID. Dentinal tubule penetration of AH Plus, iRoot SP, MTA fillapex, and guttaflow bioseal root canal sealers after different final irrigation procedures: A confocal microscopic study. *Lasers Surg Med*. 2016; 48(1): 70-6.
125. Sonu KR, Girish TN, Ponnappa KC, Kishan KV, Thameem PK. Comparative evaluation of dentinal penetration of three different endodontic sealers with and without smear layer removal - Scanning electron microscopic study. *Saudi Endod J* 2016; 6: 16-20.
126. 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.
127. 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.
128. 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.
129. Shokouhinejad N, Shokouhinejad N1, Gorjestani H, Nasseh AA, Hoseini A, Mohammadi M, Shamshiri AR. Push-out bond strength of gutta-percha with a new bioceramic sealer in the presence or absence of smear layer. *Aust Endod J*. 2013; 39(3): 102-6.



ตอนที่ 1 การทดสอบการรั่วซึมโดยใช้แบบจำลองการรั่วซึมของโปรตีน

ตาราง 10 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยการรั่วซึมของโปรตีนของซีลเลอร์ 3 ชนิด ที่ระยะเวลาต่างๆ

Time	Group	Kolmogorov-Smirnov test		
		Statistic	df	Sig.
Day 1 ^a	CU Sealer	0.361	15	0.000
	AH Plus	0.514	15	0.000
	-	-	-	-
Day 8	CU Sealer	0.171	15	0.200
	AH Plus	0.339	15	0.000
	MTA Fillapex	0.209	15	0.076
Day 15	CU Sealer	0.220	15	0.049
	AH Plus	0.334	15	0.000
	MTA Fillapex	0.243	15	0.017
Day 28	CU Sealer	0.269	15	0.005
	AH Plus	0.425	15	0.000
	MTA Fillapex	0.271	15	0.004

Day 1 is constant when SEALER = MTA Fillapex. It has been omitted._a

ตาราง 11 ค่าเฉลี่ยอันดับ (Mean rank) ของซีลเลอร์ทั้งสามชนิด เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึม

Time	SEALER	N	Mean Rank
day1	CU Sealer	15	27.87
	AH Plus	15	22.13
	MTA Fillapex	15	19.00
	Total	45	
Day8	CU Sealer	15	28.10
	AH Plus	15	17.50
	MTA Fillapex	15	27.40
	Total	45	
Day15	CU Sealer	15	27.00
	AH Plus	15	16.17
	MTA Fillapex	15	25.83
	Total	45	
day28	CU Sealer	15	29.10
	AH Plus	15	12.60
	MTA Fillapex	15	27.30
	Total	45	

Test Statistics^{a,b}

	day1	day8	day15	day28
Chi-Square	7.914	22.504	6.151	14.250
df	2	2	2	2
Asymp. Sig.	.019	.000	.046	.001

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: SEALER

ตาราง 12 สถิติทดสอบครัสคัล-วอลลีส (Kruskal-Wallis Test) เพื่อเปรียบเทียบการรื้อซึมของซีลเลอร์ทั้งสามชนิด

	Mean Rank
day1	1.10
day8	2.37
day15	2.53
day28	4.00

ตาราง 13 สถิติทดสอบฟรี้ดแมน (Friedman test) เปรียบเทียบการรื้อซึมของซีลเลอร์ ชนิดซียูซีลเลอร์ ที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน

a. Friedman Test	
N	15
Chi-Square	38.315
df	3
Asymp. Sig.	.000

ตาราง 14 สถิติทดสอบฟรี้ดแมน (Friedman test) เปรียบเทียบการรื้อซึมของซีลเลอร์ชนิดเอเอสพลัส ที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน

a. Friedman Test	
N	15
Chi-Square	42.972
df	3
Asymp. Sig.	.000

ตาราง 15 สถิติทดสอบฟรีดแมน (Friedman test) เปรียบเทียบการรั่วซึมของซีลเลอร์
ชนิดเอ็มทีเอฟิลาเพกซ์ ที่เวลา 1 8 15 และ 28 วัน

a. Friedman Test	
N	15
Chi-Square	40.014
df	3
Asymp. Sig.	.000

ตาราง 16 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึม
ระหว่างซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์ และ เอเอชพลัส

Time	Sealer	N	Mean Rank	Sum of Ranks
day1	CU Sealer	15	17.37	260.50
	AH Plus	15	13.63	204.50
	Total	30		
day8	CU Sealer	15	22.20	333.00
	AH Plus	15	8.80	132.00
	Total	30		
day15	CU Sealer	15	18.83	282.50
	AH Plus	15	12.17	182.50
	Total	30		
day28	CU Sealer	15	20.20	303.00
	AH Plus	15	10.80	162.00
	Total	30		

ตาราง 17 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึม
ระหว่างซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์ และ เอเอชพลัส

Test Statistics ^a				
	day1	day8	day15	day28
Mann-Whitney U	84.500	12.000	62.500	42.000
Wilcoxon W	204.500	132.000	182.500	162.000
Z	-1.492	-4.274	-2.074	-2.924
Asymp. Sig. (2-tailed)	.136	.000	.038	.003
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.250 ^b	.000 ^b	.037 ^b	.003 ^b

a. Grouping Variable: SEALER

b. Not corrected for ties.

ตาราง 18 ค่าเฉลี่ยและผลรวมอันดับ เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่างซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์
และเอ็มทีเอฟิลาเพกซ์

Time	SEALER	N	Mean Rank	Sum of Ranks
day1	CU Sealer	15	18.50	277.50
	MTA Fillapex	15	12.50	187.50
	Total	30		
day8	CU Sealer	15	17.33	260.00
	MTA Fillapex	15	13.67	205.00
	Total	30		
day15	CU Sealer	15	16.17	242.50
	MTA Fillapex	15	14.83	222.50
	Total	30		
day28	CU Sealer	15	16.90	253.50
	MTA Fillapex	15	14.10	211.50
	Total	30		

ตาราง 19 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึม
ระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดซียูซีลเลอร์ และ เอ็มทีเอฟิล่าเพกซ์

Test Statistics ^a				
	day1	day8	day15	day28
Mann-Whitney U	67.500	85.000	86.000	91.500
Wilcoxon W	187.500	205.000	206.000	211.500
Z	-2.671	-1.141	-1.100	-.871
Asymp. Sig. (2-tailed)	.008	.254	.272	.384
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.061 ^b	.267 ^b	.285 ^b	.389 ^b

a. Grouping Variable: SEALER

b. Not corrected for ties.

ตาราง 20 ค่าเฉลี่ยและผลรวมอันดับ เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่างซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส
และเอ็มทีเอฟิล่าเพกซ์

Time	SEALER	N	Mean Rank	Sum of Ranks
day1	AH Plus	15	16.50	247.50
	MTA Fillapex	15	14.50	217.50
	Total	30		
day8	AH Plus	15	9.47	142.00
	MTA Fillapex	15	21.53	323.00
	Total	30		
day15	AH Plus	15	12.00	180.00
	MTA Fillapex	15	19.00	285.00
	Total	30		
day28	AH Plus	15	9.80	147.00
	MTA Fillapex	15	21.20	318.00
	Total	30		

ตาราง 21 สถิติทดสอบแมนวิทนียู (The Mann-Whitney U test) เปรียบเทียบการรั่วซึม
ระหว่าง ซีลเลอร์ชนิดเอเอชพลัส และเอ็มทีเอฟิลาเพกซ์

Test Statistics^a				
	day1	day8	day15	day28
Mann-Whitney U	97.500	22.000	60.000	27.000
Wilcoxon W	217.500	142.000	180.000	147.000
Z	-1.438	-3.879	-2.178	-3.546
Asymp. Sig. (2-tailed)	.150	.000	.029	.000
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.539 ^b	.000 ^b	.029 ^b	.000 ^b

a. Grouping Variable: SEALER

b. Not corrected for ties.



ตอนที่ 2 การทดสอบความแข็งแรงพันธะด้านแรงกด

ตาราง 22 การทดสอบการแจกแจงของประชากรโดยใช้สถิติ โคโมโกรอฟ-สเมอรนอฟ
(Kolmogorov-Smirnov test)

CU sealer (N)		15
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.1076999
	Std. Deviation	.02317140
	Absolute	.237
Most Extreme Differences	Positive	.237
	Negative	-.104
Kolmogorov-Smirnov Z		.920
Asymp. Sig. (2-tailed)		.366
AH Plus (N)		15
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	1.0506273
	Std. Deviation	.27172201
	Absolute	.118
Most Extreme Differences	Positive	.118
	Negative	-.072
Kolmogorov-Smirnov Z		.459
Asymp. Sig. (2-tailed)		.984
MTA Fillapex (N)		15
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.2883071
	Std. Deviation	.08432961
	Absolute	.151
Most Extreme Differences	Positive	.151
	Negative	-.134
Kolmogorov-Smirnov Z		.585
Asymp. Sig. (2-tailed)		.884

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตาราง 23 การทดสอบความแปรปรวนของประชากรโดยใช้สถิติเลวิน (Levene's test)

Bond strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
14.754	2	42	.000

ตาราง 24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงพันธะผลึกออกโดยใช้สถิติ ANOVA

Bond strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.514	2	3.757	138.332	.000
Within Groups	1.141	42	.027		
Total	8.655	44			

ตาราง 25 การเปรียบเทียบรายคู่ (Multiple Comparisons) ภายหลังการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเกมส์-โฮเวลล์ (Games-Howell's test)

Dependent Variable: Bond strength

Games-Howell

(I) Sealer	(J) Sealer	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.94292733*	.07041295	.000	-1.1269164	-.7589382
	3	-.18060718*	.02258081	.000	-.2388366	-.1223778
2	1	.94292733*	.07041295	.000	.7589382	1.1269164
	3	.76232015*	.07345944	.000	.5735255	.9511148
3	1	.18060718*	.02258081	.000	.1223778	.2388366
	2	-.76232015*	.07345944	.000	-.9511148	-.5735255

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

1 = CU Sealer, 2 = AH Plus, 3 = MTA Fillapex

ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวศิริกุล วนาไพศาล
วันเดือนปีเกิด	26 มกราคม 2529
สถานที่เกิด	เขตคลองสาน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เขตคลองสาน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	ตำแหน่งทันตแพทย์ ประจำโรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2553	ระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต คณะทันตแพทยศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2559	ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก (วิทยาเอ็นโดดอนต์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

