



ผลของอายุฟันต่อการแทรกซึมของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน

EFFECTS OF DIFFERENT TOOTH AGE ON THE PENETRATION  
OF CALCIUM SILICATE-BASED SEALER INTO DENTINAL TUBULES

มาริส่า เลิศเลอเกียรติ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2566

ผลของอายุฟันต่อการแทรกซึมของแคลเซียมซิติเกตเบสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก  
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

EFFECTS OF DIFFERENT TOOTH AGE ON THE PENETRATION  
OF CALCIUM SILICATE-BASED SEALER INTO DENTINAL TUBULES



MARISA LERTLERKIAT

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

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของอายุฟันต่อการแทรกซึมของแคลเซียมซิติเกตเบสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน

ของ

มาริสา เลิศเลอเกียรติ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ..... ประธาน  
(อาจารย์ ทพญ.พีรพร โชติวรวัักษ์) (อาจารย์ ดร.ทพญ.จารุมา ศักดิ์ดี)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ทพญ.กุลนันท์ ดำรงวุฒิ)

|                  |                                                                           |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | ผลของอายุฟันต่อการแทรกซึมของแคลเซียมซิติเกตเบสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน |
| ผู้วิจัย         | มาริสสา เลิศเลอเกียรติ                                                    |
| ปริญญา           | วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต                                                      |
| ปีการศึกษา       | 2566                                                                      |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ ทพญ. พีรพร โชติวรวัักษ์                                           |

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการแทรกซึมของไฮรูทเอสพีและเอเอสพลัสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันในกลุ่มอายุฟันที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาในฟันกรามน้อยรากเดี่ยวของมนุษย์ที่ถูกถอนจำนวน 32 ซี่ ทำการตัดตัวฟันออกจนเหลือความยาวของรากฟัน 12 มิลลิเมตร จากนั้นเตรียมคลองรากฟันด้วยไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ถึงขนาด 40/.06 ในขั้นตอนการอุดคลองรากฟันแบ่งฟันอย่างสุ่มออกเป็น 4 กลุ่ม (กลุ่มละ 8 ซี่) ตามอายุของฟันและชนิดของซีลเลอร์ ดังนี้ (1) อายุฟันน้อยกว่า 25 ปี/ไฮรูทเอสพี (2) อายุฟันน้อยกว่า 25 ปี/เอเอสพลัส (3) อายุฟันมากกว่า 40 ปี/ไฮรูทเอสพี และ (4) อายุฟันมากกว่า 40 ปี/เอเอสพลัส โดยซีลเลอร์แต่ละชนิดถูกผสมด้วยสารเรืองแสงโรดามีนบีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และอุดคลองรากฟันด้วยแท่งกัตาเปอร์ชาขนาด 40/.06 ด้วยเทคนิคซิงเกิลโคน จากนั้นเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน และทำการตัดรากฟันให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2, 5 และ 8 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน จากนั้นนำชิ้นฟันไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน ทำการประเมินค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันและร้อยละความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามเส้นรอบวงด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางและการทดสอบของทูเกียเอสดีที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อประเมินค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน กลุ่มอายุฟันน้อยกว่า 25 ปี/ไฮรูทเอสพีแทรกซึมได้ลึกมากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี/ไฮรูทเอสพี อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับส่วนกลางและส่วนปลายของรากฟัน ในขณะที่กลุ่มอายุฟันน้อยกว่า 25 ปี/เอเอสพลัสแทรกซึมได้ลึกมากกว่ากลุ่มอายุฟันมากกว่า 40 ปี/เอเอสพลัสอย่างมีนัยสำคัญทั้งสามระดับ นอกจากนี้เมื่อประเมินค่าร้อยละความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวง ไม่ว่าจะใช้ไฮรูทเอสพีซีลเลอร์หรือเอเอสพลัสซีลเลอร์ กลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปีแทรกซึมได้ลึกมากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปีอย่างมีนัยสำคัญทั้งสามระดับของรากฟัน และในกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปีไฮรูทเอสพีซีลเลอร์แทรกซึมได้ลึกกว่าเอเอสพลัสซีลเลอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับส่วนปลายของรากฟัน จากการศึกษาจึงสรุปได้ว่าอายุของฟันและชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน และมีผลต่อร้อยละความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันในแนวเส้นรอบวง

คำสำคัญ : แคลเซียมซิติเกตเบสซีลเลอร์, อายุของฟัน, การแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟัน, กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน

|                |                                                                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title          | EFFECTS OF DIFFERENT TOOTH AGE ON THE PENETRATION<br>OF CALCIUM SILICATE-BASED SEALER INTO DENTINAL TUBULES |
| Author         | MARISA LERTLERKIAT                                                                                          |
| Degree         | MASTER OF SCIENCE                                                                                           |
| Academic Year  | 2023                                                                                                        |
| Thesis Advisor | Peerapohn Chotvorarak                                                                                       |

The purpose of this study was to compare dentinal penetration of iRoot SP and AH plus according to different age of a tooth. A total of 32 extracted human single-rooted teeth were decoronated to standardize with a root length of 12 mm. A root canal was prepared using Protaper Next up to 40/.06. For obturation of the canals, teeth were randomly divided into four groups (n=8); based on the tooth's age and types of sealer, used as follows: (1) tooth's age <25 years/iRoot SP (2) tooth's age <25 years/AH plus (3) tooth's age >40 years/iRoot SP and (4) tooth's age >40 years/AH plus. Each of the sealers was mixed with 0.1% rhodamine B. The root canals were obturated with 40/.06 gutta percha (single cone technique) and stored for seven days. The specimens were cross-sectioned in 1 mm slices at 2, 5 and 8 mm from the apex and then analyzed through CLSM. The mean of the maximum sealer penetration depth and circumferential sealer penetration depth were measured and evaluated using the ImageJ software. The data were analyzed with Two-way ANOVA and Tukey's HSD test with a 95% confidence level. The results showed that tooth's age <25 years/iRoot SP had a mean of the maximum sealer penetration depth which was significantly higher than the age of the tooth >40 years/iRoot SP while tooth's age <25 years/AH plus was significantly higher than tooth's age >40 years/AH plus at all root levels. Tooth's age <25 years with iRoot SP or AH plus also had circumferential sealer penetration depth significantly higher than the tooth's age >40 years with iRoot SP or AH plus at all root levels. Besides, tooth's age <25 years/iRoot SP showed significantly higher circumferential sealer penetration depth than the tooth's age <25 years/AH plus. In conclusion, tooth age and types of sealer affected the mean of the maximum sealer penetration depth and circumferential sealer penetration depth.

Keyword : Calcium silicate-based sealer, Tooth age, Dentinal tubule penetration, Confocal laser scanning microscopy

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความเมตตากรุณาและความช่วยเหลือ  
อย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อ.ทพญ.พีรพร โชติวรวัชร ท่านได้สละเวลาอันมีค่าในการให้  
คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆหลายประการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย  
จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเอนโดครินต์ และคณาจารย์ภาควิชาทันตกรรม  
อนุรักษและทันตกรรมประดิษฐ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และให้ความ  
ช่วยเหลือตลอดช่วงการศึกษา

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ทพญ.จารุมา ศักดิ์ดี ผู้กรุณาสละเวลามาเป็นประธาน และ อ.  
ดร.ทพญ. กุลนันท์ ดำรงวุฒิ ผู้กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์  
ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุพการีและครอบครัวที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีมาโดย  
เสมอ ทำให้การทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มาริสสา เลิศเลอเกียรติ

## สารบัญ

|                                                                      | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                                                | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                                             | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                 | ฉ    |
| สารบัญ .....                                                         | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                     | ณ    |
| สารบัญรูปภาพ .....                                                   | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                    | 1    |
| ภูมิหลัง .....                                                       | 1    |
| คำถามการวิจัย.....                                                   | 3    |
| ความสำคัญของการวิจัย .....                                           | 3    |
| จุดมุ่งหมายของการวิจัย .....                                         | 4    |
| ขอบเขตของการวิจัย .....                                              | 4    |
| นิยามศัพท์เฉพาะ.....                                                 | 5    |
| กรอบแนวคิดวิจัย.....                                                 | 5    |
| สมมติฐานงานวิจัย.....                                                | 5    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                          | 7    |
| 1. ซีลเลอร์ (Sealers) .....                                          | 7    |
| 1.1 เรซินเบสซีลเลอร์ (Resin based sealer).....                       | 8    |
| 1.2 แคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ (calcium silicate-based sealer) ..... | 9    |
| 2. การแทรกซึมของซีลเลอร์.....                                        | 12   |
| 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีลเลอร์.....                        | 12   |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2 ขนาดของท่อเนื้อฟัน .....                                                                      | 16 |
| 3. การประเมินการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน.....                                        | 20 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....                                                                   | 23 |
| วัสดุและอุปกรณ์.....                                                                              | 23 |
| ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง .....                                                                     | 23 |
| การเลือกฟัน .....                                                                                 | 24 |
| การเตรียมฟัน .....                                                                                | 25 |
| การเตรียมการทดสอบ.....                                                                            | 25 |
| การศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการแสงน.....                            | 26 |
| การประเมินความลึกการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆ .....                          | 28 |
| การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล .....                                                                 | 30 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา .....                                                                          | 31 |
| การประเมินค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆ.....        | 32 |
| การประเมินร้อยละความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้น รอบวงที่ระดับต่างๆ..... | 34 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....                                              | 36 |
| สรุปผลการวิจัย.....                                                                               | 36 |
| อภิปรายผลการวิจัย .....                                                                           | 36 |
| ข้อเสนอแนะ .....                                                                                  | 41 |
| บรรณานุกรม .....                                                                                  | 42 |
| ประวัติผู้เขียน.....                                                                              | 59 |

## สารบัญตาราง

|                                                                              | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตาราง 1 ส่วนประกอบของเอเอชพลัสและไอรูทเอสพี.....                             | 12   |
| ตาราง 2 กลุ่มการศึกษา.....                                                   | 26   |
| ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน ..... | 33   |
| ตาราง 4 ร้อยละของความลึกซิลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง .....               | 34   |



## สารบัญรูปภาพ

### หน้า

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย .....                                                                                                                         | 5  |
| ภาพประกอบ 2A ปฏิกริยาไฮเดรชัน และ 2B ปฏิกริยาการตกตะกอน .....                                                                                             | 10 |
| ภาพประกอบ 3 จำนวนท่อเนื้อฟันต่อตารางมิลลิเมตร (A) เนื้อฟันบริเวณใกล้ด้านบดเคี้ยว (B) เนื้อฟันบริเวณใกล้เนื้อเยื่อใน และ (C) เนื้อฟันส่วนรากฟัน (62) ..... | 17 |
| ภาพประกอบ 4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณปลายรากแสดงลักษณะของเนื้อฟันโปร่งใส (65).....                                                              | 18 |
| ภาพประกอบ 5 การเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างที่ระดับต่างๆของคลองรากฟัน : 6A ส่วนต้นของรากฟัน 6B กลางรากฟัน และ 6C ปลายรากฟัน (66).....                          | 19 |
| ภาพประกอบ 6 การแทรกซึมของสีย้อมที่ระดับกลางรากฟันที่ไม่สม่ำเสมอจากการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างในกลุ่มคนอายุ 45-60 ปี (13) .....                             | 20 |
| ภาพประกอบ 7 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (CLSM) (72) ....                                                                          | 21 |
| ภาพประกอบ 8 ผลการคำนวณกลุ่มตัวอย่างด้วยโปรแกรม G*power เวอร์ชัน 3.1.9.4 .....                                                                             | 24 |
| ภาพประกอบ 9 ภาชนะที่ใช้เก็บฟันโดยระบุอายุที่ผ่าปากขณะ .....                                                                                               | 25 |
| ภาพประกอบ 10 การยึดฟันในท่อพีวีซีด้วยปูน .....                                                                                                            | 27 |
| ภาพประกอบ 11 การตัดรากฟันในแนวขวางที่ระดับ 2, 5 และ 8 มิลลิเมตรจากปลายราก และการระบุตำแหน่งขอบบนของชิ้นงาน .....                                          | 27 |
| ภาพประกอบ 12 เครื่องขัดชิ้นงาน .....                                                                                                                      | 28 |
| ภาพประกอบ 13 การวัดความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟัน 8 ตำแหน่ง (85) .....                                                                          | 29 |
| ภาพประกอบ 14 สูตรคำนวณค่าเฉลี่ยความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟัน .....                                                                             | 29 |
| ภาพประกอบ 15 การวัดระยะทางที่ซิลเลอร์แทรกซึมไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวง (เส้นสีขา) และการวัดความยาวเส้นรอบวงของคลองรากฟัน (เส้นสีน้ำเงิน) (85) .....   | 30 |
| ภาพประกอบ 16 สูตรคำนวณร้อยละของความลึกซิลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง .....                                                                              | 30 |

ภาพประกอบ 17 การแทรกซึมของเอเอสพลัส (A) และโอรูทเอสพี (B) ที่ระดับส่วนต้น (A1, B1) ส่วนกลาง (A2, B2) และส่วนปลายของรากฟัน (A3, B3) ในกลุ่มฟันอายุน้อยกว่า 25 ปี..... 31

ภาพประกอบ 18 การแทรกซึมของเอเอสพลัส (C) และโอรูทเอสพี (D) ที่ระดับส่วนต้น (C1, D1) ส่วนกลาง (C2, D2) และส่วนปลายของรากฟัน (C3, D3) ในกลุ่มฟันอายุมากกว่า 40 ปี..... 32



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ภูมิหลัง

ความสำเร็จของการรักษาคคลองรากฟันขึ้นอยู่กับกำการจัดเชื้อภายในคลองรากฟันและการอุดคลองรากฟันให้มีความแนบทั้งสามมิติเพื่อป้องกันการติดเชื้อซ้ำ ด้วยการใส่แท่งกัตตาเปอร์ซาร่วมกับซีลเลอร์ โดยซีลเลอร์มีบทบาทในการทำน้ำที่เป็นตัวเชื่อมยึดระหว่างวัสดุอุดกับผนังคลองรากฟัน เติมเต็มช่องว่างระหว่างวัสดุอุดกับวัสดุอุดและวัสดุอุดกับผนังคลองรากฟันที่มีความซับซ้อนทางกายวิภาค โดยความแนบสนิทของการอุดคลองรากฟันส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน ซึ่งจะช่วยให้การยึดติดเชิงกลระดับจุลภาค (micromechanical lock) และการยึดอยู่ (retention) ของวัสดุอุดคลองรากฟัน ทำให้เกิดการป้องกันทางกายภาพ (physical barrier) (1) รวมถึงช่วยฝังแบคทีเรียที่ตกค้างไว้ในท่อเนื้อฟัน (2) และสร้างสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (3)

นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีลเลอร์ เช่น ขนาดอนุภาค ความสามารถในการละลาย การไหลแผ่ และแรงตึงผิว มีผลต่อความลึกและความสม่ำเสมอของการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน (1, 4) โดยตั้งแต่อดีตได้มีการพัฒนาซีลเลอร์ขึ้นมาหลายชนิด ได้แก่ ซีลเลอร์กลุ่มซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (zinc oxide eugenol) ซีลเลอร์กลุ่มเรซิน (resin-based) ซีลเลอร์กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ (glass ionomer-based) ซีลเลอร์กลุ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide-based) และซีลเลอร์กลุ่มซิลิโคน (Silicone based sealer) แต่ยังไม่มียซีลเลอร์กลุ่มไหนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซีลเลอร์ในอุดมคติของ Grossman ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาซีลเลอร์ให้มีคุณสมบัติดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งให้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน ได้แก่ ซีลเลอร์กลุ่มแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate-based sealer) เช่น ไอรูทเอสพี (iRoot SP) หรือชื่อการค้าอื่นคือ เอนโดซีควนซ์บีซีซีลเลอร์ (Endosequence BC Sealer; Brassiere, Savannah, Georgia, USA) และโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์ (TotalFill BC Sealer; FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Switzerland) ซึ่งวัสดุกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxic) น้อย และเป็นพิษต่อหน่วยพันธุกรรม (genotoxic) น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับซีลเลอร์ชนิดอีพอกซีเรซิน (5) รวมถึงมีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (physicochemical properties) ที่ดี เช่น มีค่าพีเอชเป็นด่าง ทำให้มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (bactericidal effect) โดยเมื่อวัสดุแข็งตัวจะเกิดการปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไฮดรอกซิลไอออนออกมา เกิดการสร้างเป็นผลึก

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ภายในท่อเนื้อฟัน นอกจากนี้ซิลเลอร์กลุ่มแคลเซียมซิติเลตยังประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ทำให้สามารถไหลแผ่เข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ดี (6)

จากการศึกษาของ Sigadam และคณะ ในปี 2020 (7) พบว่าที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน เอนโดซีเคอนกรีตซีลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับซิลเลอร์ชนิดอื่นๆ (เอเอสพลัส เอนโดเมตทาโซน (Endomethasone) โรโกซีล (RoekoSeal) และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์) สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang และคณะ ในปี 2018 (8) ที่ประเมินการแทรกซึมของไฮรูทเอสพีเข้าไปในท่อเนื้อฟัน พบว่าไฮรูทเอสพีสามารถแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันและทำให้เกิดความแน่นสนิทของวัสดุอุดคลองรากฟันมากกว่าเอเอสพลัส เนื่องจากไฮรูทเอสพีหรือเอนโดซีเคอนกรีตซีลเลอร์เป็นแคลเซียมซิติเลตเบสซีลเลอร์ที่ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมาก (น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร) มีความหนืดต่ำ และมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) จึงทำให้ไหลแผ่และแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีกว่าซิลเลอร์ชนิดอื่นๆ ซึ่งทั้งไฮรูทเอสพีและเอเอสพลัสมีการไหลแผ่ที่ดีตามมาตรฐาน ISO 6876:2012 คือมีการไหลแผ่ไม่น้อยกว่า 17 มิลลิเมตร (9)

นอกจากนี้ความสามารถในการแทรกซึมของซิลเลอร์ยังขึ้นอยู่กับขนาดของท่อเนื้อฟันเช่นกัน โดย Stavrianos และคณะ (10) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของท่อเนื้อฟันที่ผิวของคลองรากฟันในฟันแท้มนุษย์พบว่าเมื่ออายุมากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดท่อเนื้อฟันมีขนาดลดลงโดยในบริเวณใกล้รูปลายรากฟันมีขนาดลดลงมากที่สุด และเมื่ออายุมากขึ้น มีการสะสมแร่ธาตุในเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟัน (peritubular dentin) มากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของท่อเนื้อฟันและเรียกเนื้อฟันที่เปลี่ยนไปนี้ว่า เนื้อฟันแข็งกระด้าง (sclerotic dentin) หรือเนื้อฟันโปร่งแสง (translucent dentin) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งกระบวนการทางสรีรวิทยา (physiologic process) ที่มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงเริ่มจากรูปลายรากฟันขึ้นมาทางตัวฟัน และเกิดได้จากกระบวนการตอบสนองต่อโรคฟันผุ สอดคล้องกับการศึกษาของ Carrigan และคณะ (11) ที่ทำการศึกษาคำนวณท่อเนื้อฟันในมนุษย์ตามอายุ และตำแหน่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าจำนวนท่อเนื้อฟันในเนื้อฟันส่วนปลายราก (apical dentin) มีจำนวนน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนท่อเนื้อฟันตลอดความยาวของรากฟัน และในผู้ที่มีอายุมากขึ้นมีท่อเนื้อฟันลดลงในทุกส่วนของคลองรากฟัน โดยการศึกษาของ Paque' และคณะ (12) พบว่าเมื่ออายุ 30 ปี จะเริ่มเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างที่เกิดจากกระบวนการทางสรีรวิทยาบริเวณปลายรากฟัน และจะเกิดเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างนี้เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการซึมผ่านของเนื้อฟันด้วย

จากการศึกษาของ Thaler และคณะ (13) ได้ศึกษาการซึมผ่านของสีย้อมเข้าไปในเนื้อฟันส่วนรากฟันที่อายุต่างกันและตำแหน่งต่างกัน 3 ระดับคือ ส่วนต้นของคลองรากฟัน (coronal) ส่วนกลางของคลองรากฟัน (middle) และส่วนปลายของคลองรากฟัน (apical) พบว่าอายุและตำแหน่งของคลองรากฟันมีผลต่อการแทรกซึมของสีย้อมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการศึกษาของ McMichael และคณะ ในปี 2016 (4) ประเมินการแทรกซึมของแคลเซียมซิติเลตเบสซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับ 1 และ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน พบว่าที่ระดับ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เอนโดซีเคอนกรีตซีลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันมากกว่าที่ระดับ 1 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เนื่องจากบริเวณปลายรากฟันมีจำนวนและขนาดของท่อเนื้อฟันน้อยกว่า และมักพบการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างมากกว่า รวมถึงบริเวณปลายรากฟันมักถูกกำจัดชั้นสเมียร์ได้น้อยกว่าที่ระดับส่วนต้น และส่วนกลางของรากฟัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของท่อเนื้อฟันอาจส่งผลกระทบต่อการใช้ของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่น่าสนใจว่าอายุมีผลต่อการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าท่อเนื้อฟันหรือไม่ และที่ช่วงอายุเดียวกัน ชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันหรือไม่ เพื่อนำข้อมูลที่ได้รับไปพิจารณาเลือกให้ซีลเลอร์ในการอุดคลองรากฟันในผู้ป่วยสูงอายุได้อย่างเหมาะสม

### คำถามการวิจัย

1. อายุมีผลต่อการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน แตกต่างกันหรือไม่
2. ที่ช่วงอายุเดียวกัน ชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน แตกต่างกันหรือไม่

### ความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ โดยในปี 2010 ประชากรมีอายุเฉลี่ย 74 ปี แต่ในปี 2020 มีอายุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 77 ปี ซึ่งร้อยละ 20 ของประชากรมีอายุมากกว่าเท่ากับ 60 ปี นอกจากนี้มีการคาดการณ์ว่าภายในปี 2040 นั้น ประชากรที่มีอายุมากกว่าเท่ากับ 60 ปีจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 (14) ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของอายุของผู้ป่วยต่อความสำเร็จในการรักษารากยังคงมีความขัดแย้งกัน โดยบางการศึกษารายงานว่าอายุไม่มีผลต่อความสำเร็จในการรักษารากอย่างมีนัยสำคัญ (15) บางการศึกษารายงานว่าการรักษารากในเด็กมีอัตราความสำเร็จที่สูงกว่า (16) ขณะที่บางการศึกษารายงานว่าผู้สูงอายุมีอัตราความสำเร็จในการ

รักษารากฟันสูงกว่าเด็ก (17) นอกจากนี้การศึกษาอื่นๆยังแสดงให้เห็นว่าอายุเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการถูกถอนฟัน เช่น ผู้สูงอายุมีแนวโน้มต้องถูกถอนฟันที่รักษารากฟันมาแล้วเพิ่มขึ้น 1.4 เท่า (18)

อย่างไรก็ตามในการรักษารากฟันจำเป็นจะต้องทำในผู้ป่วยทุกกลุ่มอายุ ดังนั้นจึงควรตระหนักถึงลักษณะของคลองรากฟัน และโครงสร้างของท่อเนื้อฟันที่เปลี่ยนไปตามอายุของผู้ป่วย โดยในเด็กที่อายุน้อยกว่า 20 ปี จะมีลักษณะคลองรากฟันที่ไม่ซับซ้อน ท่อเนื้อฟันมีขนาดใหญ่ (19) แต่เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นจะเริ่มเกิดการสะสมตัวของเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟันและมีการสะสมแร่ธาตุเพิ่มมากขึ้น ทำให้ท่อเนื้อฟันตีบแคบลง และจำนวนท่อเนื้อฟันลดลง (20) ซึ่งมีหลายการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าจำนวนและขนาดของท่อเนื้อฟันมีผลต่อการแทรกซึมของซีลเลอร์ (4, 21, 22) และความสามารถในการซึมผ่านของเนื้อฟันแปรผกผันกับอายุที่เพิ่มมากขึ้น (13)

จากการปรับปรุงคุณสมบัติที่ดีขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของอายุและชนิดของซีลเลอร์ต่อการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการเลือกใช้ซีลเลอร์ในการรักษาผู้ป่วยสูงอายุได้อย่างเหมาะสม

### จุดมุ่งหมายของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการแทรกซึมของไฮรูดอกซีฟอสเฟตซีลเลอร์และไฮรูดอกซีฟอสเฟตซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน ในกลุ่มอายุน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี ที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

### ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการโดยจำลองการแทรกซึมของไฮรูดอกซีฟอสเฟตซีลเลอร์และไฮรูดอกซีฟอสเฟตซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันของฟันที่มีอายุน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี

### ตัวแปรที่ศึกษา

#### 1. ตัวแปรต้น

1.1 ชนิดของซีลเลอร์ ได้แก่ ไฮรูดอกซีฟอสเฟต และไฮรูดอกซีฟอสเฟต

1.2 อายุของฟัน น้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี

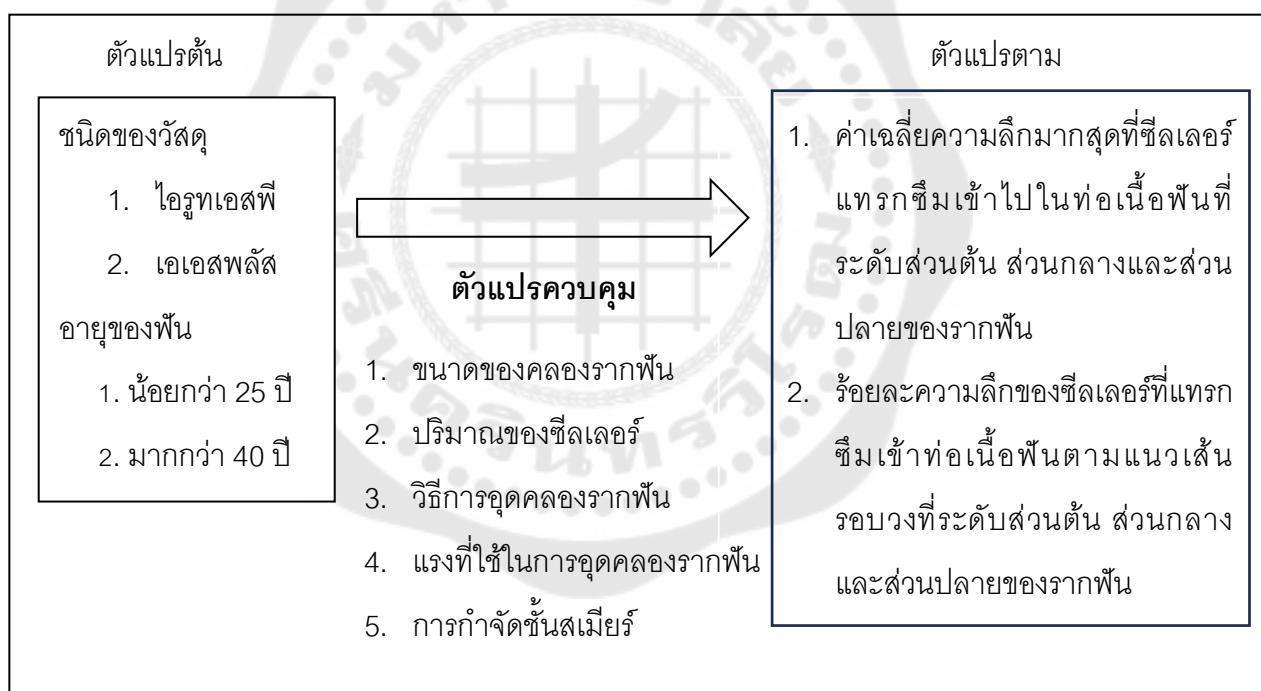
#### 2. ตัวแปรตาม ได้แก่ การแทรกซึมของซีลเลอร์ในท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆ ได้แก่ ส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ขนาดของคลองรากฟัน ปริมาณของซีลเลอร์ วิธีการอุดคลองรากฟัน แรงที่ใช้ในการอุดคลองรากฟัน และการกำจัดชั้นสเมียร์

### นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ซิลเลอรินในกลุ่มแคลเซียมซิติลเกตเบสซิลเลอร หมายถึง ไอรูทเอสพี ที่ใช้ในการอุดคลองรากฟัน
2. โรดามีนบี (Rhodamine B) หมายถึง สีย้อมเรืองแสงเฉพาะ (fluorescent dye) ที่ใช้ย้อมซิลเลอรเพื่อให้มองเห็นระยะทางที่ซิลเลอรแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน เมื่อประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน
3. การแทรกซึมของซิลเลอร หมายถึง การเคลื่อนที่ของซิลเลอรจากคลองรากฟันเข้าไปในท่อเนื้อฟัน

### กรอบแนวคิดวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย

### สมมติฐานงานวิจัย

1. **สมมติฐานหลัก** : อายุฟันไม่มีผลต่อการแทรกซึมของซิลเลอรเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน
2. **สมมติฐานรอง** : อายุฟันมีผลต่อการแทรกซึมของซิลเลอรเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

3. **สมมติฐานหลัก** : ที่ช่วงอายุเดียวกัน ชนิดของซีลเลอร์ไม่มีผลต่อการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

4. **สมมติฐานรอง** : ที่ช่วงอายุเดียวกัน ชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ซีลเลอร์ (Sealers)

ซีลเลอร์ที่ใช้ในคลองรากฟัน (root canal sealer) ทำหน้าที่เติมช่องว่างระหว่างกัตตาเปอร์ชา กับกัตตาเปอร์ชา และระหว่างกัตตาเปอร์ชา กับผนังคลองรากฟัน รวมถึงถูกนำมาใช้เพื่อเติมเต็มช่องว่างที่เกิดจากความซับซ้อนของระบบคลองรากฟัน เป็นการลดการเกิดช่องว่าง (gap) บริเวณรอยต่อระหว่างซีลเลอร์กับเนื้อฟัน โดยซีลเลอร์จะแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน ทำให้เกิดการพนักแน่นในระบบคลองรากฟัน (23) นอกจากนี้ซีลเลอร์ยังทำหน้าที่ฝังแบคทีเรียที่หลงเหลืออยู่ในคลองรากฟัน (24) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ซีลเลอร์จึงมีบทบาทสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จในระยะยาวของการรักษาคคลองรากฟัน (25)

คุณสมบัติในอุดมคติของซีลเลอร์ ตามที่ Grossman กล่าวไว้คือ (26)

- 1) เมื่อแข็งตัว ควรให้การยึดติดที่ดีระหว่างซีเมนต์และผนังคลองรากฟัน
- 2) ควรมีความแนบสนิทที่ดี
- 3) มีความทึบรังสี (radiopaque)
- 4) ฝังมีความละเอียด เพื่อให้สามารถผสมได้ง่าย
- 5) ไม่หดตัวภายหลังการอุดคลองรากฟันแล้ว
- 6) ไม่ทำให้ฟันเปลี่ยนสี
- 7) มีคุณสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (bacteriostatic) หรือไม่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
- 8) แข็งตัวช้า
- 9) ไม่ละลายในเนื้อเยื่อ น้ำเหลือง (tissue fluid)
- 10) ไม่ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อรอบปลายราก
- 11) ละลายในตัวทำละลายทั่วไปและรื้อออกง่ายเมื่อจำเป็น

สามารถแบ่งซีลเลอร์ตามชนิดขององค์ประกอบหลักได้ 6 ประเภท ดังนี้ ซีลเลอร์กลุ่มซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (zinc oxide eugenol-based sealer) ซีลเลอร์กลุ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide-based sealer) ซีลเลอร์กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ (glass ionomer-based sealer) ซีลเลอร์กลุ่มเรซิน (resin-based sealer) ซีลเลอร์กลุ่มซิลิโคน (Silicone based sealer) และซีลเลอร์กลุ่มแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate based sealers) แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีซีลเลอร์ตัวใดที่ตรงตามคุณสมบัติตามอุดมคติของซีลเลอร์

### 1.1 เรซินเบสซีลเลอร์ (Resin based sealer)

เรซินเบสซีลเลอร์ (resin-based sealer) เป็นซีลเลอร์ที่มีเรซินเป็นส่วนประกอบสำคัญเพื่อเพิ่มความแนบสนิทของวัสดุอุดคลองรากฟันกับผนังคลองรากฟัน แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ อีพอกซีเรซินเบส (Epoxy resin based sealer) และเมทาไครเลตเรซินเบส (Methacrylate resin based sealer) วัสดุในกลุ่มนี้ เช่น

#### เอเอชพลัส (AH-Plus : Dentsply DeTrey, Konstanz, Germany)

เอเอชพลัสจัดเป็นอีพอกซีเรซินเบสซีลเลอร์ (Epoxy resin based sealer) ถูกแนะนำครั้งแรกโดย Schroeder ในปี 1957 โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและความแนบสนิทที่ดี มักถูกใช้เป็นวิธีตรวจมาตรฐาน (gold standard) เพื่อเปรียบเทียบกับซีลเลอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีความต้านทานต่อการละลายตัวที่ดี และมีเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability) (27, 28) นอกจากนี้ยังมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ใช้งานง่าย และสามารถต้านการอักเสบได้ รวมถึงมีการหลุดตัวจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันน้อย และมีการยึดติดกับเนื้อฟันสูง จากการเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ระหว่างกลุ่มอะมิโนในเนื้อฟัน และวงอีพอกซี (epoxy ring) ของเรซินทำให้เกิดการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาค (Micromechanical locking) กับคลองรากฟัน (29) ด้วยข้อดีต่างๆ เหล่านี้ ทำให้เอเอชพลัสได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่ก็มีข้อด้อยจากคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของเอเอชพลัส ที่ทำให้ซีลเลอร์ไม่ไปยึดเกาะกับผนังคลองรากฟันบริเวณที่มีความชื้นหรือน้ำสะสมอยู่ (30)

เอเอชพลัสวางขายในรูปแบบหลอด จำนวน 2 หลอด คือ หลอดอีพอกไซด์ (Epoxides) ประกอบไปด้วย บิสฟีนอลเอ (Bisphenol-A epoxy resin) บิสฟีนอลบี (Bisphenol-F epoxy resin) ไอรอนออกไซด์ (Iron oxide pigments) แคลเซียมทังสเตต (Calcium tungstate) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium oxide) และซิลิกอนออกไซด์ (Silicon oxide) ส่วนหลอดเอมีนจะประกอบไปด้วย ไดเบนซิลไดเอมีน (Dibenzyl diamine) อะมิโนอะดามันเทน (Aminoadamantane) ไตรไซโคลเดเคน ไดเอมีน (Tricyclodecane diamine) แคลเซียมทังสเตต เซอร์โคเนียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ (ตาราง 1) โดยเอเอชพลัสมีขนาดอนุภาคประมาณ 8 ไมโครเมตร มีการไหลแผ่ประมาณ 26 มิลลิเมตร และมีความหนาของแผ่นฟิล์มประมาณ 18 ไมโครเมตร (31)

จากการศึกษาของ Macedo และคณะ ในปี 2017 (32) ทำการเปรียบเทียบผลของการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีแตกต่างกัน 4 วิธี คือ เลเทอรัลคอนเดนเซชัน (lateral condensation) วอร์มเวอร์ติคัลคอมแพคชัน (warm vertical compaction) โมดิฟายแท็กเกอร์ไฮบริด (modified

Tagger hybrid) และซิงเกิลโคน (single cone) ต่อการแทรกซึมของเอเอชพลัสเข้าไปในท่อเนื้อฟัน พบว่าการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีเลเซอร์คอนเดนเซชันมีการแทรกซึมของเอเอชพลัสเข้าไปในท่อเนื้อฟันมากที่สุด แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการอุดด้วยวิธีเวอร์มเวอร์ติคอลคอนแพคชัน และโมดิฟายแท็กเกอร์ไฮบริด โดยการอุดด้วยวิธีซิงเกิลโคนจะพบการแทรกซึมน้อยที่สุด

Singh และคณะ ในปี 2012 (33) ได้ศึกษาความลึกของการแทรกซึมของเรซินเบสซิลเลอร์และซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลเบสซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันหลังจากกำจัดชั้นสเมียร์ (smear layer) พบว่าเอเอชพลัสซึ่งเป็นเรซินเบสซิลเลอร์สามารถแทรกซึมลึกเข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ถึง 24 ไมโครเมตร นอกจากนี้ Elhachem และคณะ ในปี 2018 (34) ทำการประเมินการแทรกซึมของเอเอชพลัสบีซีซิลเลอร์ (BC Sealer) และโนเวลไตรแคลเซียมซิลิเกตซิลเลอร์ (novel tricalcium silicate sealer) เข้าไปในท่อเนื้อฟัน เมื่ออุดด้วยวิธีซิงเกิลโคน พบว่าที่ระดับ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เอเอชพลัสมีค่าเฉลี่ยการแทรกซึมและค่าสูงสุดของการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันน้อยกว่าซิลเลอร์กลุ่มอื่น แต่ที่ระดับ 1 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เอเอชพลัสมีค่าเฉลี่ยการแทรกซึมและค่าสูงสุดของการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันไม่แตกต่างกับซิลเลอร์กลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ

## 1.2 แคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ (calcium silicate-based sealer)

แคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ (calcium silicate-based sealer) จัดเป็นหนึ่งในกลุ่มไบโอเซรามิกเบสซิลเลอร์ (bioceramic-based sealer) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุชีวกัมมันต์ (bioactive material) และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) มีส่วนประกอบหลักคือไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ชอบน้ำ (hydrophilic) (26) กลไกการเกิดปฏิกิริยาก่อตัว (setting reaction) ของแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ จึงต้องอาศัยความชื้นจากน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (35) ดังนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reactions) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium silicate hydrate gel หรือ CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) (ภาพประกอบ 2A)

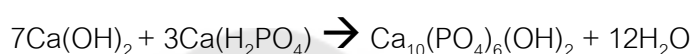
2) ปฏิกิริยาเชิงตกตะกอน (Precipitation Reaction) เกิดขึ้นเมื่อไอออนต่างๆ เช่น แคลเซียมไอออน (calcium ion) และไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ion) ถูกปล่อยออกมาจนเกิดสภาวะสารละลายอิ่มตัวสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาการตกตะกอน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาแรกจะไปทำปฏิกิริยากับของเหลวในร่างกายและฟอสเฟตไอออน (phosphate ions) ที่มี

อยู่แล้วในส่วนประกอบของซีลเลอร์ ทำให้ได้ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) และน้ำ ในบริเวณที่ซีลเลอร์สัมผัสกับเนื้อฟัน (9, 36) (ภาพประกอบ 2B)

#### A. Hydration reactions



#### B. Precipitation Reaction



ภาพประกอบ 2A ปฏิริยาไฮเดรชัน และ 2B ปฏิริยาการตกตะกอน

จากปฏิริยาไฮเดรชันที่มีการปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมา ซึ่งมีคุณสมบัติ ความเป็นด่างสูง ส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และจาก ปฏิริยาเชิงตกตะกอนที่เกิดการสร้างผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ภายในท่อเนื้อฟัน ทำให้ช่วยปิด ช่องว่างที่มีอยู่ภายในวัสดุและช่องว่างระหว่างวัสดุกับเนื้อฟัน และเกิดการยึดติดทางเคมี (chemical bond) กับท่อเนื้อฟัน ทำให้วัสดุเกิดความแนบสนิทมากขึ้น (9)

นอกจากกลไกการเกิดปฏิริยาเชิงตกตะกอนที่ทำให้ซีลเลอร์ยึดติดกับเนื้อฟันแล้ว ก็ ยังมีกลไกอื่นๆที่มีผลทำให้เกิดความแนบสนิทอีก เช่น ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกต เบสซีลเลอร์ที่ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมาก การขยายตัวเมื่อวัสดุแข็งตัว (setting) และคุณสมบัติ การไหลแผ่ที่ดี จึงทำให้ซีลเลอร์สามารถแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ ส่งผลให้เกิดการยึดติดทาง กล (mechanical interlocking bonds) (37) คุณสมบัติความแตกต่างของซีลเลอร์ทำให้เกิดการ สลายเส้นใยคอลลาเจนบริเวณเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน (intertubular dentin) และเกิดการแพร่ ของอนุภาคซีลเลอร์เข้าไปแทนช่องว่างระหว่างท่อเนื้อฟัน ส่งผลให้เกิดความแนบสนิทเพิ่มมากขึ้น (38) โดยจากการศึกษาของ Asawaworarit และคณะ ในปี 2016 (39) ทำการเปรียบเทียบความ แนบสนิทบริเวณปลายรากฟันระหว่างแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์กับเรซินเบสซีลเลอร์ พบว่า หลังจากอุดคลองรากฟันไป 7 วัน เรซินเบสซีลเลอร์ให้ความแนบสนิทที่ดีกว่า แต่เมื่อผ่านไป 4 สัปดาห์หลังจากซีลเลอร์ก่อตัวสมบูรณ์แล้ว แคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ให้ความแนบสนิทที่ ดีกว่าเรซินเบสซีลเลอร์ ดังนั้นจึงสรุปว่าแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์จะให้ความแนบสนิทที่ดี หลังจากก่อตัวสมบูรณ์แล้ว

ตัวอย่างวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ชนิดผสมล่วงหน้า เช่น

### ไอรูทเอสพี (iRoot SP; Innovative Biocreamix, Vancouver, Canada)

เป็นซีลเลอร์ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ตัวแรก ถูกแนะนำครั้งแรกในปี 2007 ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต เซอร์โคเนียมออกไซด์ แคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาโคลลอยด์ (Colloidal silica) (ตาราง 1) มีคุณสมบัติเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactivity) มีความแนบสนิทที่ดี มีความสามารถในการชักนำเนื้อเยื่อกระดูก (osteoconductive) และมีความสามารถในการสร้างพันธะเคมีกับเนื้อฟันบริเวณคลองรากฟัน (40) ซึ่งไอรูทเอสพี มีชื่อการค้าแตกต่างกันไปตามประเทศที่จัดจำหน่าย เช่น เอนโดซีควนซ์บีซีซีลเลอร์ (Endosequence BC Sealer; Brassiere, Savannah, Georgia, USA) และโททอลฟิลล์บีซีซีลเลอร์ (TotalFill BC Sealer; FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Switzerland)

ไอรูทเอสพีถูกวางจำหน่ายในรูปแบบหลอดฉีดสารผสมล่วงหน้า (premixed injectable) ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 2 ไมโครเมตร ทำให้มีการไหลแผ่ที่ดี (41) และสามารถแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ดี (42) ใช้ระยะเวลาแข็งตัวมากกว่า 24 ชั่วโมง โดยมีระยะเวลาทำงาน 2.4 ชั่วโมง (43) นอกจากนี้หลังเกิดปฏิกิริยาก่อตัวไม่พบการหดตัวของวัสดุแต่พบการขยายตัวเล็กน้อย (44)

ในปัจจุบันมีการเสนอแนวคิดในการนำแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์มาใช้ร่วมกับการอุดคลองรากฟันด้วยวิธีไฮดรอลิกคอนเดนเซชัน (hydraulic condensation technique) คือ การอาศัยแรงกดดันจากตัวอุดที่มีรูปร่างและความยาวใกล้เคียงกับรูปร่างคลองรากฟันเพื่อเป็นตัวนำในการดันให้ซีลเลอร์ไหลแผ่ไปตามท่อเนื้อฟันด้วยการใช้แรงไฮดรอลิก (hydraulic force) (45) โดยการศึกษาของ Jeong และคณะ ในปี 2017 (46) ทำการเปรียบเทียบความลึกของการแทรกซึมของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ เมื่ออุดคลองรากฟันด้วยวิธีที่ต่างกัน พบว่าการขยายตัวจากการดูดความชื้นของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์และวิธีการอุดคลองรากฟันที่ต่างกันไม่มีผลต่อความลึกในการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน สอดคล้องกับจากการศึกษาของ McMichael และคณะ (4) ที่ไม่พบความแตกต่างของการแทรกซึมของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ (เอนโดซีควนซ์บีซีซีลเลอร์ คิวิกเซตทู นีโอเอ็มทีเอฟเอส และเอ็มทีเอฟเอสเฟกซ์) เข้าท่อเนื้อฟันระหว่างการอุดแบบแมชชิงโคน (matching cone) ด้วยวิธีดันซีลเลอร์ให้ไหลแผ่เข้าไปตามท่อเนื้อฟันโดยใช้แรงไฮดรอลิก (hydraulic condensation technique) และการอุดด้วยวิธีเวอร์มิเวอร์ติคอลคอมแพคชัน

ตาราง 1 ส่วนประกอบของเอเอชพลัสและไอรูทเอสพี

| ผลิตภัณฑ์ | บริษัทผู้ผลิต                                | ส่วนประกอบ                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AH plus   | Dentsply-Detrey, Konstanz, Germany           | <u>Epoxide paste :</u><br>Diepoxide, Calcium tungstate, Zirconium oxide, Aerosil, Pigment<br><u>Amine paste :</u><br>1-adamantane amine, N,N'-dibenzyl-5-oxa-nonandiamine-1,9, TCD-Diamine, Calcium tungstate, Zirconium oxide, Aerosil, Silicone oil |
| iRoot SP  | Innovative Bioceramix, Vancouver, BC, Canada | Zirconium oxide, calcium silicates, calcium phosphate monobasic, calcium hydroxide, filler, colloidal silica                                                                                                                                          |

## 2. การแทรกซึมของซีลเลอร์

ความลึกและความสม่ำเสมอของการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีลเลอร์ และขนาดของท่อเนื้อฟัน ซึ่งจะมีผลต่อความแนบสนิทระหว่างซีลเลอร์กับเนื้อฟัน (1, 4)

### 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีลเลอร์ ได้แก่

#### 2.1.1 การไหลแผ่ (Flow)

การไหลแผ่ (flow) ของซีลเลอร์จะช่วยเติมเต็มคลองรากฟันส่วนที่เข้าถึงยาก เช่น ผนังเนื้อฟันขรุขระและแคบ ส่วนคอด (isthmus) คลองรากฟันเสริม (accessory canals) และบริเวณช่องว่างระหว่างกัตตาเปอร์ชาแท่งหลักกับกัตตาเปอร์ชาแท่งเสริม ซึ่งตาม ISO 6876:2012 ได้กำหนดอัตราการไหลแผ่ของซีลเลอร์ไม่ควรน้อยกว่า 17 มิลลิเมตร สามารถทำการทดสอบได้โดยผสมซีลเลอร์วางบนกึ่งกลางระหว่างแผ่นแก้วสองชิ้น จากนั้นกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม เป็นเวลา 10 นาที และใช้ดิจิทัลดาลิเปอร์ (digital caliper) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุที่ไหลแผ่ออกมา ถ้าระยะทางที่ใกล้และไกลสุดที่วัสดุไหลแผ่ออกไป ห่างกันไม่เกิน 1 มิลลิเมตรให้นำมาหาค่าเฉลี่ย แต่ถ้าเกิน 1 มิลลิเมตร ให้ทำการทดสอบซ้ำ (9)

จากการศึกษาของ Lyu และคณะ (47) พบว่าไฮดรอกซีฟลูออไรด์มีการไหลผ่านได้ดี โดยสามารถไหลผ่านได้ 27.35 มิลลิเมตร และมีความหนาของฟิล์มประมาณ 13 ไมโครเมตร สอดคล้องกับการศึกษาของ Candeiro และคณะ (5) ที่ประเมินคุณสมบัติการไหลผ่านของแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ พบว่าเอนโดซีควอนซ์ซีลเลอร์มีการไหลผ่านมากกว่าเอเอสพลัสอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีการไหลผ่าน 26.96 และ 21.17 มิลลิเมตร ตามลำดับ และการศึกษาของ Wang และคณะ ในปี 2018 (8) พบว่าไฮดรอกซีฟลูออไรด์แทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟันที่ระดับ 2 มิลลิเมตรจากปลายรากฟันมากกว่าเอเอสพลัส เนื่องจากคุณสมบัติที่มีการไหลผ่านได้ดีและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ซึ่งซีลเลอร์ทั้งสองตัวมีการไหลผ่านได้ดีตามมาตรฐาน ISO 6876:2012

### 2.1.2 ขนาดอนุภาค (particle size)

การแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าสู่ท่อเนื้อฟันขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของซีลเลอร์ด้วย ยิ่งซีลเลอร์มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเนื้อฟันมากเท่าใด จะยิ่งแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟันได้ดีมากขึ้น โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเนื้อฟันบริเวณผนังเนื้อเยื่อในมีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 2-3.2 ไมโครเมตร และแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร) จึงสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในท่อเนื้อฟัน ได้มากถึง 2,000 ไมครอน (2 มิลลิเมตร) (4) และขนาดอนุภาคของซีลเลอร์ ก็ยังมีความสัมพันธ์กับการไหลผ่านของวัสดุด้วย ถ้าซีลเลอร์มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีความสามารถในการไหลผ่านได้ดีกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ (48)

จากการศึกษาของ Marissa และคณะ ในปี 2020 (49) ทำการเปรียบเทียบความสามารถการแทรกซึมของไบโอเซรามิกซีลเลอร์ 3 ชนิด เข้าไปในท่อเนื้อฟัน พบว่าซีลเลอร์ในกลุ่มที่มีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับเรซิน มีการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันมากที่สุด รองลงมาด้วยกลุ่มที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตซิลิเกต และกลุ่มที่มีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตแทรกซึมได้น้อยที่สุด เนื่องจากซีลเลอร์กลุ่มไตรแคลเซียมซิลิเกตประกอบด้วย คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน แคลเซียมและเซอร์โคเนียที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-10 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคมากกว่ากลุ่มอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเนื้อฟันบริเวณปลายรากฟันที่มีขนาด 1-2 ไมโครเมตร ทำให้ซีลเลอร์ในกลุ่มนี้แทรกซึมเข้าไปได้น้อยที่สุด

### 1.1.3 ความหนืด

ซีลเลอร์ที่มีความหนืดต่ำจะมีการไหลผ่านเข้าไปในท่อเนื้อฟันหรือบริเวณคลองรากฟันที่มีความซับซ้อนได้ดีมากขึ้น โดยซีลเลอร์ที่มีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว เช่น ไบโอรูทอาชีเอส (BioRoot RCS) มีลักษณะเหนียว (paste) ทำให้มีความหนืดสูง ส่งผล

ให้มีการไหลแผ่ได้น้อยกว่าซิลเลอร์ที่มีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับเรซิน เช่น เอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ ที่มีลักษณะเหลวกว่า (49)

การศึกษาของ Caceres และคณะ ในปี 2020 (50) เปรียบเทียบผลการแทรกซึมของแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ (ไบโอซีซิลเลอร์) และเอเอสพลัสเข้าไปในท่อเนื้อฟันของรากฟัน 3 ระดับ พบว่าทุกระดับแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์มีการแทรกซึมที่ดีกว่าเอเอสพลัส สอดคล้องกับการศึกษาของ Sigadam และคณะ ในปี 2020 (7) ที่ประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์ 5 ชนิด คือ เอนโดเมทาโซน (Endomethasone) เอเอสพลัส เอนโดซีเควนซ์บีซีซิลเลอร์ โรโกซีล (RoekoSeal) และเอ็มทีเอฟิลลาเพกซ์ เข้าไปในท่อเนื้อฟัน พบว่าเอนโดซีเควนซ์บีซีซิลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีที่สุด เนื่องจากเอนโดซีเควนซ์บีซีซิลเลอร์ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็ก (น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร) ที่มีความเหลว (fluidity) มีความหนืดต่ำ และคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) จึงทำให้ไหลแผ่เข้าท่อเนื้อฟันได้ดีกว่าซิลเลอร์ชนิดอื่นๆ

#### 1.1.4 ความสามารถในการละลาย

แคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์มักมีการละลายตัวและการดูดซับน้ำสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติชอบน้ำและประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กมาก ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวให้สัมผัสกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะแยกตัวออกเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไฮดรอกซิลไอออน ทำให้ยิ่งเพิ่มความสามารถในการละลายและการดูดซับน้ำของซิลเลอร์ (51) ซึ่งจากมาตรฐาน ISO หลังจากซิลเลอร์มีการก่อตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว กำหนดให้ซิลเลอร์ต้องมีการละลายตัวไม่เกินร้อยละ 3 เพื่อให้วัสดุคงความสามารถในการปิดผนึกไว้ได้และป้องกันการติดเชื้อซ้ำ ทำการทดสอบโดยนำชิ้นตัวอย่างซิลเลอร์มาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 วัน จากนั้นชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณน้ำหนักที่หายไปหลังจากแช่ในน้ำ

การศึกษาของ Borges และคณะ (52) ทดสอบการละลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ 4 ชนิดและอีพอกซีเรซินเบสซิลเลอร์ โดยนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปส่องดูพื้นผิวภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) พบว่าไฮดรอกซีซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์ มีการละลายตัวสูง และเมื่อดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าพื้นผิวด้านนอกมีลักษณะขรุขระและหยาบมากขึ้น ซึ่งการเกิดการละลายตัวที่สูงนี้มาจากไฮดรอกซีมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับน้ำ จึงเกิดการชะล้างบริเวณผิวของวัสดุ สอดคล้องกับการศึกษาของ Zordan-Bronzel และคณะ (53) ทำการประเมินคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแคลเซียมซิลิเกตเบสซิล

เลอร์ (ไบโอซีซีลเลอร์ และโทเทิลฟิวบีซีซีลเลอร์) และอีพอกซีเรซินเบสซีลเลอร์ (เอเอสพลัส) พบว่าไบโอซีซีลเลอร์มีการละลายตัวสูงที่สุด โดยมีค่าการละลายตัวเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากอนุภาคในซีลเลอร์มีคุณสมบัติชอบน้ำ ทำให้เพิ่มพื้นที่ให้โมเลกุลของน้ำเข้ามาจับ จึงทำให้เกิดการละลายตัว และเอเอสพลัสมีการละลายตัวน้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมโยง (cross-links) ภายในวัสดุกลุ่มอีพอกซีเรซินเบสซีลเลอร์

และจากการศึกษาของ Zhou และคณะ ในปี 2013 (54) พบว่าเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ซึ่งเป็นแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์มีอัตราการละลายตัวสูง โดยสูงเกือบเท่าค่าสูงสุดของค่ามาตรฐานการละลาย แต่เมื่อทดสอบเสถียรภาพทางมิติกลับพบว่าเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์มีการขยายตัวเล็กน้อย และยังมีเสถียรภาพทางมิติที่ดีตามมาตรฐาน ISO 6876:2012 อยู่ ดังนั้นการละลายตัวของเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางมิติ และการละลายตัวไม่ส่งผลต่อความแนบสนิทของซีลเลอร์

#### 1.1.5 ความหนาของแผ่นฟิล์ม (Film thickness)

ความสามารถในการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอของคลองรากฟันและระหว่างกัฏตาเปอร์ชาขึ้นอยู่กับการไหลและความหนืดของซีลเลอร์ อย่างไรก็ตามสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน (American Dental Association หรือ ADA) ไม่ได้กำหนดเกณฑ์ในการวัดความหนืดไว้โดยตรง แต่มีการเสนอให้ใช้ความหนาของฟิล์มเป็นเกณฑ์สำหรับประเมินความหนืดของวัสดุได้เช่นกัน (55) ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 6876:2012 กำหนดให้ซีลเลอร์มีความหนาของวัสดุน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ทำการทดสอบโดยผสมวัสดุแล้วหยดลงตรงกลางแผ่นแก้วแผ่นแรก หลังจากนั้น 3 นาที ทำการวางแผ่นแก้วแผ่นที่สองพร้อมใส่น้ำหนัก 150 นิวตัน โดยการให้น้ำหนักกดลงไปบนวัสดุเพื่อให้วัสดุสามารถไหลแผ่ไปตามพื้นที่ระหว่างแผ่นแก้วได้ และหลังจากผสมวัสดุเป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาทั้งหมดของแผ่นแก้วที่ซ้อนทับกับวัสดุ โดยใช้เวอร์เนียร์ระบบดิจิตอล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) คำนวณหาความหนาของแผ่นฟิล์มของวัสดุ โดยนำความหนาที่วัดได้การลบกับความหนาของแผ่นแก้วที่ซ้อนทับกันในขณะที่ไม่มีวัสดุอยู่ภายใน (56)

การศึกษาของ Marciano และคณะในปี 2016 (57) พบว่าการไหลแผ่ของซีลเลอร์เกี่ยวข้องกับความหนาของแผ่นฟิล์ม โดยซีลเลอร์ที่มีการไหลแผ่ที่ดีจะมีความหนาของแผ่นฟิล์มน้อย และแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์มีความหนาของแผ่นฟิล์มแตกต่างกันไปตามขนาดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) และสารที่บรัส โดยจากการศึกษาของ Khalil และคณะ ในปี 2016 (58) ทำการเปรียบเทียบความหนาของแผ่นฟิล์มระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตซีลเลอร์ 2 ชนิด (ไบโอเอ็มเอ็มและไบโอธูอาร์ซีเอส) กับเอเอสพลัส พบว่าไบโอเอ็มเอ็มมีความหนา

ของแผ่นฟิล์มมากที่สุด ตามด้วยไบโอธูธอาร์ซีเอสและเอเอสพลัส ตามลำดับ เนื่องจากเอเอสพลัสเป็นซีลเลอร์ที่มีความหนืดต่ำที่สุด จึงส่งผลให้มีความหนาของแผ่นฟิล์มน้อยที่สุดด้วย และถึงแม้ไตรแคลเซียมซิลิเกตซีลเลอร์ทั้ง 2 ชนิดจะมีความหนาของแผ่นฟิล์มมากกว่ามาตรฐานที่กำหนด แต่ความหนานั้นไม่เป็นอุปสรรคในการปิดผนึกของวัสดุอุดคลองรากฟัน เนื่องจากซีลเลอร์ในกลุ่มนี้มีความว่องไวทางชีวภาพ (bioactive material) ทำให้สามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟันเพื่อแทนที่เส้นใยคอลลาเจนที่ถูกทำลายได้

การศึกษาของ Zamparini และคณะ ในปี 2022 (59) ที่ทำการประเมินความหนาของแผ่นฟิล์มและการไหลแผ่ของเซราซีล นีโอซีลเลอร์โฟ เอเอสพลัสไบโอเซรามิก และเอเอสพลัสพบว่าเซราซีลมีการไหลแผ่มากที่สุดและมีความหนาของแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด โดยไม่แตกต่างกับเอเอสพลัสอย่างมีนัยสำคัญ และซีลเลอร์ที่ทดสอบทุกชนิดมีความหนาของแผ่นฟิล์มตามมาตรฐาน ISO 6876:2012 และการศึกษาของ Lyu และคณะ ในปี 2022 (47) ทำการประเมินความหนาของแผ่นฟิล์มและการไหลแผ่ของไบโอซีล (Bioseal) ไธรูทเอสพี เอเอสพลัส โรโกซีล (RoekoSeal) และกัตตาโฟลทู (GuttaFlow2) พบว่าไธรูทเอสพีมีความหนาของแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด (13 ไมโครเมตร) และมีการไหลแผ่มากที่สุดคือ 27.36 มิลลิเมตร เนื่องจากไธรูทเอสพีประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร (41) ซึ่งเล็กกว่าซีลเลอร์ในกลุ่มอื่นๆ จึงส่งผลให้ไธรูทเอสพีมีความหนาของแผ่นฟิล์มน้อยกว่า และไหลแผ่ได้ดีกว่า โดยเมื่อเทียบกับขนาดท่อเนื้อฟันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 ไมโครเมตร (42) ไธรูทเอสพีจึงไหลแผ่เข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ดี (8)

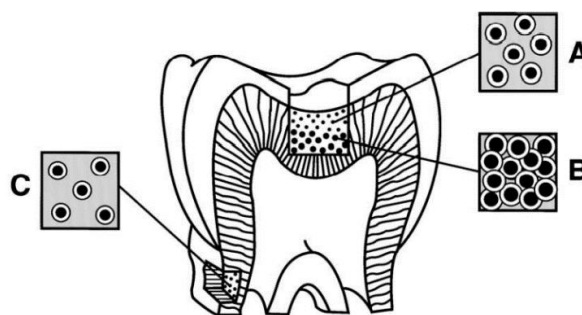
## 2.2 ขนาดของท่อเนื้อฟัน

ท่อเนื้อฟันเป็นลักษณะที่สำคัญของเนื้อฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-4 ไมครอน ซึ่งท่อเนื้อฟันมีผลต่อคุณสมบัติทางกล ความสามารถในการทนต่อแรงบดเคี้ยว และเกี่ยวข้องกับการยึดติดกับเนื้อฟัน ในบริเวณตัวฟันจะพบท่อเนื้อฟันมีลักษณะรูปตัว S เกิดจากทิศทางการเคลื่อนที่ของเซลล์สร้างเนื้อฟัน (odontoblast) ในขณะที่มีการสร้างเนื้อฟัน (60) จากการศึกษาของ Garberoglio และ Brännström (42) ได้ทำการประเมินจำนวนท่อเนื้อฟันที่ระยะห่างต่างๆจากเนื้อเยื่อในของฟันมนุษย์จำนวน 30 ซี่ พบว่าเนื้อฟันบริเวณใกล้เนื้อเยื่อใน บริเวณกลางเนื้อฟัน และบริเวณใกล้เคลือบฟัน มีจำนวนท่อเนื้อฟัน 45,000 29,500 และ 20,000 ท่อต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 1.2 และ 0.9 ไมโครเมตร ตามลำดับ

และการศึกษาของ Mjör & Nordahl (61) ได้ทำการทดสอบความหนาแน่นของท่อเนื้อฟันในฟันมนุษย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยการประเมินจำนวนท่อเนื้อฟันต่อ 100 ไมครอน บริเวณด้านใน ตรงกลางและด้านนอกของเนื้อฟัน ซึ่งแต่ละตำแหน่งแบ่งเป็นอีก 6

ตำแหน่งย่อย พบว่าบริเวณด้านในและตรงกลางของเนื้อฟัน ส่วนตัวฟันมีจำนวนท่อเนื้อฟันมากกว่าส่วนรากฟันอย่างมีนัยสำคัญ และบริเวณด้านนอกของตัวฟัน บริเวณส่วนยอดของเนื้อเยื่อใน (pulp horn) มีจำนวนท่อเนื้อฟันสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น เนื้อฟันบริเวณใกล้เนื้อเยื่อในจะมีความหนาแน่นของท่อเนื้อฟันและเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเนื้อฟันบริเวณใต้รอยต่อของเนื้อฟันกับเคลือบฟัน (dentoenamel junction) และเนื้อฟันบริเวณรากฟันจะมีความหนาแน่นน้อยที่สุด (60, 62) (ภาพประกอบ 3)



ภาพประกอบ 3 จำนวนท่อเนื้อฟันต่อตารางมิลลิเมตร (A) เนื้อฟันบริเวณใกล้ด้านบดเคี้ยว (B) เนื้อฟันบริเวณใกล้เนื้อเยื่อใน และ (C) เนื้อฟันส่วนรากฟัน (62)

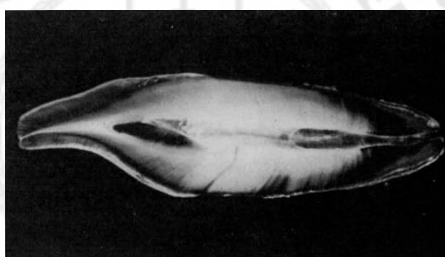
Lo Giudice และคณะ ในปี 2015 (63) ทำการศึกษาขนาดของท่อเนื้อฟันบริเวณรากฟันส่วนต้น กลาง และปลายราก ในฟันกรามน้อยมนุษย์ 30 ซี่ ที่มีอายุระหว่าง 10 ถึง 14 ปี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในส่วนต้นของรากฟันมีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเนื้อฟัน 4.32 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่าบริเวณกลางรากฟันและปลายรากฟันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเนื้อฟัน 3.74 และ 1.73 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของท่อเนื้อฟันเล็กลงในทิศทางส่วนต้นไปทางส่วนปลายของรากฟัน โดยเมื่อพิจารณาจำนวนท่อเนื้อฟันเฉลี่ยในพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร พบว่าบริเวณส่วนต้นของรากฟันมีจำนวนท่อเนื้อฟันเฉลี่ย ( $46,798 \pm 10,644$ ) ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณปลายรากฟัน ( $45,192 \pm 10,888$ ) ในขณะที่บริเวณกลางรากฟันมีจำนวนน้อยกว่า ( $30,940 \pm 7,651$ )

### 2.2.1 อายุต่อการเปลี่ยนแปลงของท่อเนื้อฟัน

จากการศึกษาของ Carrigan และคณะ (11) ได้ศึกษาจำนวนท่อเนื้อฟันในมนุษย์ตามอายุ และตำแหน่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้ฟันตัดบนซี่กลาง พบว่าเนื้อฟันบริเวณตัวฟัน คอฟัน กลางรากฟัน และปลายรากฟัน มีจำนวนท่อเนื้อฟัน 265,460 254,340 234,060 และ 49,140 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจำนวนท่อเนื้อฟันจะลดลงตามตำแหน่งไปทางปลายรากฟัน (apical location) โดยเนื้อฟันส่วนปลายราก (apical dentin) มี

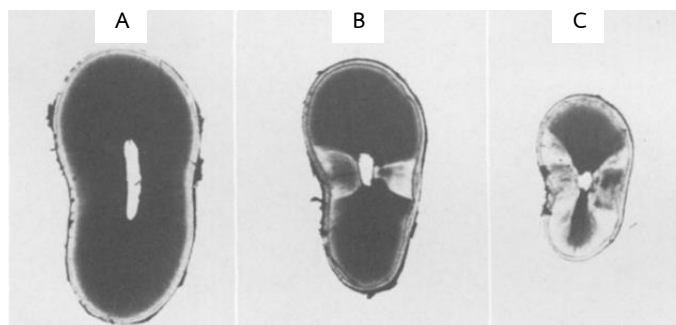
จำนวนท่อเนื้อฟันน้อยที่สุด และในคนที่อายุมากขึ้นมีท่อเนื้อฟันลดลงในทุกส่วนของคลองรากฟัน

โดยการเปลี่ยนแปลงของอายุเกี่ยวข้องกับการสร้างเนื้อฟันทุติยภูมิ (secondary dentin) และการสะสมแร่ธาตุในเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้ท่อเนื้อฟันเกิดการอุดตัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เนื่องจากเนื้อฟันที่เพิ่มขึ้นนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติของแสงสะท้อนและแสงที่ส่องผ่าน จึงเห็นเนื้อฟันมีลักษณะโปร่งใส (transparent) (ภาพประกอบ 4) หรือเรียกเนื้อฟันที่เปลี่ยนไปนี้ว่า เนื้อฟันแข็งกระด้าง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งกระบวนการทางสรีรวิทยา (physiologic process) ที่มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่เริ่มจากปลายรากฟันขึ้นมาทางตัวฟัน และเกิดได้จากกระบวนการตอบสนองต่อโรคฟันผุ (64, 65) แต่โรคปริทันต์ไม่ส่งผลต่อการเกิดเนื้อฟันโปร่งใส (transparent dentin) (66)



ภาพประกอบ 4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณปลายรากแสดงลักษณะของเนื้อฟันโปร่งใส (65)

การศึกษาของ Vasiliadis และคณะ (66) ได้ประเมินจำนวนและการกระจายตัวของการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างในฟันเขี้ยวมนุษย์ที่ถูกถอน พบว่าทิศทางการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างจะเริ่มเกิดที่เนื้อฟันบริเวณปลายรากที่อยู่ติดกับเคลือบรากฟัน (cementum) ก่อน จากนั้นจะเริ่มสร้างไปทางตัวฟัน และเข้าไปทางคลองรากฟันตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในแนวตัดขวาง (transverse) ตามรูปด้านขวามือ เนื้อฟันแข็งกระด้างจะเริ่มเกิดที่ด้านใกล้กลาง (mesial) และด้านไกลกลาง (distal) ของรากฟัน มีลักษณะคล้ายผีเสื้อ (butterfly shape) โดยบริเวณปลายรากฟันจะมีการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างมากกว่า ดังนั้นจะเห็นปีกผีเสื้อมีลักษณะใหญ่มากกว่าบริเวณส่วนต้นของรากฟัน (coronal third) และส่วนกลางของรากฟัน (middle third) (ภาพประกอบ 5)

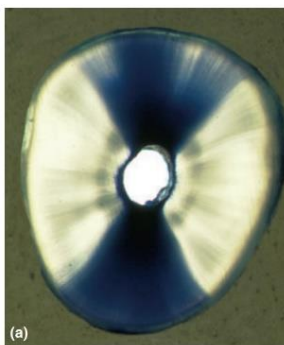


ภาพประกอบ 5 การเกิดเนื้อฟันแข็งกระดูกที่ระดับต่างๆของคลองรากฟัน : 6A ส่วนต้นของรากฟัน 6B กลางรากฟัน และ 6C ปลายรากฟัน (66)

สอดคล้องกับการศึกษาของ Stavrianos และคณะ (10) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามอายุของท่อเนื้อฟันบริเวณผนังคลองรากฟันในฟันแท้มนุษย์ในช่วงอายุ 9 ถึง 60 ปี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเมื่ออายุมากขึ้น จะมีการสะสมแร่ธาตุและการสร้างเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ท่อเนื้อฟันเกิดการอุดตัน และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเนื้อฟันลดลง โดยมีขนาดลดลงมากที่สุดบริเวณใกล้ปลายรากฟัน

นอกจากนี้การศึกษาของ Stanley และคณะ (67) พบว่ามีการเกิดเนื้อฟันแข็งกระดูกจากกระบวนการทางสรีรวิทยาในฟันทุกวัย โดยจะพบมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มสร้างจากปลายรากฟันขึ้นมาทางตัวฟัน ดังนั้นในคนอายุน้อยมักพบเนื้อฟันแข็งกระดูกเฉพาะปลายรากฟัน (apical third) สอดคล้องกับการศึกษาของ Paque' และคณะ (12) พบว่า เมื่ออายุ 30 ปี จะเริ่มเกิดเนื้อฟันแข็งกระดูกที่เกิดจากกระบวนการทางสรีรวิทยาบริเวณปลายรากฟัน และจะเกิดเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเกิดเนื้อฟันแข็งกระดูกนี้ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการซึมผ่านของเนื้อฟัน ดังนั้นเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้น การซึมผ่านได้ของเนื้อฟันจึงลดลง (67)

จากการศึกษาของ Thaler และคณะ (13) ที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของสีย้อมเข้าไปในเนื้อฟันส่วนรากฟันที่อายุต่างกันและตำแหน่งต่างกัน 3 ระดับคือ ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าอายุมีผลต่อการแทรกซึมของสีย้อมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเกิดเนื้อฟันแข็งกระดูกตามอายุที่เพิ่มมากขึ้นจะไปลดการแทรกซึมของสีย้อม (ภาพประกอบ 6) นอกจากนี้การแทรกซึมของสีย้อมยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งภายในคลองรากฟันด้วย โดยสีย้อมแทรกซึมได้ลดลงในตำแหน่งส่วนต้นของคลองรากฟันไปทางส่วนปลายของคลองรากฟัน



ภาพประกอบ 6 การแทรกซึมของสีย้อมที่ระดับกลางรากฟันที่ไม่สม่ำเสมอจากการเกิดเนื้อฟันแข็ง  
กระด้างในกลุ่มคนอายุ 45-60 ปี (13)

### 2.2.2 การแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าท่อนเนื้อฟันที่ระดับต่างๆของรากฟัน

Camilleri ในปี 2015 (68) ประเมินการแทรกซึมของเอเอสพลัสเมื่ออุดด้วยวิธี  
วอร์มเวอร์ติคอลลคอนแพคชั่น พบว่าเอเอสพลัสสามารถแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟันในส่วนต้น และ  
ส่วนกลางรากฟันได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่บริเวณปลายรากฟัน มีการแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟันได้  
น้อยกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ McMichael และคณะ ในปี 2016 (4) ที่ประเมินการแทรก  
ซึมของแคลเซียมซิลิเกตเบสซิลเลอร์เข้าท่อนเนื้อฟันที่ระดับ 1 และ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน  
พบว่าที่ระดับ 5 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เอนโดซีควนซ์บีซีซิลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟัน  
มากกว่าที่ระดับ 1 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เนื่องจากยิ่งใกล้บริเวณปลายรากฟันมากขึ้น  
จำนวนและขนาดของท่อนเนื้อฟันจะยิ่งลดลงตามไปด้วย และบริเวณปลายรากฟันมักพบการเกิด  
เนื้อฟันแข็งกระด้างมากกว่า รวมถึงบริเวณปลายรากฟันถูกกำจัดขึ้นสเมียร์ได้น้อยกว่าที่ระดับส่วน  
ต้น และส่วนกลางของรากฟัน

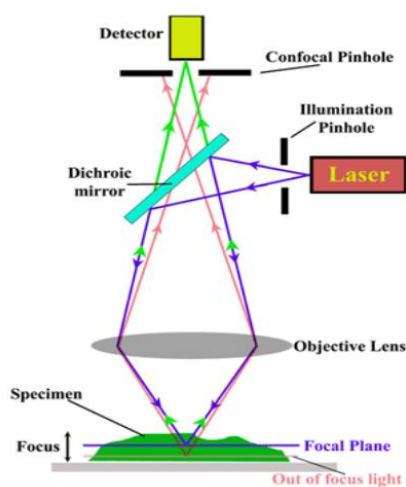
นอกจากนี้การศึกษาของ El hachem และคณะ ในปี 2018 (34) พบว่าที่ระดับ 5  
มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน ซิลเลอร์มีความลึกมากที่สุดและความลึกของการแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟัน  
เฉลี่ยมากกว่าที่ระดับ 1 มิลลิเมตรจากปลายรากฟันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับ 5 มิลลิเมตรจาก  
ปลายรากฟัน เอเอสพลัสมีการแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟันน้อยกว่าเอนโดซีควนซ์บีซีซิลเลอร์อย่างมี  
นัยสำคัญ แต่ที่ระดับ 1 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เอนโดซีควนซ์บีซีซิลเลอร์และเอเอสพลัสมี  
การแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟันไม่แตกต่างกัน

### 3. การประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อนเนื้อฟัน

เริ่มแรกมีการนำกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) มาประเมินการแทรก  
ซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อนเนื้อฟัน แต่สามารถตรวจสอบได้เฉพาะพื้นผิวของชั้นรากฟันเท่านั้น

(69) ถัดมาจึงเริ่มมีการนำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาใช้ในการประเมินแทน แต่ก็มีข้อเสียคือการเตรียมชิ้นตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีกระบวนการดึงน้ำออกจากชิ้นตัวอย่าง (dehydration) ทำให้ชิ้นตัวอย่างสูญเสียแร่ธาตุ (demineralization) นอกจากนี้การขัดเงาชิ้นตัวอย่าง และการวิเคราะห์ภายใต้ระบบสุญญากาศสูง (high vacuum) ทำให้เกิดภาพปลอม (artifacts) ขึ้นได้ ส่งผลให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อน (70) ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันจึงนิยมเลือกใช้วิธีที่ไม่ต้องเตรียมชิ้นตัวอย่างก่อน นั่นคือการประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (Confocal laser scanning microscopy หรือ CLSM)

กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกนถูกพัฒนาครั้งแรกโดย Minsky ในช่วงทศวรรษ 1950 (71) หลักการทำงานของกล้องชนิดนี้จะอาศัยแสงเลเซอร์ (laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อส่องผ่านไปยังวัตถุ (ภาพประกอบ 7) เมื่อวัตถุได้รับพลังงานจากแสงเลเซอร์ก็จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของการเรืองแสง ทำให้สามารถมองเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์ (72) โดยสามารถมองเห็นเป็นภาพสองมิติ (2D) ที่นำหลักการสะท้อนภาพจากกระจก (scanning mirrors) มาเป็นตัวช่วยในการถ่ายภาพในมุมมองต่างๆ เมื่อทำการเคลื่อนชิ้นตัวอย่างที่ศึกษาไปในทิศทางต่างๆ แล้วทำการถ่ายภาพในแต่ละตำแหน่ง จนเป็นพื้นที่ระนาบขนาดหนึ่ง จะทำให้สามารถใช้โปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น อิมเมจเจ (ImageJ) ทำการวิเคราะห์ออกมาเป็นภาพสามมิติได้ (73, 74) โดยชิ้นตัวอย่างที่นำมาศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลจะถูกย้อมด้วยสารเรืองแสง (Fluorescent dyes) เพื่อสังเกตเฉพาะสิ่งที่สนใจศึกษาเท่านั้น



ภาพประกอบ 7 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (CLSM) (72)

ในการประเมินการซึมผ่านของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกนมักทำการติดฉลากสีย้อมเรืองแสงเฉพาะ (Fluorescent Dyes) เช่น สีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) เข้ากับซีลเลอร์ เพื่อติดตามทิศทางการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน (8, 74) โดยสีย้อมโรดามีนบีมีคุณสมบัติเป็นฟลูออโรฟอร์ (fluorophore) เมื่อถูกกระตุ้นที่เหมาะสมจะเกิดการคายแสงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ออกมา ทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้น มีข้อดีคือสามารถระบุตำแหน่งของซีลเลอร์ภายในท่อเนื้อฟันได้ (75) และเมื่อผสมสีย้อมโรดามีนบีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 2 เข้ากับซีลเลอร์ พบว่าสีย้อมไม่มีผลกับคุณสมบัติทางกายภาพของซีลเลอร์ (76)

การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกนจะให้ภาพที่มีความละเอียดสูง มีการสร้างภาพความเปรียบต่างสูง (high contrast) ทำให้เห็นการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ชัดเจน และสามารถเลือกชั้นความลึกที่ต้องการประเมินได้ (77) รวมถึงให้ข้อมูลที่ชัดเจน แม่นยำ และสามารถวัดผลได้มากกว่าเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (46, 78)

### บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### วัสดุและอุปกรณ์

##### 1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่

- 1.1 สารละลายไทมอลความเข้มข้นร้อยละ 0.1
- 1.2 สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5
- 1.3 อีดีทีเอความเข้มข้นร้อยละ 17 (Ethylenediaminetetraacetic acid หรือ EDTA)
- 1.4 สีย้อมเรืองแสงโรดามีนบี (Rhodamine B) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1
- 1.5 ซีลเลอร์ชนิดไฮดรอกซีฟอสเฟต และเอเอสพลัส

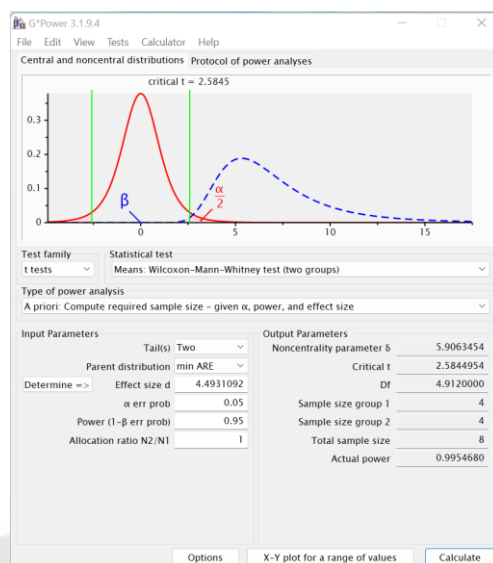
##### 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่

- 2.1 ไฟล์ชนิดเคขนาด 10 และ 15
- 2.2 ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องระบบโพรมิเตอร์เน็กซ์ ขนาด 17/04  
25/06 30/07 และ 40/06
- 2.3 แท่งกัตาเปอร์ชาโพรมิเตอร์เน็กซ์ ขนาด 40/06
- 2.4 มอเตอร์ขยายคลองรากฟัน (Rotary X-Smart; Dentsply Sirona, USA)
- 2.5 กระดาษขัดรูปกรวยแหลม ขนาด 40/06
- 2.5 เครื่องไฮโซเมต
- 2.6 ดิจิตัลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์
- 2.7 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 2.8 กระดาษทรายน้ำความละเอียด 800, 1000, 1200, 1500 และ 2,000
- 2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (Confocal laser

scanning microscopy)

#### ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

คำนวณกลุ่มตัวอย่างด้วยโปรแกรม G\*power เวอร์ชัน 3.1.9.4 โดยใช้ขนาดของผล (effect size) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่คล้ายคลึงกันของ Gunes และคณะ (79) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ได้ผลตามภาพประกอบที่ 8 การศึกษานี้จึงเลือกใช้กลุ่มตัวอย่างย่อยกลุ่มละ 8 ที่รวมทั้งหมด 32 ที่

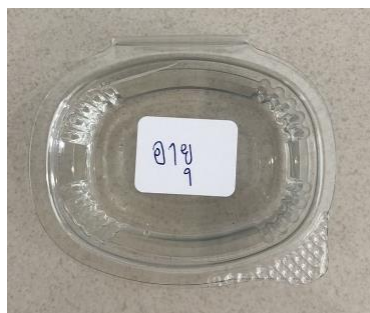


ภาพประกอบ 8 ผลการคำนวณกลุ่มตัวอย่างด้วยโปรแกรม G\*power เวอร์ชัน 3.1.9.4

### การเลือกฟัน

ทำการเลือกฟันกรามน้อยรากเดี่ยวของมนุษย์ไม่จำกัดเพศ ในช่วงอายุน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี โดยปราศจากรอยโรคฟันผุ (caries free) รอยแตก มีรากปิดสมบูรณ์ มีรากตรงที่มีค่ามุมความโค้งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 องศา และมีรากฟันยาวอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร ที่ถูกถอนจำนวน 32 ซี่ และถูกแช่ในกระปุกพลาสติกที่มีสารละลายไทมอล ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิห้อง โดยด้านบนของแต่ละกระปุกจะติดฉลากระบุอายุของซี่ฟันเอาไว้ (ภาพประกอบ 9) ซึ่งฟันดังกล่าวเป็นฟันที่ถูกเก็บจากโรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยขั้นตอนการเก็บฟัน เจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลทันตกรรม ซึ่งเป็นบุคคลที่ 3 ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัย จะทำการเก็บฟันใส่ไว้ในภาชนะที่มีการเขียนช่วงอายุฟันเอาไว้ และผู้ทำวิจัยทำการเก็บตัวอย่างฟันจากคลังภาชนะที่มีการแยกช่วงอายุฟันเอาไว้ ดังนั้นผู้ทำการทดลองจะไม่สามารถระบุตัวตน เพศ และอายุที่แน่นอนของบุคคลที่เป็นเจ้าของฟัน และไม่สามารถระบุสาเหตุของการถอนฟันขึ้นๆได้

จากนั้นถ่ายภาพรังสีรอบปลายรากฟัน (Periapical radiograph) ในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้น (buccolingual) และแนวใกล้กลางใกล้กลาง (mesiodistal) เพื่อยืนยันการมีคลองรากฟันเดียว และรากฟันมีค่ามุมความโค้งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 องศา รวมถึงทำการตรวจสอบความกว้างของคลองรากฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและใกล้กลางใกล้กลางจากภาพรังสี ถ้ากว้างกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ขนาด 40/06 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.08 มิลลิเมตร) จะถูกคัดออก



ภาพประกอบ 9 ภาพที่ใช้เก็บฟันโดยระบุอายุที่ฝาภาชนะ

### การเตรียมฟัน

การเตรียมฟันในการศึกษานี้ประยุกต์จากการศึกษาของ Osiri และคณะ (80) โดยการตัดฟันส่วนตัวฟันออกในทิศทางตั้งฉากกับแกนฟันด้วยเครื่องไอโซเมต (Isomet 1000; Buhler, Lake Bluff, NY) จนเหลือความยาวของรากฟัน 12 มิลลิเมตร จากปลายรากฟัน ทำการตรวจสอบความยาวของรากฟันที่ตัดโดยใช้ดิจิตัลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Digital vernier caliper; Mitutoyo, Absolute DIGIMATIC, Japan) จากนั้นทำความสะอาดและขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนด้วยเครื่องระบบโพเทเปอร์เน็กซ์ (ProTaper Next ; Dentsply Sirona, York, PA) ถึงขนาด 40/.06 ที่ความยาวทำงาน (working length) สั้นกว่าปลายรากฟัน 1 มิลลิเมตร ร่วมกับล้างคลองรากฟันด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และกำจัดชั้นสเมียร์ (smear layer) ด้วยอีดีทีที่เคความเข้มข้นร้อยละ 17 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที (81) ตามด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที (82) ซับคลองรากฟันให้แห้งด้วยแท่งกระดาษซับ (sterile paper point) ขนาด 40/.06 (ProTaper Next paper point X4; Dentsply Sirona, York, PA) 3 ครั้ง

### การเตรียมการทดสอบ

แบ่งกลุ่มการทดลองอย่างสุ่มออกเป็น 2 กลุ่มตามอายุของฟัน คือ ฟันอายุน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี กลุ่มละ 16 ซี่ โดยแต่ละกลุ่มแบ่งกลุ่มย่อยตามซีลเลอร์ที่ใช้กลุ่มละ 8 ซี่ โดยการสุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตาราง 2 กลุ่มการศึกษา

| กลุ่มที่ | อายุฟัน                       | ชนิดซีลเลอร์       |
|----------|-------------------------------|--------------------|
| 1        | น้อยกว่า 25 ปี (จำนวน 16 ซี่) | ไฮรูทเอสพี (8 ซี่) |
|          |                               | เอเอชพลัส (8 ซี่)  |
| 2        | มากกว่า 40 ปี (จำนวน 16 ซี่)  | ไฮรูทเอสพี (8 ซี่) |
|          |                               | เอเอชพลัส (8 ซี่)  |

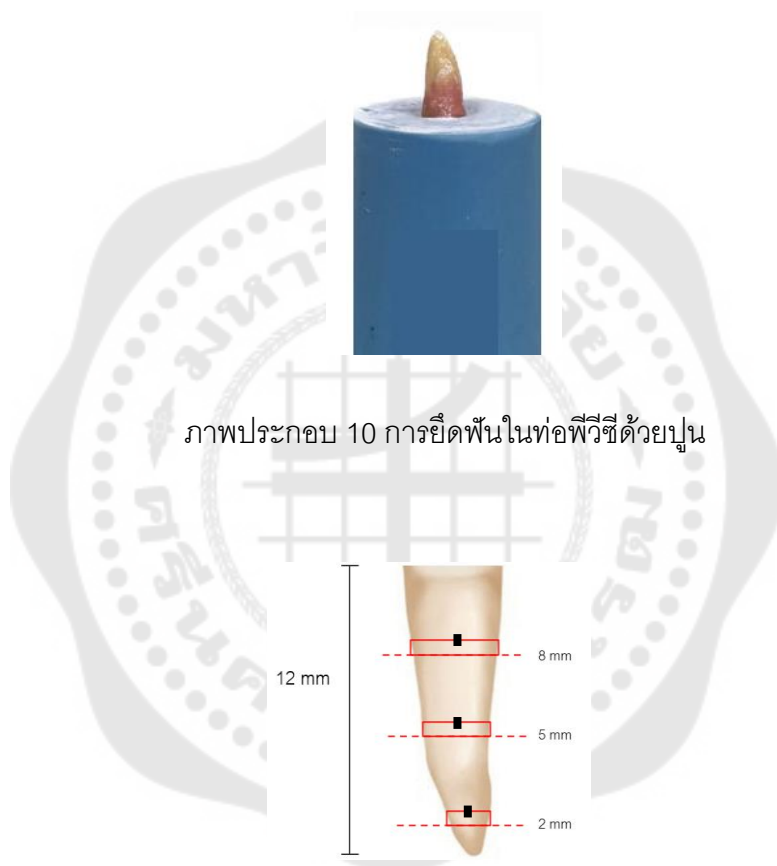
ซีลเลอร์แต่ละชนิดจะถูกผสมด้วยสารเรืองแสงโรดามีน บี (Rhodamine B isothiocyanate fluorescent dye; Loba Chemie, Mumbai, India) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (ซึ่งผงสารเรืองแสงโรดามีน บี 0.0002 มิลลิกรัมต่อซีลเลอร์ 0.2 มิลลิกรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง และทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน) (83) จากนั้นทำการอุดคลองรากฟันโดยใช้เทคนิคซิงเกิลโคน (Single cone technique) ด้วยแท่งกัตตาเปอร์ชาโปรเทเปอร์เน็กซ์ (Protaper Next gutta percha point; Dentsply Sirona, York, PA) ขนาด 40/.06 ร่วมกับซีลเลอร์ตามกลุ่มการทดลองในปริมาณ 0.2 กรัมต่อหนึ่งคลองรากฟัน โดยใช้เลนทูลอสไปรัล (Lentulo spiral) ขนาด 25 นำไฮรูทเอสพี (Innovative Biocreemix, Vancouver, Canada) และเอเอชพลัส (Dentsply DeTrey, Konstanz, Germany) ใส่เข้าไปจนเต็มคลองรากฟัน และเคลือบแท่งกัตตาเปอร์ชาโปรเทเปอร์เน็กซ์ด้วยซีลเลอร์ให้ทั่วก่อนอุดในคลองรากฟัน จากนั้นใช้เครื่องมือทำความร้อน (electrical heat carrier) ตัดกัตตาเปอร์ชาออกจนถึงระดับบนสุดของรากฟัน (coronal end) และถ่ายภาพรังสีในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้น และแนวใกล้กลางใกล้กลาง เพื่อยืนยันการอุดแน่นเต็มคลองรากฟันของวัสดุอุด จากนั้นนำชิ้นฟันไปเก็บที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้ซีลเลอร์แข็งตัว (84)

#### การศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน

เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษาที่ 1 สัปดาห์ นำฟันมายึดในท่อพลาสติกพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สูง 1.5 นิ้ว ด้วยปูนปลาสเตอร์หิน (dental stone type III) โดยให้แกนฟัน (long axis) ตั้งฉากกับหน้าตัดของท่อพีวีซี (ภาพประกอบ 10) จากนั้นทำการตัดรากฟันด้วยเครื่องไอโซเมต (Isomet 1000; Buhler, Lake Bluff, NY) ในแนวตัดขวาง (cross-sectional) ให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2, 5 และ 8 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน โดยกำหนดให้ระยะ 2, 5 และ 8

มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน เป็นขอบล่างของชิ้นตัวอย่าง และทำการระบุขอบด้านบนของชิ้นตัวอย่างด้านแก้มด้วยปากกาเคมี (permanent marker) (ภาพประกอบ 11) โดยในการตัดชิ้นตัวอย่างจะตัดเพื่อความหนาของใบมีดเครื่องตัดและการขัด 1 มิลลิเมตร

ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟันของชิ้นตัวอย่างที่ระดับ 2, 5 และ 8 มิลลิเมตร ถ้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.52, 0.7 และ 0.88 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะถูกคัดออก



ภาพประกอบ 10 การยัดฟันในท่อพีวีซีด้วยปูน

ภาพประกอบ 11 การตัดรากฟันในแนวขวางที่ระดับ 2, 5 และ 8 มิลลิเมตรจากปลายราก และการระบุตำแหน่งขอบบนของชิ้นงาน

ทำการขัดชิ้นฟันให้เรียบด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน (pace technologies รุ่น nano 1000T grinder polisher) (ภาพประกอบ 12) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ร่วมกับกระดาษทรายน้ำความละเอียด 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000 ความละเอียดละ 10 วินาที หลังจากขัดชิ้นตัวอย่างเสร็จ ทำการตรวจสอบความหนาของชิ้นตัวอย่างอีกครั้งด้วยดิจิตัลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ถ้าชิ้นตัวอย่างมีความหนาน้อยกว่า 0.9 มิลลิเมตร จะถูกคัดออก



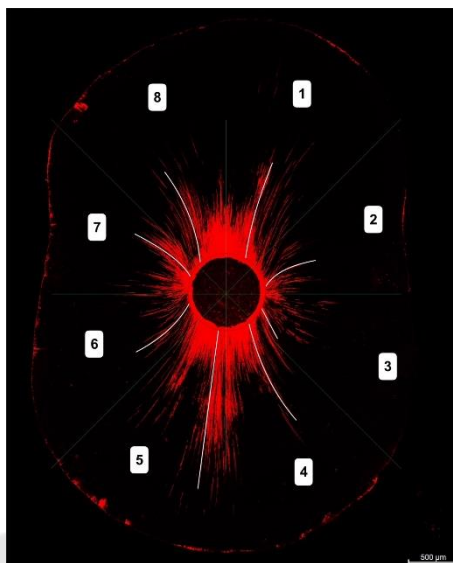
ภาพประกอบ 12 เครื่องขัดชิ้นงาน

จากนั้นจึงนำชิ้นฟันไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการ แสแกน (Olympus รุ่น FLUOVIEW FV10i) กำลังขยาย 10x โดยวางชิ้นตัวอย่างในลักษณะ ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยปากกาเคมีอยู่ด้านบนและหันเข้าตัวผู้ทดสอบ จากนั้นนำ ภาพสามมิติที่ได้ไปประเมินค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุด (หน่วยเป็นไมโครเมตร) ที่ซิลเลอร์ชนิดต่างๆ แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน และประเมินร้อยละความลึกของซิลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อ ฟันตามแนวเส้นรอบวงผ่านโปรแกรมอิมเมจเจ (National Institutes of Health, Bethesda, MD) โดยก่อนการศึกษา ผู้วิจัยทำการทดสอบความน่าเชื่อถือภายในผู้ประเมินด้วยสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient หรือ ICC) โดยการให้ผู้อ่านผล ทำการ หาค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดชิ้นงานเดียวกันจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นวัดซ้ำแบบเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ และนำมาวิเคราะห์ พบว่าความน่าเชื่อถือภายในผู้ประเมินมีความสอดคล้องกันในระดับดี (ICC = 0.89)

#### การประเมินความลึกการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆ

- ค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน (Mean of the maximum sealer penetration depth) ที่ระดับต่างๆ

สร้างเส้นสมมติ 4 เส้น ที่ทำมุม 45 องศาต่อกัน และทำการวัดความลึกมากที่สุดที่ซิล เลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันจำนวน 8 ตำแหน่ง โดยเริ่มวัดความลึกการแทรกซึมของซิลเลอร์ จากผนังคลองรากฟันไปตามแนวยาวของท่อเนื้อฟันจนถึงตำแหน่งที่ซิลเลอร์แทรกซึมไม่ต่อเนื่อง ตำแหน่งละ 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย (ภาพประกอบ 13) (46) จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ย ความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมได้จากผลรวมความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน 8 ตำแหน่ง หารด้วย 8 (ภาพประกอบ 14) บันทึกผลในหน่วยไมโครเมตร



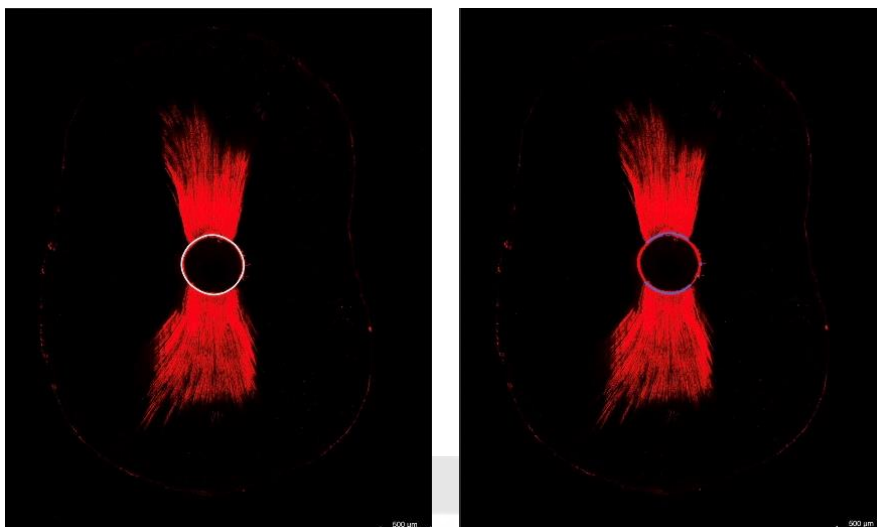
ภาพประกอบ 13 การวัดความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟัน 8 ตำแหน่ง (85)

|                                        |   |                                                                                                                                  |   |
|----------------------------------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| ค่าเฉลี่ยความลึกที่<br>ซีลเลอร์แทรกซึม | = | ความลึกที่ตำแหน่งด้านแก้ม+ด้านแก้มใกล้กลาง+ด้านใกล้กลาง+ด้านลิ้นใกล้กลาง+ด้านลิ้น+ด้านลิ้นใกล้กลาง+ด้านใกล้กลาง+ด้านแก้มใกล้กลาง |   |
|                                        |   |                                                                                                                                  | 8 |

ภาพประกอบ 14 สูตรคำนวณค่าเฉลี่ยความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟัน

- ร้อยละความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามเส้นรอบวง (Circumferential sealer penetration depth) ที่ระดับต่างๆ

ทำการวัดระยะทางที่ซีลเลอร์แทรกซึมไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงหารด้วยความยาวเส้นรอบวงของคลองรากฟันและคูณด้วย 100 (78) (ภาพประกอบ 15 และ 16) บันทึกผลออกมาเป็นร้อยละ



ภาพประกอบ 15 การวัดระยะทางที่ซีลเลอร์แทรกซึมไปในท่อเนื้อพืชมตามแนวเส้นรอบวง (เส้นสีขาว) และการวัดความยาวเส้นรอบวงของคลองรากฟัน (เส้นสีน้ำเงิน) (85)

$$\text{ร้อยละของความลึกซีลเลอร์} = \frac{\text{ระยะทางความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง}}{\text{ความยาวเส้นรอบวงของคลองรากฟัน}} \times 100$$

ภาพประกอบ 16 สูตรคำนวณร้อยละของความลึกซีลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง

### การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

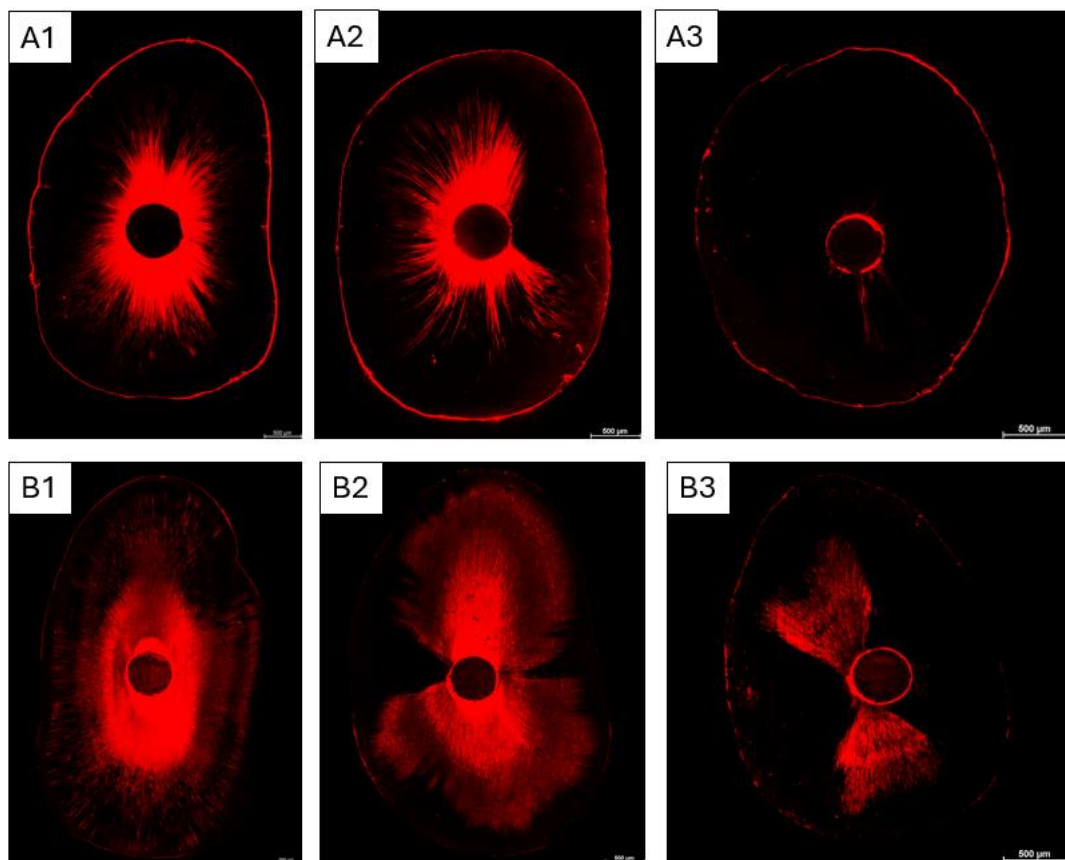
การวิเคราะห์ทางสถิติในงานวิจัยนี้อาศัยโปรแกรม SPSS version 20 (SPSS Inc, Chicago, IL) โดยทำการทดสอบการกระจายของข้อมูลด้วยการทดสอบของโคโมโกรอฟ-สเมอรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) และทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Homogeneity of variance) ด้วยวิธีการของเลวีน (Levene's Test)

ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อพืชมและเปรียบเทียบร้อยละการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อพืชมตามเส้นรอบวงด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลรายคู่ด้วยการทดสอบของทูกีเอสเอสดี (Tukey's HSD test) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ  $P < 0.05$

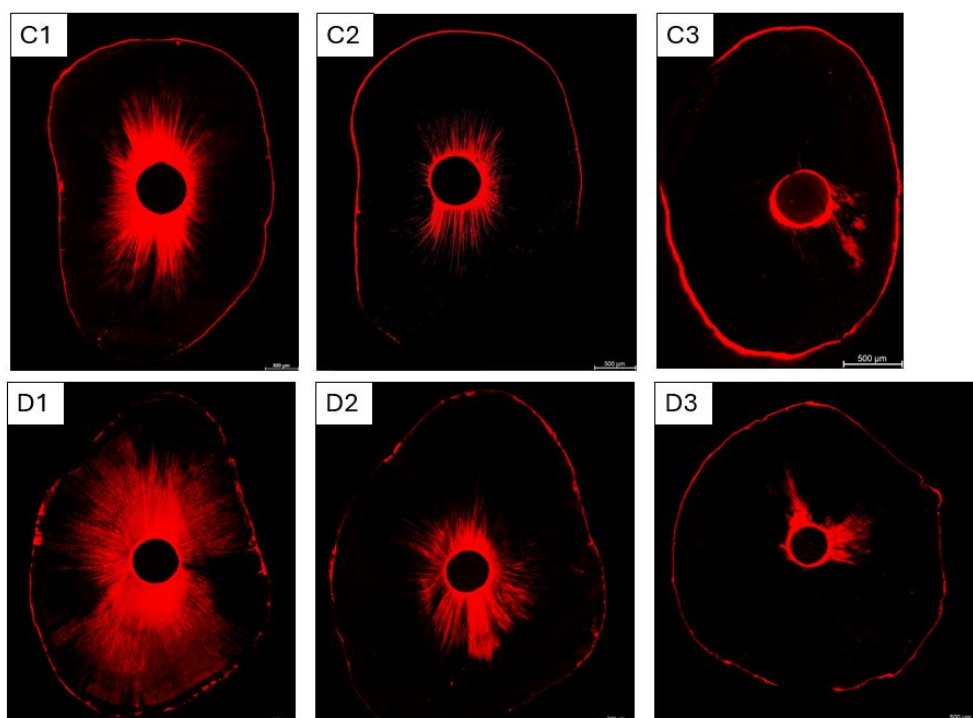
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

เมื่อนำชิ้นฟันทั้ง 4 กลุ่มการศึกษาไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกนได้ผลดังภาพประกอบ 17 และ 18



ภาพประกอบ 17 การแทรกซึมของเฮเอสพลัส (A) และไฮรูกเฮสพี (B) ที่ระดับส่วนต้น (A1, B1) ส่วนกลาง (A2, B2) และส่วนปลายของรากฟัน (A3, B3) ในกลุ่มฟันอายุน้อยกว่า 25 ปี



ภาพประกอบ 18 การแทรกซึมของเอเอสพลัส (C) และไอรูทเอสพี (D) ที่ระดับส่วนต้น (C1, D1) ส่วนกลาง (C2, D2) และส่วนปลายของรากฟัน (C3, D3) ในกลุ่มฟันอายุมากกว่า 40 ปี

### การประเมินค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆ

เมื่อตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลทั้ง 4 กลุ่มด้วยสถิติโคโมโกรอฟ-สเมอรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Homogeneity of variance) ด้วยวิธีการของเลวิน (Levene's Test) พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และทุกกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) พบว่าอายุของฟันมีผลต่อระยะทางที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับต่างๆของรากฟันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) จึงได้ปฏิเสธสมมติฐานหลักข้อที่ 1 คือ อายุไม่มีผลต่อการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลรายคู่ด้วยการทดสอบของทูกีเอสเอสดี (Tukey's HSD test) พบว่าไม่ว่าจะใช้ซิลเลอร์ชนิดไหน กลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี มีการ

แทรกซึมของซีลเลอร์ทั้งสองชนิดเป็นระยะทางมากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี ดังตารางที่ 3 โดยเมื่อใช้ไอรูทเอสพีซีลเลอร์ ในกลุ่มอายุต่างกัน ให้ผลการแทรกซึมของซีลเลอร์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะที่ระดับส่วนกลางและส่วนปลายของรากฟันเท่านั้น ในขณะที่เอเอสพลัสซีลเลอร์ ให้ผลการแทรกซึมของซีลเลอร์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งสามระดับของรากฟัน

ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน

| กลุ่ม   |            | ค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน<br>(ไมโครเมตร, ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) |                                     |                                    |
|---------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|         |            | C                                                                                                                   | M                                   | A                                  |
| < 25 ปี | เอเอสพลัส  | 1072.39 $\pm$ 260.32 <sup>A,a</sup>                                                                                 | 677.94 $\pm$ 168.73 <sup>A,b</sup>  | 208.72 $\pm$ 49.04 <sup>A,c</sup>  |
|         | ไอรูทเอสพี | 1493.10 $\pm$ 279.41 <sup>B,a</sup>                                                                                 | 1153.48 $\pm$ 236.61 <sup>B,b</sup> | 527.17 $\pm$ 122.95 <sup>B,c</sup> |
| > 40 ปี | เอเอสพลัส  | 782.05 $\pm$ 154.82 <sup>C,a</sup>                                                                                  | 437.33 $\pm$ 107.43 <sup>C,b</sup>  | 62.27 $\pm$ 14.82 <sup>C,c</sup>   |
|         | ไอรูทเอสพี | 1351.30 $\pm$ 299.49 <sup>B,a</sup>                                                                                 | 741.10 $\pm$ 109.40 <sup>D,b</sup>  | 87.70 $\pm$ 20.92 <sup>C,c</sup>   |

อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

และทั้งกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี ไอรูทเอสพีซีลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันเป็นระยะทางมากกว่าเอเอสพลัสซีลเลอร์โดยชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน ที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี ที่ระดับปลายรากฟัน ไอรูทเอสพีซีลเลอร์และเอเอสพลัสซีลเลอร์มีระยะทางการแทรกซึมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลักข้อที่ 2 คือ ที่ช่วงอายุเดียวกัน ชนิดของซีลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน ไม่แตกต่างกัน

### การประเมินร้อยละความลึกของซิลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงที่ระดับต่างๆ

จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของร้อยละความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมในแนวเส้นรอบวงด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่าอายุมีผลต่อร้อยละความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงทุกระดับของรากฟัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) จึงได้ปฏิเสธสมมติฐานหลักข้อที่ 1 คือ อายุไม่มีผลต่อการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน

ทำการทดสอบความแตกต่างของข้อมูลรายคู่ด้วยการทดสอบของทูเคซเอสดี (ตารางที่ 4) พบว่าเมื่อใช้ซิลเลอร์ชนิดเดียวกัน ในกลุ่มอายุของฟันที่แตกต่างกัน ให้ผลการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน โดยในกลุ่มอายุของฟันที่น้อยกว่า 25 ปี มีการแทรกซึมของไฮดรอกซีฟอสเฟตและไฮดรอกซีฟอสเฟตซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันมากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตาราง 4 ร้อยละของความลึกซิลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง

| กลุ่ม   |                        | ร้อยละของความลึกซิลเลอร์ที่แทรกซึมในแนวเส้นรอบวง<br>(ร้อยละ, ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) |                                  |                                  |
|---------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|         |                        | C                                                                                                  | M                                | A                                |
| < 25 ปี | ไฮดรอกซีฟอสเฟต         | 98.28 $\pm$ 2.83 <sup>A,a</sup>                                                                    | 86.98 $\pm$ 7.80 <sup>A,a</sup>  | 40.73 $\pm$ 17.02 <sup>A,b</sup> |
|         | ไฮดรอกซีฟอสเฟตซิลเลอร์ | 98.75 $\pm$ 2.74 <sup>A,a</sup>                                                                    | 88.08 $\pm$ 9.13 <sup>A,a</sup>  | 66.89 $\pm$ 17.87 <sup>B,b</sup> |
| > 40 ปี | ไฮดรอกซีฟอสเฟต         | 89.61 $\pm$ 13.12 <sup>B,a</sup>                                                                   | 70.80 $\pm$ 16.36 <sup>B,b</sup> | 21.81 $\pm$ 8.45 <sup>C,c</sup>  |
|         | ไฮดรอกซีฟอสเฟตซิลเลอร์ | 89.53 $\pm$ 9.95 <sup>B,a</sup>                                                                    | 74.08 $\pm$ 15.70 <sup>B,b</sup> | 26.17 $\pm$ 9.30 <sup>C,c</sup>  |

อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

และในกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี ชนิดของซีลเลอร์มีผลต่อการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับส่วนปลายของรากฟัน โดยทั้งสองกลุ่มอายุ ไอรูทเอสพีซีลเลอร์มีร้อยละความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงมากกว่าเอนเอสพลัสซีลเลอร์ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลักข้อที่ 2 คือ ช่วงอายุเดียวกัน ซีลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลายของรากฟัน ไม่แตกต่างกัน



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

อายุของฟันและชนิดของซิลเลอร์มีผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน และมีผลต่อร้อยละความลึกของซิลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันในแนวเส้นรอบวง โดยในกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปีพบการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันมากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี และไอฐุทเอสพีซิลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีกว่าเอสพลัสซิลเลอร์

#### อภิปรายผลการวิจัย

การประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันมีความสำคัญทางคลินิก เนื่องจากเป็นตัวแทนในการประเมินความแนบสนิทระหว่างวัสดุอุดคลองรากฟันกับเนื้อฟัน โดยการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันช่วยเพิ่มการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาค และเป็นการสร้างด่านป้องกันทางกายภาพ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของแบคทีเรียและการติดเชื้อซ้ำในระบบคลองรากฟัน (2) นอกจากนี้การแทรกซึมของซิลเลอร์จะช่วยฝังกลบแบคทีเรียไว้ภายในท่อเนื้อฟันเป็นการช่วยส่งเสริมให้เกิดการหายของรอยโรครอบปลายรากฟัน (86)

การศึกษานี้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลในการประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์ เนื่องจากสามารถตรวจจับการแทรกซึมของซิลเลอร์ภายในท่อเนื้อฟันได้ด้วยสารเรืองแสง โดยภาพที่ได้มีความละเอียดสูง มีภาพรบกวนน้อย (artifact) และมีความเปรียบต่างสูงทำให้มองเห็นซิลเลอร์ภายในท่อเนื้อฟันได้ชัดเจน รวมถึงสามารถตรวจสอบซิลเลอร์ได้หลายระดับชั้นโดยไม่จำเป็นต้องเตรียมชิ้นตัวอย่างก่อน และสามารถวัดผลซ้ำได้หลายครั้ง (77, 87) ซึ่งการศึกษานี้ทำการวัดการแทรกซึมของซิลเลอร์ลงจากผิวตัวอย่าง 20-30 ไมโครเมตร (88) เพื่อหลีกเลี่ยงภาพรบกวนและชั้นสเมียร์ที่อาจเกิดบนผิวชิ้นตัวอย่าง และทำการช้อนชั้นความลึกเหล่านั้นไว้ ทำให้ได้ภาพสามมิติของเส้นทางที่ซิลเลอร์แทรกซึมไปภายในท่อเนื้อฟัน

การประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์ในการศึกษานี้เลือกใช้โรดามีนบีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 เป็นสารเรืองแสง เนื่องจากโรดามีนบีมีคุณสมบัติเป็นฟลูออโรฟอร์ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้สามารถผสมเข้ากับซิลเลอร์ได้ง่าย ไม่เป็นอุปสรรคในการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน และมีประสิทธิภาพเพียงพอในการสร้างภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลที่มีคุณภาพ (89) ไม่ทำให้เนื้อและคุณสมบัติของซิลเลอร์เปลี่ยนแปลงไป (76) ซึ่ง Patel และคณะ (90) ทำการศึกษา

นำร่อง (pilot study) เพื่อประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์เมื่อผสมและไม่ผสมโรดามีนบี พบว่าการผสมและไม่ผสมโรดามีนบีเข้ากับซิลเลอร์ให้ผลการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าท่อเนื้อฟันไม่แตกต่างกัน

จากการศึกษาของ Tedesco และคณะ (83) ทำการเปรียบเทียบผลของการผสมโรดามีนบีแบบแห้งและแบบเจือจางด้วยสารละลายเข้ากับซิลเลอร์ พบว่าการผสมโรดามีนบีแบบแห้งเข้าไปในเอสพลัสซิลเลอร์และเอ็มทีเอฟิลลาเพ็กซ์ไม่ทำให้คุณสมบัติด้านการไหลแผ่ (Flow) ของซิลเลอร์เปลี่ยนแปลง ซึ่งคุณสมบัติการไหลแผ่มีผลโดยตรงต่อการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน (91) ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้โรดามีนบีแบบแห้งในการผสมเข้ากับซิลเลอร์

อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Jeong และคณะ ในปี 2017 (46) และการศึกษาของ Donnermeyer และคณะ ในปี 2021 (92) พบว่าโรดามีนบีมีคุณสมบัติในการจับกับความชื้นในท่อเนื้อฟันมากกว่าการจับกับแคลเซียมในแคลเซียมซิติเกตเบสซิลเลอร์ ส่งผลให้โรดามีนบีอาจแยกตัวออกจากซิลเลอร์และไปจับกับความชื้นในท่อเนื้อฟันแทน ทำให้รังสีเรืองแสงที่ถูกปล่อยออกมาไม่สัมพันธ์กับตำแหน่งจริงของซิลเลอร์ที่แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟัน ส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมมากกว่าความเป็นจริงหรือเกิดเป็นผลบวกปลอม (false-positive) (93) โดยการศึกษาของ Jeong และคณะ แนะนำให้ใช้สารเรืองแสงชนิดอื่นในการประเมินการแทรกซึมของซิลเลอร์แทน เช่น ฟลูออทรี (Fluo-3) เนื่องจากในสภาวะปกติฟลูออทรีไม่มีการเรืองแสง แต่เมื่อไปจับกับแคลเซียมจะเกิดการเรืองแสงเพิ่มขึ้นได้ถึง 100 เท่า รวมถึงฟลูออทรีไม่สามารถจับกับแคลเซียมไอออนในโครงสร้างฟันได้ จึงสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการแทรกซึมของแคลเซียมซิติเกตเบสซิลเลอร์ที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบได้ (46) แต่อย่างไรก็ตามการนำฟลูออทรีมาเป็นทางเลือกทดแทนการใช้โรดามีนบียังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกในอนาคต (94) และการศึกษาของ Furtado และคณะ (89) พบว่าฟลูออทรีไม่มีผลต่อการประเมินการแทรกซึมของเอสพลัสซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน นอกจากนี้จากการศึกษานำร่องก่อนการศึกษาจริง พบว่าการเตรียมฟันของการศึกษานี้ในท่อเนื้อฟันไม่ได้มีความชื้นมากพอให้โรดามีนบีแทรกซึมไปได้ไกลกว่าซิลเลอร์

ในปัจจุบันการวัดการแทรกซึมของซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันมักใช้วิธีดูค่าเฉลี่ยความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันจากการวัดตำแหน่งที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปมากที่สุด 4 ตำแหน่งในทิศทางใกล้แก้ม ใกล้ลิ้น ใกล้กลาง และไกลกลางของรากฟัน นำมาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณออกมาเป็นระยะทางในหน่วยไมโครเมตร (34, 46) อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เลือกใช้วิธีวัดค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันทั้งหมด 8 ตำแหน่ง เพื่อเพิ่มความ

แม่นยำของการวัด เนื่องจากการศึกษาของ Russell และคณะ (95, 96) พบว่าในฟันที่เกิดการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างเป็นรูปปีกผีเสื้อ (butterfly effect) มีการสร้างเนื้อฟันเพิ่มขึ้นในท่อเนื้อฟันฝั่งใกล้กลางและไกลกลางของคลองรากฟัน ทำให้การแทรกซึมในแนวนั้นลดลง ส่งผลให้ความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันแนวใกล้แก้มใกล้กันมากกว่าแนวใกล้กลางไกลกลางอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในฟันที่เกิดการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างเป็นรูปปีกผีเสื้อ จึงควรวัดการแทรกซึมของซีลเลอร์มากกว่า 4 ตำแหน่งด้วยระยะห่างที่เท่ากันเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการวัดมากยิ่งขึ้น และในฟันกรามน้อยซึ่งเป็นฟันที่ถูกใช้ในการศึกษานี้มีโอกาสพบการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างเป็นรูปปีกผีเสื้อสูงกว่าฟันหน้า (96)

อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแรก การศึกษานี้ได้วัดความลึกของซีลเลอร์ที่แทรกซึมตามแนวเส้นรอบวงออกมาเป็นร้อยละ เพื่อให้เห็นแง่มุมของการแทรกซึมและการกระจายตัวของซีลเลอร์รอบคลองรากฟัน ซึ่งทำหน้าที่บ่งบอกความแนบสนิทของวัสดุอุดคลองรากฟัน โดยไม่คำนึงถึงความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมได้ (4)

การศึกษานี้เลือกกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี เพื่อเป็นตัวแทนของกลุ่มอายุของฟันก่อนและหลังเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้าง เนื่องจากการศึกษาของ Paque และคณะ (12) พบว่าหลังจากอายุ 30 ปีเป็นต้นไป โครงสร้างของเนื้อฟันจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จากการสร้างเนื้อฟันทุติยภูมิและการสะสมแร่ธาตุภายในเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเรียกเนื้อฟันที่สร้างขึ้นใหม่นี้ว่าเนื้อฟันแข็งกระด้าง ส่งผลให้ท่อเนื้อฟันมีขนาดเล็กลง และการซึมผ่านได้ของเนื้อฟันก็ลดลงตามไปด้วย (67) โดยการศึกษาของ Azaz และคณะ (97) และการศึกษาของ Singhal และคณะ (98) พบว่าการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างจะเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่พบในฟันทุกซี่

เอสเอสพลัสได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และมักถูกใช้เป็นซีลเลอร์มาตรฐานที่ใช้ทดสอบกับซีลเลอร์ตัวอื่นๆในงานวิจัยทางห้องปฏิบัติการและงานวิจัยทางคลินิก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี มีความสามารถในการละลายตัวต่ำ การไหลแผ่สูง และเกิดการหดตัวจากพอลิเมอร์เซชันต่ำ (99) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ทำให้เริ่มมีการนำมาใช้ในคลินิกอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) กับเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactivity) มีฤทธิ์ต้านจุลชีพ และสามารถกระตุ้นให้เกิดโครงสร้างคล้ายไฮดรอกซีอะพาไทต์ ส่งผลให้วัสดุมีความแนบสนิทกับเนื้อฟันเพิ่มมากขึ้น (94) โดยไฮรูกเอสพีหรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์จัดอยู่ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน (94)

จากการศึกษานี้พบว่าไฮรูทเอสพีซีลเลอร์และเอเอสพลัสซีลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าท่อนเนื้อฟันในกลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี ได้น้อยกว่ากลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี โดยมีค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับส่วนกลางและส่วนปลายของรากฟัน เนื่องจากการเกิดการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างและสะสมแร่ธาตุภายในท่อนเนื้อฟัน ทำให้จำนวนท่อนเนื้อฟันลดลง เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนเนื้อฟันลดลง และลดการซึมผ่านหรือขัดขวางการซึมผ่านได้ภายในท่อนเนื้อฟัน (19) สอดคล้องกับการศึกษาของ Thaler และคณะ (13) ที่ศึกษาการแทรกซึมของสีย้อมเข้าไปในท่อนเนื้อฟันที่กลุ่มอายุต่างๆ พบว่าระยะทางที่สีย้อมแทรกซึมได้ลดลงตามกลุ่มอายุของฟันที่เพิ่มมากขึ้น และอายุมีผลต่อการแทรกซึมของสีย้อมอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้กลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี มีร้อยละความลึกการแทรกซึมของไฮรูทเอสพีและเอเอสพลัสซีลเลอร์ตามแนวเส้นรอบวงน้อยกว่ากลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับส่วนต้น ส่วนกลางและส่วนปลายของรากฟัน เนื่องจากการศึกษาของ Vasiliadis และคณะ (66) พบว่าจะเริ่มมีการสร้างเนื้อฟันแข็งกระด้างที่บริเวณด้านใกล้กลางและด้านไกลกลางของรากฟันก่อน ทำให้มีลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อ และเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นเนื้อฟันแข็งกระด้างบริเวณด้านใกล้กลางและไกลกลางของคลองรากฟันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปีกผีเสื้อมีขนาดใหญ่ขึ้น (66) การแทรกซึมของซีลเลอร์บริเวณที่เกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างรูปปีกผีเสื้อก็จะลดลงตาม เมื่อทำการวัดตามแนวเส้นรอบวงจึงได้ค่าที่น้อยกว่ากลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี

จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่ระดับส่วนต้นของรากฟัน อายุไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ไฮรูทเอสพีซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อนเนื้อฟันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อายุมีผลต่อร้อยละความลึกการแทรกซึมของไฮรูทเอสพีตามแนวเส้นรอบวง เนื่องมาจากระดับส่วนต้นของรากฟันเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างน้อยกว่าระดับอื่นๆ ของรากฟัน (66) และเมื่อวัดค่าเฉลี่ยความลึกมากที่สุดที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อนเนื้อฟันโดยการเลือกระยะความลึกมากที่สุดจากพื้นที่ 8 ตำแหน่ง ทำให้บางพื้นที่ที่มีการเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างน้อยยังคงพบการแทรกซึมของซีลเลอร์อยู่ ส่งผลให้เมื่อทำการวัดผลความลึกของการแทรกซึมของซีลเลอร์ในกลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี และมากกว่า 40 ปี จึงให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่เมื่อทำการวัดร้อยละความลึกของการแทรกซึมตามแนวเส้นรอบวง แม้จะเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างน้อย แต่พื้นที่นั้นยังคงถูกนำมาคำนวณ ผลการแทรกซึมที่วัดได้จากทั้งสองกลุ่มอายุของฟันจึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามที่ระดับส่วนต้นของคลองรากฟัน ไม่ว่าทำการวัดด้วยวิธีใด กลุ่มอายุของฟันน้อยกว่า 25 ปี ยังคงพบการแทรกซึมที่มากกว่ากลุ่มอายุของฟันมากกว่า 40 ปี

จากผลการศึกษาพบว่าไฮดรอกซีฟีซิลเลอร์มีการแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันมากกว่าเอเอสพลัสฟีซิลเลอร์ในทุกกลุ่มอายุของฟัน และทุกระดับของรากฟัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang และคณะ (8) ที่พบว่าไฮดรอกซีฟีแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีมากกว่าเอเอสพลัสอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุดคลองรากฟันด้วยวิธีซิงเกิลโคนและวิธีวอร์มเวทิกเคิล และการศึกษาของ Muedra และคณะ (100) ทำการประเมินการแทรกซึมของฟีซิลเลอร์ในฟันแท้รากเดียว อายุของฟัน 50-70 ปี พบว่าเอนโดซีควอนปีซีฟีซิลเลอร์มีความลึกของการแทรกซึมและร้อยละการแทรกซึมของฟีซิลเลอร์ตามแนวเส้นรอบวงมากกว่าเอเอสพลัส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกลุ่มฟันอายุมาก เอนโดซีควอนปีซีฟีซิลเลอร์ยังคงมีการแทรกซึมที่ดีกว่า เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของไฮดรอกซีฟีซิลเลอร์ที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (101) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของเอเอสพลัส (1.5-8 ไมโครเมตร) (34) ทำให้สามารถแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่มีขนาด 2-3 ไมโครเมตร (102) ได้ดีกว่า โดย McMichael และคณะ (4) พบว่าเอนโดซีควอนปีซีฟีซิลเลอร์สามารถแทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ถึง 2 มิลลิเมตร เมื่ออุดด้วยเทคนิคซิงเกิลโคน นอกจากนี้คุณสมบัติด้านความหนืดและการไหลแผ่ของฟีซิลเลอร์ยังเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันด้วย โดย Zhou และคณะ (54) พบว่าไฮดรอกซีฟีมีการไหลแผ่ดีกว่าเอเอสพลัส จึงอาจทำให้แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระดับของรากฟันพบว่า การแทรกซึมของฟีซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันลดลงในทิศทางจากส่วนต้นไปทางส่วนปลายของรากฟัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า (4, 80, 103) เนื่องมาจากลักษณะทางกายวิภาคของรากฟันที่มีจำนวนท่อเนื้อฟันลดลง และขนาดของท่อเนื้อฟันลดลงไปในทิศทางปลายรากฟัน รวมถึงบริเวณปลายรากฟันมีกายวิภาคที่ซับซ้อนกว่า และเกิดเนื้อฟันแข็งกระด้างมากกว่าส่วนอื่นๆ (66) ทำให้เกิดการขัดขวางการแทรกซึมของฟีซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน นอกจากนี้การทำความสะอาดคลองรากฟันบริเวณส่วนปลายรากฟันด้วยน้ำยาล้างคลองรากฟันหรือเครื่องมือทำได้ยากกว่า และในขั้นตอนล้างคลองรากฟันอาจเกิดฟองอากาศบริเวณปลายรากฟัน (vapor lock effect) ทำให้น้ำยาล้างคลองรากฟันไม่สามารถไหลลงไปยังส่วนปลายของรากฟันได้ (104) ส่งผลให้การกำจัดชั้นสเมียร์ในบริเวณนี้ลดลง (88) จึงเกิดการแทรกซึมได้น้อยกว่าระดับอื่นๆ (34)

จากที่กล่าวมาจึงสรุปได้ว่า อายุของฟัน และชนิดของฟีซิลเลอร์ มีผลต่อการแทรกซึมของฟีซิลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน โดยระยะทางที่ฟีซิลเลอร์แทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันจะลดลงเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้น และแคลเซียมซิติเกตเบสฟีซิลเลอร์สามารถแทรกซึมเข้าท่อเนื้อฟันได้ดีกว่าไฮดรอกซีฟี

### ข้อเสนอแนะ

1. ในปัจจุบันยังไม่มีผลการประเมินผลของอายุต่อการแทรกซึมของแคลเซียมซิติลเกตเบสซีลเลอร์เข้าท่อนื้อฟัน จึงแนะนำให้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผล โดยอาจเพิ่มจำนวนกลุ่มศึกษาของอายุของฟัน

2. ในการศึกษาี้เลือกใช้โอรูทเอสพีซีลเลอร์เป็นตัวแทนของซีลเลอร์ในกลุ่มแคลเซียมซิติลเกตเบสซีลเลอร์ อย่างไรก็ตามยังมีซีลเลอร์อื่นๆในกลุ่มนี้อีก เช่น เซราซีล เอ็นโดซีลเอ็มทีเอ และไบโอซี เป็นต้น ดังนั้นในอนาคตอาจทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการแทรกซึมของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิติลเกตเบสซีลเลอร์หลายชนิดในฟันที่มีอายุมาก

3. การวัดการแทรกซึมของซีลเลอร์เป็นเพียงวิธีหนึ่งในการประเมินความแนบสนิทระหว่างซีลเลอร์และเนื้อฟัน ซึ่งการใช้งานจริงทางคลินิกต้องประเมินคุณสมบัติอื่นของซีลเลอร์เพิ่มเติม เช่น ความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อปลายรากฟัน การละลายตัว และการไหลแผ่ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้ซีลเลอร์ในผู้ป่วยกลุ่มอายุที่แตกต่างกัน

## บรรณานุกรม

1. Mamootil K, Messer HH. Penetration of dentinal tubules by endodontic sealer cements in extracted teeth and in vivo. *Int Endod J*. 2007;40(11):873-81.
2. Kokkas AB, Boutsoukis A, Vassiliadis LP, Stavrianos CK. The influence of the smear layer on dentinal tubule penetration depth by three different root canal sealers: an in vitro study. *J Endod*. 2004;30(2):100-2.
3. Ørstavik D. Materials used for root canal obturation: Technical, biological and clinical testing. *Endodontic Topics*. 2006;12:25-38.
4. McMichael GE, Primus CM, Opperman LA. Dentinal Tubule Penetration of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod*. 2016;42(4):632-6.
5. Candeiro GT, Correia FC, Duarte MA, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *J Endod*. 2012;38(6):842-5.
6. Mendes AT, Silva PBD, Só BB, Hashizume LN, Vivan RR, Rosa RAD, et al. Evaluation of Physicochemical Properties of New Calcium Silicate-Based Sealer. *Braz Dent J*. 2018;29(6):536-40.
7. Sigadam A, R K, Sajjan G, Kanumuri MV, M S, D P. Comparative evaluation of sealer penetration depth into radicular dentinal tubules using confocal scanning microscope: an in vitro study. *International Journal of Dental Materials*. 2020;02:69-74.
8. Wang Y, Liu S, Dong Y. In vitro study of dentinal tubule penetration and filling quality of bioceramic sealer. *PLoS One*. 2018;13(2):e0192248.
9. Al-Haddad A, Che Ab Aziz ZA. Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. *Int J Biomater*. 2016;2016:9753210.
10. Stavrianos C, Stavrianou I, Kafas P, Vasiliadis L, Diedrich MJ. Assessment of morphological changes on the pulpal wall of root dentine during growth. *Research Journal of Medical Sciences*. 2008.
11. Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML, Sinai IH. A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. *J Endod*.

1984;10(8):359-63.

12. Paqué F, Luder HU, Sener B, Zehnder M. Tubular sclerosis rather than the smear layer impedes dye penetration into the dentine of endodontically instrumented root canals. *Int Endod J.* 2006;39(1):18-25.

13. Thaler A, Ebert J, Petschelt A, Pelka M. Influence of tooth age and root section on root dentine dye penetration. *Int Endod J.* 2008;41(12):1115-22.

14. Anantanasuwong D. Population Ageing in Thailand: Critical Issues in the Twenty-First Century. In: Narot P, Kiettikunwong N, editors. *Education for the Elderly in the Asia Pacific*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2021. p. 31-56.

15. Dammaschke T, Steven D, Kaup M, Ott KH. Long-term survival of root-canal-treated teeth: a retrospective study over 10 years. *J Endod.* 2003;29(10):638-43.

16. Seltzer S, Bender IB, Turkenkopf S. FACTORS AFFECTING SUCCESSFUL REPAIR AFTER ROOT CANAL THERAPY. *J Am Dent Assoc.* 1963;67:651-62.

17. Imura N, Pinheiro ET, Gomes BP, Zaia AA, Ferraz CC, Souza-Filho FJ. The outcome of endodontic treatment: a retrospective study of 2000 cases performed by a specialist. *J Endod.* 2007;33(11):1278-82.

18. Caplan DJ, Weintraub JA. Factors related to loss of root canal filled teeth. *Journal of public health dentistry.* 1997;57 1:31-9.

19. Solomonov M, Kim HC, Hadad A, Levy DH, Ben Itzhak J, Levinson O, et al. Age-dependent root canal instrumentation techniques: a comprehensive narrative review. *Restor Dent Endod.* 2020;45(2):e21.

20. Eldarrat AH, High AS, Kale GM. Age-related changes in ac-impedance spectroscopy studies of normal human dentine: further investigations. *J Mater Sci Mater Med.* 2010;21(1):45-51.

21. Schmidt S, Schäfer E, Bürklein S, Rohrbach A, Donnermeyer D. Minimal Dentinal Tubule Penetration of Endodontic Sealers in Warm Vertical Compaction by Direct Detection via SEM Analysis. *J Clin Med.* 2021;10(19).

22. Bolles JA, He J, Svoboda KKH, Schneiderman E, Glickman GN. Comparison of Vibringe, EndoActivator, and needle irrigation on sealer penetration in extracted human

teeth. *Journal of endodontics*. 2013;39(5):708-11.

23. De-Deus G, Reis C, Di Giorgi K, Brandão MC, Audi C, Fidel RA. Interfacial adaptation of the Epiphany self-adhesive sealer to root dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2011;111(3):381-6.
24. Kaur A, Shah N, Logani A, Mishra N. Biotoxicity of commonly used root canal sealers: A meta-analysis. *J Conserv Dent*. 2015;18(2):83-8.
25. Craveiro MA, Fontana CE, de Martin AS, Bueno CE. Influence of coronal restoration and root canal filling quality on periapical status: clinical and radiographic evaluation. *J Endod*. 2015;41(6):836-40.
26. Al-Haddad A, Che Ab Aziz ZA. Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. *International Journal of Biomaterials*. 2016;2016:9753210.
27. Garrido AD, Lia RC, França SC, da Silva JF, Astolfi-Filho S, Sousa-Neto MD. Laboratory evaluation of the physicochemical properties of a new root canal sealer based on *Copaifera multijuga* oil-resin. *Int Endod J*. 2010;43(4):283-91.
28. Lee JK, Kwak SW, Ha JH, Lee W, Kim HC. Physicochemical Properties of Epoxy Resin-Based and Bioceramic-Based Root Canal Sealers. *Bioinorg Chem Appl*. 2017;2017:2582849.
29. Camargo RV, Silva-Sousa YTC, Rosa R, Mazzi-Chaves JF, Lopes FC, Steier L, et al. Evaluation of the physicochemical properties of silicone- and epoxy resin-based root canal sealers. *Braz Oral Res*. 2017;31:e72.
30. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R. Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer. *J Endod*. 2007;33(1):31-3.
31. Lyu W-J, Bai W, Wang X-Y, Liang Y-H. Physicochemical properties of a novel bioceramic silicone-based root canal sealer. *Journal of Dental Sciences*. 2021.
32. Macedo LMD, Silva-Sousa Y, Silva S, Baratto SSP, Baratto-Filho F, Abi Rached-Júnior FJ. Influence of Root Canal Filling Techniques on Sealer Penetration and Bond Strength to Dentin. *Braz Dent J*. 2017;28(3):380-4.
33. Singh CV, Rao SA, Chandrashekar V. An in vitro comparison of penetration depth

of two root canal sealers: An SEM study. *J Conserv Dent*. 2012;15(3):261-4.

34. El Hachem R, Khalil I, Le Brun G, Pellen F, Le Jeune B, Daou M, et al. Dentinal tubule penetration of AH Plus, BC Sealer and a novel tricalcium silicate sealer: a confocal laser scanning microscopy study. *Clin Oral Investig*. 2019;23(4):1871-6.

35. Altan H, Tosun G. The setting mechanism of mineral trioxide aggregate. *J Istanbul Univ Fac Dent*. 2016;50(1):65-72.

36. Chang SW. Chemical characteristics of mineral trioxide aggregate and its hydration reaction. *Restor Dent Endod*. 2012;37(4):188-93.

37. Zhang W, Li Z, Peng B. Assessment of a new root canal sealer's apical sealing ability. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009;107(6):e79-82.

38. Han L, Okiji T. Uptake of calcium and silicon released from calcium silicate-based endodontic materials into root canal dentine. *Int Endod J*. 2011;44(12):1081-7.

39. Asawaworarit W, Yachor P, Kijsamanmith K, Vongsavan N. Comparison of the Apical Sealing Ability of Calcium Silicate-Based Sealer and Resin-Based Sealer Using the Fluid-Filtration Technique. *Med Princ Pract*. 2016;25(6):561-5.

40. Donnermeyer D, Bürklein S, Dammaschke T, Schäfer E. Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology*. 2019;107(4):421-36.

41. Reszka P, Nowicka A, Dura W, Marek E, Lipski M. SEM and EDS study of TotalFill BC Sealer and GuttaFlow Bioseal root canal sealers. *Dent Med Probl*. 2019;56(2):167-72.

42. Garberoglio R, Brännström M. Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. *Arch Oral Biol*. 1976;21(6):355-62.

43. Lim M, Jung C, Shin DH, Cho YB, Song M. Calcium silicate-based root canal sealers: a literature review. *Restor Dent Endod*. 2020;45(3):e35.

44. Drukteinis S, Camilleri J. *Bioceramic Materials in Clinical Endodontics* 2020.

45. Trope M, Bunes A, Debelian G. Root filling materials and techniques: Bioceramics a new hope? *Endodontic Topics*. 2015;32:86-96.

46. Jeong JW, DeGraft-Johnson A, Dorn SO, Di Fiore PM. Dentinal Tubule Penetration of a Calcium Silicate-based Root Canal Sealer with Different Obturation Methods. *J Endod*. 2017;43(4):633-7.

47. Lyu W-J, Bai W, Wang X-Y, Liang Y-H. Physicochemical properties of a novel bioceramic silicone-based root canal sealer. *Journal of dental sciences*. 2022;17(2):831-5.
48. Grossman LI. Physical properties of root canal cements. *J Endod*. 1976;2(6):166-75.
49. Marissa C, Usman M, Suprastiwi E, Erdiani A, Meidyawati R. COMPARISON OF DENTINAL TUBULAR PENETRATION OF THREE BIOCERAMIC SEALERS. *International Journal of Applied Pharmaceutics*. 2020:23-6.
50. Caceres C, Larrain MR, Monsalve M, Peña Bengoa F. Dentinal Tubule Penetration and Adaptation of Bio-C Sealer and AH-Plus: A Comparative SEM Evaluation. *Eur Endod J*. 2021;6(2):216-20.
51. Silva E, Ferreira CM, Pinto KP, Barbosa AFA, Colaço MV, Sassone LM. Influence of variations in the environmental pH on the solubility and water sorption of a calcium silicate-based root canal sealer. *Int Endod J*. 2021;54(8):1394-402.
52. Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, Rached-Júnior FA, De-Deus G, Miranda CE, et al. 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.
53. Zordan-Bronzel CL, Esteves Torres FF, Tanomaru-Filho M, Chávez-Andrade GM, Bosso-Martelo R, Guerreiro-Tanomaru JM. Evaluation of Physicochemical Properties of a New Calcium Silicate-based Sealer, Bio-C Sealer. *J Endod*. 2019;45(10):1248-52.
54. 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.
55. Milani AS, Moeinian A, Barhaghi MHS, Abdollahi AA. Evaluation of the film thickness and antibacterial property of mineral trioxide aggregate mixed with propylene glycol as a root canal sealer. *Dent Res J (Isfahan)*. 2020;17(2):142-6.
56. Ha WN, Nicholson T, Kahler B, Walsh LJ. Mineral Trioxide Aggregate-A Review of Properties and Testing Methodologies. *Materials (Basel)*. 2017;10(11).
57. Marciano MA, Duarte MA, Camilleri J. Calcium silicate-based sealers: Assessment of physicochemical properties, porosity and hydration. *Dent Mater*. 2016;32(2):e30-40.
58. Khalil I, Naaman A, Camilleri J. Properties of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod*.

2016;42(10):1529-35.

59. Zamparini F, Prati C, Taddei P, Spinelli A, Di Foggia M, Gandolfi MG. Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. *Int J Mol Sci.* 2022;23(22).
60. Pashley DH. Clinical correlations of dentin structure and function. *J Prosthet Dent.* 1991;66(6):777-81.
61. Mjör IA, Nordahl I. The density and branching of dentinal tubules in human teeth. *Arch Oral Biol.* 1996;41(5):401-12.
62. Pashley DH, Pashley EL, Carvalho RM, Tay FR. The effects of dentin permeability on restorative dentistry. *Dent Clin North Am.* 2002;46(2):211-45, v-vi.
63. Lo Giudice G, Cutroneo G, Centofanti A, Artemisia A, Bramanti E, Militi A, et al. Dentin Morphology of Root Canal Surface: A Quantitative Evaluation Based on a Scanning Electronic Microscopy Study. *Biomed Res Int.* 2015;2015:164065.
64. Mjör IA. Dentin permeability: the basis for understanding pulp reactions and adhesive technology. *Braz Dent J.* 2009;20(1):3-16.
65. Nalbandian J, Gonzales F, Sognnaes RF. Sclerotic age changes in root dentin of human teeth as observed by optical, electron, and x-ray microscopy. *J Dent Res.* 1960;39:598-607.
66. Vasiliadis L, Darling AI, Levers BG. The amount and distribution of sclerotic human root dentine. *Arch Oral Biol.* 1983;28(7):645-9.
67. Stanley HR, Pereira JC, Spiegel E, Broom C, Schultz M. The detection and prevalence of reactive and physiologic sclerotic dentin, reparative dentin and dead tracts beneath various types of dental lesions according to tooth surface and age. *J Oral Pathol.* 1983;12(4):257-89.
68. Camilleri J. Sealers and warm gutta-percha obturation techniques. *J Endod.* 2015;41(1):72-8.
69. De Deus GA, Gurgel-Filho ED, Maniglia-Ferreira C, Coutinho-Filho T. The influence of filling technique on depth of tubule penetration by root canal sealer: a study using light microscopy and digital image processing. *Aust Endod J.* 2004;30(1):23-8.

70. Bitter K, Paris S, Mueller J, Neumann K, Kielbassa AM. Correlation of scanning electron and confocal laser scanning microscopic analyses for visualization of dentin/adhesive interfaces in the root canal. *J Adhes Dent*. 2009;11(1):7-14.
71. Canette A, Briandet R. MICROSCOPY | Confocal Laser Scanning Microscopy. In: Batt CA, Tortorello ML, editors. *Encyclopedia of Food Microbiology* (Second Edition). Oxford: Academic Press; 2014. p. 676-83.
72. Shah S, Yang J, Crawshaw J, Gharbi O, Boek E. Predicting Porosity and Permeability of Carbonate Rocks From Core-Scale to Pore-Scale Using Medical CT Confocal Laser Scanning Microscopy and Micro CT. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2013;3.
73. Ordinola-Zapata R, Bramante CM, Graeff MS, del Carpio Perochena A, Vivan RR, Camargo EJ, et al. Depth and percentage of penetration of endodontic sealers into dentinal tubules after root canal obturation using a lateral compaction technique: a confocal laser scanning microscopy study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009;108(3):450-7.
74. Jardim Del Monaco R, Tavares de Oliveira M, de Lima AF, Scarparo Navarro R, Zanetti RV, de Fátima Teixeira da Silva D, et al. Influence of Nd:YAG laser on the penetration of a bioceramic root canal sealer into dentinal tubules: A confocal analysis. *PLoS One*. 2018;13(8):e0202295.
75. Al-Haddad A, Abu Kasim NH, Che Ab Aziz ZA. Interfacial adaptation and thickness of bioceramic-based root canal sealers. *Dent Mater J*. 2015;34(4):516-21.
76. Thota MM, Sudha K, Malini DL, Madhavi SB. Effect of Different Irrigating Solutions on Depth of Penetration of Sealer into Dentinal Tubules: A Confocal Microscopic Study. *Contemp Clin Dent*. 2017;8(3):391-4.
77. Tedesco M, Chain MC, Bortoluzzi EA, da Fonseca Roberti Garcia L, Alves AMH, Teixeira CS. Comparison of two observational methods, scanning electron and confocal laser scanning microscopies, in the adhesive interface analysis of endodontic sealers to root dentine. *Clin Oral Investig*. 2018;22(6):2353-61.
78. Gharib SR, Tordik PA, Imamura GM, Baginski TA, Goodell GG. A confocal laser

scanning microscope investigation of the epiphany obturation system. *J Endod.* 2007;33(8):957-61.

79. Gunes B, Yeter KY, Terlemez A, Seker B, Altay Y. Dentine tubule penetration of endodontic sealers after nonthermal plasma treatment: A confocal laser scanning microscopy study. *Microsc Res Tech.* 2019;82(6):903-8.

80. Osiri S, Banomyong D, Sattabanasuk V, Yanpiset K. Root Reinforcement after Obturation with Calcium Silicate-based Sealer and Modified Gutta-percha Cone. *J Endod.* 2018;44(12):1843-8.

81. Calt S, Serper A. Time-dependent effects of EDTA on dentin structures. *J Endod.* 2002;28(1):17-9.

82. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS. A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *J Endod.* 1983;9(4):137-42.

83. Tedesco M, Vitali FC, Bortoluzzi EA, Garcia L, Teixeira CDS. Analysis of physicochemical properties of endodontic sealers containing rhodamine B. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2023;140:105699.

84. Marín-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.* 2012;20(4):455-61.

85. Eğin A, Belli S. The Effect of Primary Root Canal Treatment on Dentine Tubule Penetration of Calcium Silicate-based Sealers during Endodontic Retreatment. *J Endod.* 2022;48(9):1169-77.

86. Heling I, Chandler NP. The antimicrobial effect within dentine tubules of four root canal sealers. *J Endod.* 1996;22(5):257-9.

87. 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.

88. Balguerie E, van der Sluis L, Vallaey K, Gurgel-Georgelin M, Diemer F. Sealer penetration and adaptation in the dentine tubules: a scanning electron microscopic study.

J Endod. 2011;37(11):1576-9.

89. Furtado TC, de Bem IA, Machado LS, Pereira JR, Só MVR, da Rosa RA. Intratubular penetration of endodontic sealers depends on the fluorophore used for CLSM assessment. *Microsc Res Tech.* 2021;84(2):305-12.
90. Patel DV, Sherriff M, Ford TR, Watson TF, Mannocci F. The penetration of RealSeal primer and Tubliseal into root canal dentinal tubules: a confocal microscopic study. *Int Endod J.* 2007;40(1):67-71.
91. Piai GG, Duarte MAH, Nascimento ALD, Rosa RAD, Só MVR, Vivan RR. Penetrability of a new endodontic sealer: A confocal laser scanning microscopy evaluation. *Microsc Res Tech.* 2018;81(11):1246-9.
92. Donnermeyer D, Schmidt S, Rohrbach A, Berlandi J, Bürklein S, Schäfer E. Debunking the Concept of Dentinal Tubule Penetration of Endodontic Sealers: Sealer Staining with Rhodamine B Fluorescent Dye Is an Inadequate Method. *Materials (Basel).* 2021;14(12).
93. Coronas VS, Villa N, Nascimento ALD, Duarte PHM, Rosa RAD, Só MVR. Dentinal Tubule Penetration of a Calcium Silicate-Based Root Canal Sealer Using a Specific Calcium Fluorophore. *Braz Dent J.* 2020;31(2):109-15.
94. Ashkar I, Sanz JL, Forner L, Melo M. Calcium Silicate-Based Sealer Dentinal Tubule Penetration-A Systematic Review of In Vitro Studies. *Materials (Basel).* 2023;16(7).
95. Russell AA, Chandler NP, Hauman C, Siddiqui AY, Tompkins GR. The butterfly effect: an investigation of sectioned roots. *J Endod.* 2013;39(2):208-10.
96. Russell A, Friedlander L, Chandler N. Sealer penetration and adaptation in root canals with the butterfly effect. *Aust Endod J.* 2018;44(3):225-34.
97. Azaz B, Michaeli Y, Nitzan D. Aging of tissues of the roots of nonfunctional human teeth (impacted canines). *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology.* 1977;43(4):572-8.
98. Singhal A, Ramesh V, Balamurali P. A comparative analysis of root dentin transparency with known age. *J Forensic Dent Sci.* 2010;2(1):18-21.
99. Versiani MA, Carvalho-Junior JR, Padilha MI, Lacey S, Pascon EA, Sousa-Neto MD. A comparative study of physicochemical properties of AH Plus and Epiphany root canal

sealants. *Int Endod J.* 2006;39(6):464-71.

100. Muedra P, Forner L, Lozano A, Sanz JL, Rodríguez-Lozano FJ, Guerrero-Gironés J, et al. Could the Calcium Silicate-Based Sealer Presentation Form Influence Dentine Sealing? An In Vitro Confocal Laser Study on Tubular Penetration. *Materials (Basel)*. 2021;14(3).

101. Chang SW, Lee YK, Zhu Q, Shon WJ, Lee WC, Kum KY, et al. Comparison of the rheological properties of four root canal sealers. *Int J Oral Sci.* 2015;7(1):56-61.

102. Eymirli A, Sungur DD, Uyanik O, Purali N, Nagas E, Cehreli ZC. Dentine Tubule Penetration and Retreatability of a Calcium Silicate-based Sealer Tested in Bulk or with Different Main Core Material. *J Endod.* 2019;45(8):1036-40.

103. Reynolds JZ, Augsburger RA, Svoboda KKH, Jalali P. Comparing dentine tubule penetration of conventional and 'HiFlow' bioceramic sealers with resin-based sealer: An in vitro study. *Aust Endod J.* 2020;46(3):387-93.

104. Tay FR, Gu LS, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L, Zhang K, et al. Effect of vapor lock on root canal debridement by using a side-vented needle for positive-pressure irrigant delivery. *J Endod.* 2010;36(4):745-50.



ภาคผนวก

ตาราง 1 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความลึกที่ซีลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนต้นของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares | df | Mean Square  | F       | Sig. |
|-----------------|-------------------------|----|--------------|---------|------|
| Corrected Model | 2377621.910a            | 3  | 792540.637   | 12.217  | .000 |
| Intercept       | 44158200.271            | 1  | 44158200.271 | 680.675 | .000 |
| Age             | 373465.517              | 1  | 373465.517   | 5.757   | .023 |
| Sealer          | 1960029.291             | 1  | 1960029.291  | 30.213  | .000 |
| Age * Sealer    | 44127.103               | 1  | 44127.103    | .680    | .416 |
| Error           | 1816475.212             | 28 | 64874.115    |         |      |
| Total           | 48352297.393            | 32 |              |         |      |
| Corrected Total | 4194097.122             | 31 |              |         |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 290.332 <sup>*</sup>  | 127.352    | .030              | 29.463                                              | 551.201     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -290.332 <sup>*</sup> | 127.352    | .030              | -551.201                                            | -29.463     |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 141.794               | 127.352    | .275              | -119.075                                            | 402.663     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -141.794              | 127.352    | .275              | -402.663                                            | 119.075     |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -420.709 <sup>*</sup> | 127.352    | .003              | -681.578                                            | -159.841    |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 420.709 <sup>*</sup>  | 127.352    | .003              | 159.841                                             | 681.578     |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -569.247 <sup>*</sup> | 127.352    | .000              | -830.116                                            | -308.379    |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 569.247 <sup>*</sup>  | 127.352    | .000              | 308.379                                             | 830.116     |

ตาราง 2 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบ  
ค่าเฉลี่ยความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนกลางของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares  | df | Mean Square  | F       | Sig. |
|-----------------|--------------------------|----|--------------|---------|------|
| Corrected Model | 2126281.638 <sup>a</sup> | 3  | 708760.546   | 26.260  | .000 |
| Intercept       | 18129212.496             | 1  | 18129212.496 | 671.699 | .000 |
| Age             | 850457.368               | 1  | 850457.368   | 31.510  | .000 |
| Sealer          | 1217432.321              | 1  | 1217432.321  | 45.107  | .000 |
| Age * Sealer    | 58391.950                | 1  | 58391.950    | 2.163   | .152 |
| Error           | 755721.937               | 28 | 26990.069    |         |      |
| Total           | 21011216.071             | 32 |              |         |      |
| Corrected Total | 2882003.575              | 31 |              |         |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 240.614 <sup>*</sup>  | 82.143     | .007              | 72.351                                              | 408.877     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -240.614 <sup>*</sup> | 82.143     | .007              | -408.877                                            | -72.351     |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 411.482 <sup>*</sup>  | 82.143     | .000              | 243.219                                             | 579.745     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -411.482 <sup>*</sup> | 82.143     | .000              | -579.745                                            | -243.219    |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -475.535 <sup>*</sup> | 82.143     | .000              | -643.798                                            | -307.273    |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 475.535 <sup>*</sup>  | 82.143     | .000              | 307.273                                             | 643.798     |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -304.667 <sup>*</sup> | 82.143     | .001              | -472.930                                            | -136.404    |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 304.667 <sup>*</sup>  | 82.143     | .001              | 136.404                                             | 472.930     |

ตาราง 3 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบ  
ค่าเฉลี่ยความลึกที่ซิลเลอร์แทรกซึมเข้าไปในท่อเนื้อฟันที่ระดับส่วนปลายของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares  | df | Mean Square | F       | Sig. |
|-----------------|--------------------------|----|-------------|---------|------|
| Corrected Model | 1094811.919 <sup>a</sup> | 3  | 364937.306  | 80.301  | .000 |
| Intercept       | 1569511.935              | 1  | 1569511.935 | 345.356 | .000 |
| Age             | 686597.535               | 1  | 686597.535  | 151.079 | .000 |
| Sealer          | 236504.115               | 1  | 236504.115  | 52.040  | .000 |
| Age * Sealer    | 171710.270               | 1  | 171710.270  | 37.783  | .000 |
| Error           | 127249.500               | 28 | 4544.625    |         |      |
| Total           | 2791573.355              | 32 |             |         |      |
| Corrected Total | 1222061.419              | 31 |             |         |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 146.453 <sup>*</sup>  | 33.707     | .000              | 77.408                                              | 215.499     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -146.453 <sup>*</sup> | 33.707     | .000              | -215.499                                            | -77.408     |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 439.464 <sup>*</sup>  | 33.707     | .000              | 370.418                                             | 508.509     |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -439.464 <sup>*</sup> | 33.707     | .000              | -508.509                                            | -370.418    |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -318.444 <sup>*</sup> | 33.707     | .000              | -387.490                                            | -249.399    |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 318.444 <sup>*</sup>  | 33.707     | .000              | 249.399                                             | 387.490     |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -25.434               | 33.707     | .457              | -94.479                                             | 43.612      |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 25.434                | 33.707     | .457              | -43.612                                             | 94.479      |

ตาราง 4 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละความลึกของการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงที่ระดับส่วนต้นของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F        | Sig. |
|-----------------|-------------------------|----|-------------|----------|------|
| Corrected Model | 641.571 <sup>a</sup>    | 3  | 213.857     | 2.982    | .048 |
| Intercept       | 282996.453              | 1  | 282996.453  | 3945.804 | .000 |
| Age             | 640.641                 | 1  | 640.641     | 8.932    | .006 |
| Sealer          | .308                    | 1  | .308        | .004     | .948 |
| Age * Sealer    | .622                    | 1  | .622        | .009     | .926 |
| Error           | 2008.184                | 28 | 71.721      |          |      |
| Total           | 285646.208              | 32 |             |          |      |
| Corrected Total | 2649.755                | 31 |             |          |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 8.670                 | 4.234      | .050              | -.004                                               | 17.344      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -8.670                | 4.234      | .050              | -17.344                                             | .004        |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 9.227 <sup>*</sup>    | 4.234      | .038              | .554                                                | 17.901      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -9.227 <sup>*</sup>   | 4.234      | .038              | -17.901                                             | -.554       |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>a</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -.475                 | 4.234      | .911              | -9.149                                              | 8.199       |
|             | iRootSP    | AHPlus     | .475                  | 4.234      | .911              | -8.199                                              | 9.149       |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | .083                  | 4.234      | .985              | -8.591                                              | 8.756       |
|             | iRootSP    | AHPlus     | -.083                 | 4.234      | .985              | -8.756                                              | 8.591       |

ตาราง 5 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละความลึกของการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงที่ระดับส่วนกลางของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F        | Sig. |
|-----------------|-------------------------|----|-------------|----------|------|
| Corrected Model | 1870.201 <sup>a</sup>   | 3  | 623.400     | 3.790    | .021 |
| Intercept       | 204720.430              | 1  | 204720.430  | 1244.521 | .000 |
| Age             | 1822.308                | 1  | 1822.308    | 11.078   | .002 |
| Sealer          | 38.451                  | 1  | 38.451      | .234     | .633 |
| Age * Sealer    | 9.442                   | 1  | 9.442       | .057     | .812 |
| Error           | 4605.927                | 28 | 164.497     |          |      |
| Total           | 211196.559              | 32 |             |          |      |
| Corrected Total | 6476.129                | 31 |             |          |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 16.179 <sup>*</sup>   | 6.413      | .018              | 3.043                                               | 29.315      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -16.179 <sup>*</sup>  | 6.413      | .018              | -29.315                                             | -3.043      |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 14.006 <sup>*</sup>   | 6.413      | .037              | .870                                                | 27.142      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -14.006 <sup>*</sup>  | 6.413      | .037              | -27.142                                             | -8.70       |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>a</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -1.106                | 6.413      | .864              | -14.242                                             | 12.030      |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 1.106                 | 6.413      | .864              | -12.030                                             | 14.242      |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -3.279                | 6.413      | .613              | -16.415                                             | 9.857       |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 3.279                 | 6.413      | .613              | -9.857                                              | 16.415      |

ตาราง 6 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-Way ANOVA และ Tukey's HSD test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละความลึกของการแทรกซึมของซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟันตามแนวเส้นรอบวงที่ระดับส่วนปลายของคลองรากฟัน

| Source          | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F       | Sig. |
|-----------------|-------------------------|----|-------------|---------|------|
| Corrected Model | 9926.319 <sup>a</sup>   | 3  | 3308.773    | 17.251  | .000 |
| Intercept       | 48422.720               | 1  | 48422.720   | 252.465 | .000 |
| Age             | 7112.070                | 1  | 7112.070    | 37.081  | .000 |
| Sealer          | 1863.551                | 1  | 1863.551    | 9.716   | .004 |
| Age * Sealer    | 950.698                 | 1  | 950.698     | 4.957   | .034 |
| Error           | 5370.391                | 28 | 191.800     |         |      |
| Total           | 63719.430               | 32 |             |         |      |
| Corrected Total | 15296.710               | 31 |             |         |      |

| Sealer  | (I) Age     | (J) Age     | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|         |             |             |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| AHPlus  | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 18.915 <sup>*</sup>   | 6.925      | .011              | 4.731                                               | 33.099      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -18.915 <sup>*</sup>  | 6.925      | .011              | -33.099                                             | -4.731      |
| iRootSP | Age < 25 Yr | Age > 40 Yr | 40.718 <sup>*</sup>   | 6.925      | .000              | 26.533                                              | 54.902      |
|         | Age > 40 Yr | Age < 25 Yr | -40.718 <sup>*</sup>  | 6.925      | .000              | -54.902                                             | -26.533     |

| Age         | (I) Sealer | (J) Sealer | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. <sup>b</sup> | 95% Confidence Interval for Difference <sup>b</sup> |             |
|-------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
|             |            |            |                       |            |                   | Lower Bound                                         | Upper Bound |
| Age < 25 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -26.164 <sup>*</sup>  | 6.925      | .001              | -40.348                                             | -11.979     |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 26.164 <sup>*</sup>   | 6.925      | .001              | 11.979                                              | 40.348      |
| Age > 40 Yr | AHPlus     | iRootSP    | -4.361                | 6.925      | .534              | -18.546                                             | 9.823       |
|             | iRootSP    | AHPlus     | 4.361                 | 6.925      | .534              | -9.823                                              | 18.546      |

ประวัติผู้เขียน

