



ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน ด้วยการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ

FRACTURE RESISTANCE OF SIMULATED IMMATURE TEETH AFTER CALCIUM HYDROXIDE INTRACANAL MEDICATION WITH MTA PLUG

กัทลี ศรีประศาสน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน ด้วยการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

FRACTURE RESISTANCE OF SIMULATED IMMATURE TEETH AFTER CALCIUM
HYDROXIDE INTRACANAL MEDICATION WITH MTA PLUG



KUTTALEE SRIPRASART

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

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่เคลือบไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน ด้วยการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ

ของ

กัทลี ศรีประศาสน์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์จัตราชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์สุวิทย์ วิมลจิตต์)

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพ.วรรณณะ สัตตบรรณสุข)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ.ชินาลัย ปิยะชน)

ชื่อเรื่อง	ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน ด้วยการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ
ผู้วิจัย	กัทลี ศรีประศาสน์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สุวิทย์ วิมลจิตต์

วัตถุประสงค์ : เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดเมื่ออุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ : ใช้ฟันกรามน้อยล่างของมนุษย์ที่มีรากเดี่ยวจำนวน 50 ซี่ ทำการเตรียมความยาวรากฟันให้ได้ 9 มิลลิเมตร โดยตัดส่วนตัวฟันเหนือตำแหน่งรอยต่อเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันและตัดปลายรากฟันในแนวขวางส่วนใต้ตำแหน่งรอยต่อเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน 9 มิลลิเมตรออก จากนั้นเตรียมคลองรากฟันด้วยพีโซโรเมอร์ขนาด 1-6 เพื่อจำลองสภาวะฟันปลายรากเปิดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟันเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตร แบ่งกลุ่มโดยการสุ่มเลือกฟันออกเป็นกลุ่มทดลอง 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ซี่ และกลุ่มควบคุม 2 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ซี่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุมแบบลบเป็นกลุ่มที่ไม่ได้ทำการรักษาใดๆ กลุ่มที่ 2 กลุ่มควบคุมแบบบวกเป็นกลุ่มที่ได้รับการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน กลุ่มที่ 3-5 จะทำการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ 4 มิลลิเมตรร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน ทำการทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟันด้วยเครื่องทดสอบแรงสากล ซึ่งจะให้แรงขนานกับแนวแกนของฟันด้วยความเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีจนเกิดการแตกหัก บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในหน่วยนิวตัน และดูรูปแบบการแตกหักของรากฟัน ผลการศึกษา : กลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานการแตกหักของรากฟันสูงสุด (543.33 ± 37.17 นิวตัน) ขณะที่กลุ่มที่ 2 มีค่าต่ำสุด (239.98 ± 27.19 นิวตัน) ส่วนค่าเฉลี่ยความต้านทานการแตกหักของรากฟันในกลุ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 432.82 ± 68.06 นิวตัน (กลุ่มที่ 3) 396.92 ± 59.93 นิวตัน (กลุ่มที่ 4) และ 389.08 ± 56.25 นิวตัน (กลุ่มที่ 5) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่ากลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < .05$) แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มทดลอง ($p > .05$) สรุป : การอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้อย่างมีนัยสำคัญ และไม่มีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุทั้ง 3 ชนิด

คำสำคัญ : ฟันที่ยังมีการสร้างรากฟันไม่สมบูรณ์, การอุดปิดปลายรากฟัน, วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์, ความต้านทานการแตกหัก

Title	FRACTURE RESISTANCE OF SIMULATED IMMATURE TEETH AFTER CALCIUM HYDROXIDE INTRACANAL MEDICATION WITH MTA PLUG
Author	KUTTALEE SRIPRASART
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Suvit Vimoljit

The aim of this study was to compare the fracture resistance of simulated immature teeth with apical plugs with ProRoot MTA, MTA Angelus and RetroMTA after calcium hydroxide intracanal medication. The materials and methods included the following: 50 extracted, single-rooted human mandibular premolars were chosen for the study. Firstly, to standardize the 9mm root length, the crowns were cut off at and 9mm below cemento-enamel junction transversely. The simulations for immature apices were carried out using No.1-6 Peeso reamer to obtain a 1.7 mm diameter root each and two control groups of 10 roots each. In the negative control group (Group One), no treatment was performed, while the other positive control group (Group Two), 30 days calcium hydroxide intracanal medication was performed. In the experimental groups, the ProRoot MTA (Group Three), MTA Angelus (Group Four) and RetroMTA (Group Five) were packed ultrasonically to apical 1/3 of those roots after 30 days calcium hydroxide intracanal medication. The specimens were vertically loaded in a Universal Testing Machine at cross head speed of 1 mm/min until fracture occurred. The maximum force (Newton) and fracture pattern were recorded. The results indicated the following: the highest mean fracture resistance was shown in Group One (543.33 ± 37.17 N) while the lowest was in Group Two (239.98 ± 27.19 N). The mean fracture resistance of the experimental groups was 432.82 ± 68.06 N (Group Three), 396.92 ± 59.93 N (Group Four) and 389.08 ± 56.25 N (Group Five). According to the statistical analysis, significant differences were found between control groups and experimental groups ($p < .05$), however, no significant differences were found among the experimental groups ($p > .05$). In conclusion, an apical plug with ProRoot MTA, MTA Angelus and RetroMTA had a significant strengthening effect on the fracture resistance of simulated immature teeth after calcium hydroxide intracanal medication had been used with no differences between groups.

Keyword : Immature teeth, Apical plug, Calcium silicate cement, Fracture resistance

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์และกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผศ.ทพ.สุวิทย์ วิมลจิตต์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำ แก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ รวมทั้งแนะนำองค์ความรู้ แนวทางในการศึกษาค้นคว้ามาโดยตลอด เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเอ็นโดไครนอล และคณาจารย์ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ทุกท่านที่เมตตาสอนสั่งและให้ความช่วยเหลือมาตลอดช่วงเวลาของการศึกษา รวมไปถึงบุคลากรประจำภาควิชาทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้เป็นไปอย่างราบรื่น ขอขอบพระคุณบุคลากรฝ่ายวิจัยทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบแรงสาก

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณบุพการีและบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาจนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กัทลี ศรีประศาสน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	5
กรอบแนวคิดวิจัย.....	6
คำถามงานวิจัย.....	7
สมมติฐานการวิจัย.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
การพัฒนาของรากฟัน (Stage of root development)	8
ฟันตายปลายรากเปิด.....	8
การควบคุมการติดเชื้อหรือการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในคลองรากฟัน (Disinfection of the canals)	9
การรักษาในฟันตายปลายรากเปิด	11
1. เอเพกซิฟิเคชัน (Apexification)	11

2.	การสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน (Apical barrier).....	13
3.	รีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ (Regenerative Endodontics).....	15
	วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (Calcium silicate cement; CSC).....	16
1.	มินอรัลไตรออกไซด์ แอกรีเกต หรือเอ็มทีเอ (mineral trioxide aggregate, MTA)	17
2.	เอ็มทีเอแองเจิลัส (MTA Angelus®).....	19
3.	เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA®).....	21
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	23
	การคัดเลือกพื้นที่ใช้ในการทดลอง.....	23
	การเตรียมพื้นที่ใช้ในการทดลอง	23
	การเตรียมกลุ่มทดลอง	24
	การทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟัน	28
	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	31
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
	การทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟัน	34
	การศึกษารูปแบบการแตกหักของรากฟัน.....	38
บทที่ 5	อภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ.....	41
	การอภิปรายผลการวิจัย	41
	สรุปผลการวิจัย.....	49
	ข้อเสนอแนะ	49
	บรรณานุกรม	50
	ภาคผนวก.....	62
	ประวัติผู้เขียน.....	65



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ส่วนประกอบของเอ็มทีเอ	19
ตาราง 2 ส่วนประกอบของเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์.....	20
ตาราง 3 ส่วนประกอบของเวโทรเอ็มทีเอ	22
ตาราง 4 ขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน (มิลลิเมตร)	33
ตาราง 5 ความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟันภายหลังการเตรียมฟันที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิเมตร)	34
ตาราง 6 ค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหัก (นิวตัน)	35
ตาราง 7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในแต่ละกลุ่มด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)	36
ตาราง 8 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยสถิติทูกี เอสเอสดี (Tukey's HSD) ..	36
ตาราง 9 ตารางแจกแจงความถี่และร้อยละของรูปแบบการแตกหักของรากฟัน.....	40

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย	6
ภาพประกอบ 2 การพัฒนาของรากฟัน	8
ภาพประกอบ 3 ลักษณะการปิดของปลายรากฟัน (41).....	12
ภาพประกอบ 4 วิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ (17)	14
ภาพประกอบ 5 การเตรียมฟันในการทดลอง	24
ภาพประกอบ 6 ก.โปรรูทเอ็มทีเอ ข.เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ ค.เรโทรเอ็มทีเอ.....	24
ภาพประกอบ 7 กลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุมแบบลบ.....	25
ภาพประกอบ 8 การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน	25
ภาพประกอบ 9 กลุ่มที่ 2 กลุ่มควบคุมแบบบวก.....	26
ภาพประกอบ 10 กลุ่มทดลองที่ผ่านการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน แล้วได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ก.กลุ่มที่ 3 โปรรูทเอ็มทีเอ (สีเหลือง) ข.กลุ่มที่ 4 เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ (สีน้ำเงิน) ค.กลุ่มที่ 5 เรโทรเอ็มทีเอ (สีเขียว).....	28
ภาพประกอบ 11 การสร้างเอ็นยึดปริทันต์จำลองโดยนำรากฟันมาจุ่มด้วยซีเมนต์เหลว (สีชมพู) แล้วแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนไลต์บอดี (สีเขียว).....	29
ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างชิ้นงานบล็อคเรซินอะคริลิก	29
ภาพประกอบ 13 การทดสอบการแตกหักของรากฟันด้วยเครื่องทดสอบแรงสากล	30
ภาพประกอบ 14 การแบ่งระดับการแตกหักของรากฟันที่อยู่เหนือและใต้เรซินอะคริลิก.....	30
ภาพประกอบ 15 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้	38
ภาพประกอบ 16 รูปแบบการแตกหักของรากฟัน (ภาพบน: มุมด้านหน้า ภาพล่าง: มุม ด้านข้าง)	39

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การตายของเนื้อเยื่อใน (Dental pulp) ในฟันแท้ที่ยังมีการสร้างรากฟันไม่สมบูรณ์ (Immature teeth) ไม่ว่าจะเกิดมาจากการติดเชื้อแบคทีเรียหรือการได้รับอุบัติเหตุ สามารถก่อให้เกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน (Apical periodontitis) (1) อีกทั้งยังทำให้กระบวนการสร้างรากฟันหยุดลง ส่งผลให้ปลายรากฟันเปิดกว้าง (Open apex) และมีผนังคลองรากฟันบาง (Thin dentinal walls) ซึ่งลักษณะของปลายรากฟันที่เปิดกว้างจะทำให้ไม่มีจุดสิ้นสุดของปลายรากฟัน (Apical stop) ที่แน่นอน ยากต่อการทำความสะอาดและการอุดคลองรากฟันให้ดี รวมไปถึงการที่มีผนังคลองรากฟันบางก็ทำให้มีโอกาสเกิดการแตกหักของรากฟันได้ง่าย จึงมีความซับซ้อนมากกว่าการรักษาคลองรากฟันในฟันแท้ที่มีการสร้างรากฟันสมบูรณ์ (Mature permanent teeth) (2)

การควบคุมการติดเชื้อหรือการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจากคลองรากฟันประกอบด้วย การขยายคลองรากฟัน การล้างคลองรากฟัน และการใส่ยาในคลองรากฟัน Bystrom และ Sundqvist ในปี 1981 (3) พบว่าการขยายและการล้างคลองรากฟันสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียในคลองรากฟันได้เป็นจำนวนมาก แต่ก็ยังคงมีเชื้อหลงเหลืออยู่ จึงมีความจำเป็นต้องใส่ยาในคลองรากฟันภายหลังการขยายและการล้างคลองรากฟัน (4) ยาใส่ในคลองรากฟันที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ลดสิ่งซึมขึ้นปลายราก (Apical exudate) และทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน (5, 6) จากการศึกษาของ Shuping และคณะในปี 2000 (7) พบว่าการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์สามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังทำให้อัตราความสำเร็จของการรักษาในฟันที่มีการอักเสบของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการควบคุมการติดเชื้อในฟันปลายรากเปิด การทำความสะอาดโดยใช้เครื่องมือย่อมทำได้ยาก การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการช่วยควบคุมการติดเชื้อได้ จากการศึกษาของ Nerwich และคณะในปี 1993 (8) พบว่าการแพร่ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปยังเนื้อฟันด้านนอกบริเวณปลายรากฟันเพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดต่ำ (pH) เท่ากับ 9.3 ซึ่งเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรียต้องใช้เวลา 4 สัปดาห์

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใส่ในคลองรากฟันอาจทำให้เนื้อฟันอ่อนแอลง และส่งผลให้ความต้านทานการแตกหักของเนื้อฟันลดลงด้วย (9) โดยจากการศึกษาของ Grigoratos และคณะในปี

2001 (10) ทำการประเมินผลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อความแข็งแรงของชั้นเนื้อฟัน พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้ความแข็งแรงของเนื้อฟันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลาสั้นจะส่งผลให้โครงสร้างของเนื้อฟันอ่อนแอมากยิ่งขึ้น Andreasen และคณะในปี 2002 (11) ทำการศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติทางกลของเนื้อฟันในฟันปลายรากเปิด พบว่าความแข็งแรงของเนื้อฟันจะเริ่มลดลงอย่างมากตั้งแต่วันที่ 1 เดือน และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ซึ่งทำให้ความเสี่ยงในการเกิดรากฟันแตกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับการศึกษาของ White และคณะในปี 2002 (12) ที่ทำการทดลองในฟันวัว โดยนำชั้นเนื้อฟันแช่ลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าความแข็งแรงของเนื้อฟันส่วนรากฟันและความต้านทานการแตกหักของฟันลดลงหลังจากสัมผัสกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์ จะเห็นได้ว่าการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลาสั้นก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้รากฟันเกิดการแตกหักได้ง่าย ซึ่งจากการศึกษาของ Elnaghy และ Elsaka ในปี 2016 (13) พบว่าฟันปลายรากเปิดจะมีค่าความต้านทานต่อการแตกหักน้อยกว่าฟันปกติ ดังนั้นหากจำเป็นต้องควบคุมการติดเชื้อร่วมด้วยก็ย่อมทำให้ฟันเกิดการแตกหักได้ง่ายยิ่งขึ้น

การเพิ่มความแข็งแรงของฟันปลายรากเปิดภายหลังการควบคุมการติดเชื้อสามารถทำได้ โดยการอุดปิดปลายรากฟันหรือการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันด้วยวัสดุอุดปิดปลายราก เช่น เอ็มทีเอ (MTA apical plug) (14) วิธีนี้จะเป็นการสร้างจุดหยุดที่ปลายรากฟัน ทำให้สามารถอุดคลองรากฟันได้อย่างสมบูรณ์ ลดระยะเวลาในการรักษา สามารถบูรณะฟันได้เร็ว ลดความเสี่ยงในการเกิดการแตกหักของฟัน (15-17) และมีอัตราความสำเร็จของการรักษาค่อนข้างสูง (18, 19) Milani และคณะในปี 2012 (20) พบว่าความต้านทานการแตกหักของฟันปลายรากเปิดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ Çiçek และคณะในปี 2017 (21) พบว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอที่ระดับความหนา 3 และ 6 มิลลิเมตรสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันได้อย่างมีนัยสำคัญ และไม่พบความแตกต่างระหว่างการอุดที่ระดับความหนา 3 และ 6 มิลลิเมตร จึงมีคำแนะนำว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอควรมีความหนา 3-6 มิลลิเมตร Hachmeister และคณะในปี 2002 (22) พบว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตรนั้นเพียงพอต่อการป้องกันการรั่วซึม (Leakage) และต้านทานการหลุด (Displacement) ของวัสดุ สอดคล้องกับการศึกษาของ Valois และคณะในปี 2004 (23) ที่พบว่าความหนาของเอ็มทีเอ 4 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วซึมจากปลายรากฟันได้มากที่สุด ดังนั้นในการอุดปิดปลายรากฟันควรมีความหนาของเอ็มทีเออย่างน้อย 4 มิลลิเมตร

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำวัสดุอื่นๆ ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (Calcium silicate cement) เช่น เอ็มทีเอแองเจิลส์ (MTA Angelus) เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA) ไบโอบเดนทีน (Biodentine) (24, 25) มาใช้ในการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility) มีความแนบสนิทที่ดี (Sealing ability) มีระยะเวลาในการก่อตัว (Setting time) น้อยกว่าเอ็มทีเอ และยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันปลายรากเปิดได้ (26) จากการศึกษาของ Bayram และ Bayram ในปี 2016 (27) ทำการเปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักในฟันปลายรากเปิดที่ได้รับการอุดคลองรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิลส์ ไบโอบเอกรีกเกต (BioAggregate) และไบโอบเดนทีน ผลการศึกษาพบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับการศึกษาของภัทรและสุวิทย์ในปี 2021 (28) ที่พบว่าการอุดคลองรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ มีแนวโน้มในการเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุมีความใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) มีความแนบสนิทที่ดี และมีความสามารถในการยึดติดกับผนังคลองรากฟันไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Karapinar-Kazandag และคณะในปี 2016 (29) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแตกหักของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดเมื่อใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 7 วัน ร่วมกับการอุดคลองรากฟันด้วยเอ็มทีเอ พบว่าความต้านทานการแตกหักของฟันมีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าการอุดด้วยเอ็มทีเอสามารถเสริมความแข็งแรงของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้

หากการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันได้ ก็อาจจะเพิ่มอัตราการคงอยู่ของฟันปลายรากฟันเปิดให้ยาวนานขึ้นได้เช่นกัน จึงเป็นที่น่าสนใจว่าถ้าใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลานาน แล้วทำการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์จะสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้หรือไม่ และวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ จะสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้แตกต่างกันหรือไม่

ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิด เมื่อได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจลัส และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังจากการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน

ความสำคัญของการวิจัย

จากการศึกษาของ Cvek ในปี 1992 (30) ทำการศึกษาฟันที่ได้รับอุบัติเหตุในฟันปลายรากเปิด โดยทำการรักษาด้วยการกระตุ้นให้เกิดการเจริญของปลายรากฟันด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide apexification) ร่วมกับอุดคลองรากฟันด้วยกัตตาเปอร์ชา (Gutta percha) พบว่าจะเกิดการแตกหักของฟันได้ร้อยละ 28-77 ขึ้นกับระยะในการพัฒนาของรากฟัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หากการพัฒนาของรากฟันอยู่ในระยะต้น ซึ่งมีผนังคลองรากฟันบางและผ่านการรักษาด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ย่อมมีผลทำให้ฟันอ่อนแอมาก จนกระทั่งทำให้เกิดการแตกหักของฟันดังกล่าวได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Andreasen และคณะในปี 2002 (11) ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานต่อการแตกหัก (Fracture resistance) ของฟันที่ผ่านการสัมผัสด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ 1 เดือน 2 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 9 เดือน และ 12 เดือน จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่สัมผัส Pacios และคณะในปี 2003 (31) ทำการทดลองโดยแช่ชิ้นเนื้อฟันในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบสารละลายภายหลัง จะพบส่วนประกอบของโปรตีนและไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline) ปะปนอยู่ บ่งบอกถึงการเกิดการสลายของคอลลาเจน แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นด่างสูงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อาจทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะไอออนิก และทำลายองค์ประกอบของโปรตีนในเนื้อฟัน จากการศึกษาข้างต้นนำไปสู่ข้อสันนิษฐานว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปฏิกิริยากับผนังของคลองรากฟัน ยิ่งในฟันที่มีปลายรากฟันเปิดย่อมทำให้ฟันอ่อนแอลง

ปฏิกิริยาดังกล่าวน่าจะเกิดจากความเป็นด่างสูงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการทำลายส่วนยึด (Bonding agent) ระหว่างโครงร่างคอลลาเจน (Collagen network) กับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อฟัน ซึ่งส่วนยึดนั้นเป็นโปรตีนที่มีความเป็นกรด (Acidic protein) ร่วมกับ โปรติโอไกลแคน (Proteoglycan) ที่มีกลุ่มฟอสเฟต (Phosphate) และคาร์บอกซิเลท (Carboxylate) เป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการทำลายส่วนประกอบทั้งสองส่วน จึงทำให้สมบัติทางกล (Mechanical properties) ของเนื้อฟันลดลง ยิ่งกรณีฟันปลายรากฟันเปิดนอกจากจะมีความอ่อนแอจากการมีผนังคลองรากฟันบางแล้ว หากสัมผัสกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ยิ่งทำให้ฟันอ่อนแอลง ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา (32-34) พบว่าการนำ

เอ็มทีเอมาใช้อุดปิดบริเวณปลายรากฟัน นอกจากจะช่วยลดระยะเวลาในการรักษา ยังช่วยเสริมสมบัติทางกลของเนื้อฟันซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของคลองรากฟันแข็งแรงขึ้น ดังนั้นจึงมีความสนใจว่าหากมีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลาสั้น แล้วทำการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์จะสามารถเสริมความแข็งแรงของรากฟันจำลองสถานะปลายรากฟันเปิดได้แตกต่างกันหรือไม่ นอกจากนี้วัสดุกลุ่มนี้มีหลายประเภทขึ้นกับลักษณะการผลิต ได้แก่ กลุ่มที่ผลิตจากการเผาวัสดุธรรมชาติ เช่น โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และกลุ่มสังเคราะห์ เช่น เรโทรเอ็มทีเอ จึงเป็นที่น่าสนใจอีกว่าวัสดุที่ต่างกันจะมีประสิทธิภาพเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยคาดหวังว่าผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการนำข้อมูลไปใช้ในการรักษาทางคลินิกเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ป่วยมากที่สุด

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำในฟันของมนุษย์ที่ถูกถอน โดยจะทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสถานะปลายรากฟันเปิดเมื่อได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังจากการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรต้น คือ วัสดุอุดปิดปลายรากฟันในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ
2. ตัวแปรตาม คือ ความต้านทานการแตกหักของรากฟัน ซึ่งวัดจากค่าแรงกดที่ใช้ทดสอบจนทำให้รากฟันเกิดการแตกหัก (บันทึกค่าแรงในหน่วยนิวตัน) และตำแหน่งการแตกหักของฟัน
3. ตัวแปรควบคุม คือ ขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้น (Bucco-lingual) และแนวใกล้กลางไกลกลาง (Mesio-distal) ที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน (Cemento-enamel junction; CEJ) ความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน ความยาวของชิ้นส่วนรากฟันภายหลังการตัดส่วนตัวฟันและปลายรากฟันออก ความกว้างของคลองรากฟันภายหลังการจำลองสถานะปลายรากฟันเปิด ยาที่ใช้ในคลองรากฟัน คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลาในการใส่ยาในคลองรากฟัน ตำแหน่งและทิศทางของแรงที่กระทำต่อฟัน

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ฟันที่ยังมีการสร้างรากฟันไม่สมบูรณ์ (Immature teeth) หมายถึง ฟันที่มีการเจริญของรากฟันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้รากฟันสั้น ผนังคลองรากฟันบาง ปลายรากฟันทู่ (Blunt end) และมีลักษณะเป็นปลายรากเปิด (Open apex) ทำให้ไม่พบจุดหยุดปลายรากฟัน (Apical stop)
2. การอุดปิดปลายรากฟัน (Apical plug) หมายถึง การสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันด้วยวัสดุอุดปิดปลายรากเพื่อให้เป็นจุดหยุดของปลายรากฟัน
3. วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (Calcium silicate cement) หมายถึง วัสดุกลุ่มไบโอเซรามิกส์ ซึ่งได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot® MTA) เอ็มทีเอแองเจลัส (MTA Angelus®) และเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA®)
4. ความต้านทานความแตกหัก (Fracture resistance) หมายถึง ความต้านทานต่อการแตกหักเมื่อให้แรงกระทำต่อตัวฟัน

กรอบแนวคิดวิจัย

- ขนาดของฟันในแนวใกล้แก้ม ใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน
- ความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน
- ความยาวของชิ้นส่วนรากฟันภายหลังการตัดส่วนตัวฟันและปลายรากฟันออก
- ความกว้างของคลองรากฟันภายหลังการจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิด
- ยาที่ใช้ในคลองรากฟัน คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการใส่ยาในคลองรากฟัน
- ตำแหน่งและทิศทางของแรงที่กระทำต่อฟัน

วัสดุอุดปิดปลายรากฟันในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์
ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจลัส และเรโทรเอ็มทีเอ



ความต้านทานการแตกหักของรากฟัน
(บันทึกค่าแรงในหน่วยนิวตัน) และ
ตำแหน่งการแตกหักของฟัน

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย

คำถามงานวิจัย

1. การอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันได้หรือไม่

2. การอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันได้แตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานการวิจัย

1. การอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันได้หรือไม่

สมมติฐานหลัก (H_0) : ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดไม่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน

สมมติฐานรอง (H_1) : ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน

2. การอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันได้แตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานหลัก (H_0) : ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันมีค่าไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานรอง (H_1) : ความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันมีค่าแตกต่างกัน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาของรากฟัน (Stage of root development)

Cvek ในปี 1992 (30) ได้จำแนกการพัฒนาของรากฟันออกเป็น 5 ระยะ โดยพิจารณาจากภาพรังสี (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 2 การพัฒนาของรากฟัน

- ระยะที่ 1 (A) รากฟันมีความยาวน้อยกว่า $1/2$ ของความยาวรากฟันที่สมบูรณ์
- ระยะที่ 2 (B) รากฟันมีความยาวเท่ากับ $1/2$ ของความยาวรากฟันที่สมบูรณ์
- ระยะที่ 3 (C) รากฟันมีความยาวเท่ากับ $2/3$ ของความยาวรากฟันที่สมบูรณ์
- ระยะที่ 4 (D) ปลายรากฟันเปิด และมีความยาวรากฟันเกือบสมบูรณ์
- ระยะที่ 5 (E) ปลายรากฟันปิด และมีความยาวรากฟันสมบูรณ์

ฟันตายปลายรากเปิด

การเจริญตามธรรมชาติของรากฟันเป็นหน้าที่ของเยื่อหุ้มผิวรากฟันเฮิร์ตวิก (Hertwig's epithelial root sheath) โดยจะทำงานร่วมกับเซลล์โอดอนโตบลาสต์ (Odontoblast) และเซลล์ซีเมนโตบลาสต์ (Cementoblast) ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดการเจริญเติบโตและรูปร่างของรากฟัน สร้างรากฟันให้ยาวขึ้นและมีความหนาของผนังคลองรากมากขึ้น ซึ่งต่อมาเยื่อหุ้มผิวไดอะแฟรม (Epithelial diaphragm) ที่บริเวณปลายรากจะกลายเป็นรูเปิดของปลายรากฟัน และมักจะเสร็จสมบูรณ์ภายใน 3 ปีหลังจากฟันขึ้นมาในช่องปาก (35) ขณะที่มีการสร้างรากฟันหากมีการทำลายของเยื่อหุ้มผิวรากฟันเฮิร์ตวิก เช่น ฟันได้รับอุบัติเหตุ หรือเกิดการติดเชื้อภายในคลองรากฟันจนเกิดการตายของฟันจะทำให้กระบวนการสร้างรากฟันหยุดลง ส่งผลให้ฟันซี่นั้นมีการสร้าง

รากฟันไม่สมบูรณ์และกลายเป็นฟันปลายรากเปิด ซึ่งฟันดังกล่าวมักมีข้อจำกัดหรือความซับซ้อนในการรักษาคลองรากฟันมากกว่าฟันแท้ที่มีการสร้างรากฟันสมบูรณ์ เนื่องจาก (17)

1. ฟันมีขนาดของโพรงประสาทฟันในส่วนรากกว้าง ทำให้ยากต่อการกำจัดเชื้อและการทำความสะอาดคลองรากฟันให้ทั่วถึง รวมทั้งไม่สามารถใช้เครื่องมือทำความสะอาดมากเกินไปได้

2. ฟันมีปลายรากฟันกว้างหรือมีลักษณะบานออก ไม่มีแนวกันที่ปลายรากฟันซึ่งอาจส่งผลให้วัสดุอุดคลองรากฟันสามารถเกินออกไปรอบวงและทำให้เกิดการระคายเคืองบริเวณอวัยวะปริทันต์รอบๆ ปลายรากฟันได้

3. รากฟันสั้น สัดส่วนของตัวฟันต่อรากฟัน (Crown-root ratio) น้อย ผนังคลองรากฟันยังไม่มีการสะสมของเนื้อฟันมากพอ ทำให้รากฟันบาง และมีความเสี่ยงที่จะเกิดรากฟันแตกได้

ดังนั้นการรักษาในฟันตายปลายรากเปิด คือ การควบคุมการติดเชื้อภายในคลองรากฟันร่วมกับทำให้มีการปิดของปลายรากฟันเพื่อไม่ให้มีทางติดต่อของแบคทีเรียระหว่างภายในคลองรากและเนื้อเยื่อรอบปลายรากภายหลังจากที่ทำความสะอาดคลองรากฟัน แต่การอุดวัสดุอุดคลองรากให้ได้แน่นเต็มโดยไม่ทำให้เกิดการเกินออกนอกปลายรากทำได้ค่อนข้างยาก จึงควรมีการกระตุ้นให้ปลายรากฟันปิดก่อนอุดหรืออาจสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันให้แน่นก่อนที่จะอุดคลองรากฟัน

การควบคุมการติดเชื้อหรือการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในคลองรากฟัน (Disinfection of the canals)

การกำจัดเชื้อแบคทีเรียอันเป็นสาเหตุของโรคของเนื้อเยื่อในและเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันเป็นสิ่งสำคัญที่จะก่อให้เกิดการหายของพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน (17) การขยายและการล้างคลองรากฟันเป็นขบวนการที่มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียในคลองรากฟัน แต่ก็ยังคงมีเชื้อแบคทีเรียหลงเหลืออยู่และสามารถเพิ่มจำนวนได้ในระหว่างครั้งของการรักษา (3) จากการศึกษาของ Bystrom และ Sundqvist ในปี 1983 (36) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของน้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite; NaOCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และน้ำเกลือในฟันตายและมีรอยโรครอบปลายรากฟันจำนวน 15 ซี่ โดยไม่ได้ใส่ยาในคลองรากฟัน ผลการศึกษาพบว่าแม้ว่าน้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อดีกว่าน้ำเกลือ แต่ก็ยังสามารถพบเชื้อหลงเหลืออยู่ภายในคลองรากฟันหลังการขยายและล้างคลองรากฟันได้ สอดคล้องกับ Bystrom และ Sundqvist ในปี 1985 (37) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของน้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ

น้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับสารละลายอีดีทีเอ (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) ผลการศึกษาพบว่าการล้างคลองรากฟันด้วยน้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับสารละลายอีดีทีเอมีประสิทธิภาพมากกว่าการล้างคลองรากฟันด้วยน้ำยาล้างคลองรากฟันโซเดียมไฮโปคลอไรต์เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามยังคงพบเชื้อแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ในคลองรากฟันภายหลังการขยายและล้างคลองรากฟัน ซึ่งเชื้อจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างครั้งของการรักษาเมื่อไม่ได้ใส่ยาไว้ในคลองรากฟัน Law และ Messer ในปี 2004 (4) พบว่าคลองรากฟันที่ได้รับการขยายและล้างคลองรากฟันแล้วยังสามารถพบเชื้อแบคทีเรียได้ถึงร้อยละ 62 โดยเชื้อที่หลงเหลืออาจอยู่ในบริเวณที่มีความซับซ้อนและเข้าถึงได้ยาก เช่น ส่วนคอด (Isthmuses) ส่วนแตกแขนงของคลองรากฟัน (Ramifications) คลองรากฟันเล็ก (Accessory canals) และท่อเนื้อฟัน (Dentinal tubules) (38) จะเห็นได้ว่าการทำความสะอาดทางกลเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียออกจากคลองรากฟันได้ทั้งหมด ดังนั้นการใส่ยาในคลองรากฟันเพื่อกำจัดเชื้อที่หลงเหลืออยู่จึงมีความจำเป็น

การเลือกใส่ยาที่ใส่ในคลองรากฟัน นอกจากจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) แล้ว ต้องไม่มีความเป็นพิษ (Non-toxicity) ต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันด้วย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Hermann ในปี 1920 เพื่อใช้ในการรักษาเนื้อเยื่อที่มีชีวิต หลังจากนั้นก็ถูกนำมาใช้เป็นยาใส่ในคลองรากฟันสำหรับฟันที่มีการติดเชื้อ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย มีความเป็นพิษน้อย ลดสิ่งซึมซับจากคลองรากฟัน ทำให้เกิดการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน และยังสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งที่บริเวณปลายรากฟัน ด้วยเหตุนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงเป็นยาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานรักษาคคลองรากฟัน (4)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีสูตรทางเคมี คือ Ca(OH)_2 ละลายน้ำได้น้อย มีค่าความเป็นกรดต่างสูง ประมาณ 12.5-12.8 เมื่อนำไปผสมกับสารละลายที่เป็นของเหลวจะส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์แตกตัวเป็นแคลเซียมไอออน (Calcium ions; Ca^{2+}) และไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions; OH^-) (39) ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนจะมีความเป็นด่างสูงและเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) จึงเกิดปฏิกิริยากับชีวโมเลกุลต่างๆ มากมาย ส่งผลให้เกิดการฆ่าเชื้อได้ ส่วนแคลเซียมไอออนจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง (5)

คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นได้เมื่อสัมผัสกับเชื้อโดยตรง ซึ่งการกำจัดเชื้อของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮดรอกซิลไอออนที่ปล่อยออกมาในสถานะที่มีความชื้น (5) โดยไฮดรอกซิลไอออนจะไปทำลายฟอสโฟลิปิด (Phospholipids component) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย และไฮดรอกซิลไอออนจะทำให้เกิดการสลายพันธะไอออนิกของโครงสร้างโปรตีน เป็นผลให้เอนไซม์ของแบคทีเรียไม่สามารถทำงานได้ เกิดการทำลายกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียการทำงาน นอกจากนี้ไฮดรอกซิลไอออนยังไปยับยั้งการจำลองตัวเองของดีเอ็นเอ (DNA replication) ทำให้สายดีเอ็นเอแยกออก เกิดการทำงานผิดปกติของเซลล์ (39)

การรักษาในฟันตายปลายรากเปิด

ปัจจุบันวิธีการรักษาในฟันตายปลายรากเปิดสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ การทำเอเพกซีพีเคชั่น (Apexification) การสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน (Apical barrier) และการทำรีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ (Regenerative Endodontics)

1. เอเพกซีพีเคชั่น (Apexification)

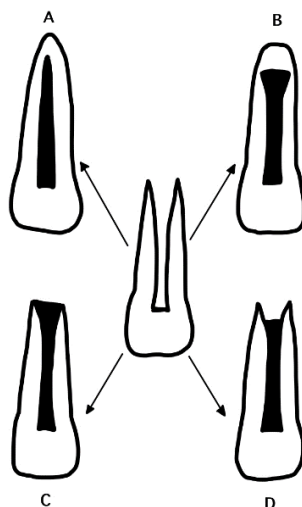
เอเพกซีพีเคชั่นเป็นกระบวนการเหนี่ยวนำให้ปลายรากฟันปิดโดยเกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง (Hard tissue formation) ในบริเวณปลายรากของฟันตายที่มีปลายรากเปิด (40) วัสดุที่นิยมนำมาใช้ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดย Kaiser ในปี 1964 ที่นำแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาผสมกับแคมเฟอเรตเตดโมโนคลอโรฟีนอล (Camphorated monochlorophenol) แล้วใช้เป็นยาใส่ในคลองรากฟัน เพื่อช่วยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งที่ปลายรากฟัน (32) และในปี 1966 Frank (41) ได้นำวิธีนี้มาใช้ในการรักษาฟันตายปลายรากเปิดซึ่งพบลักษณะการปิดของปลายรากฟันทั้งหมด 4 แบบ (ภาพประกอบ 2) ดังนี้

แบบที่ 1 (รูป A) ปลายรากปิดโดยมีการแคบเข้ามาของคลองรากฟัน รากฟันยาวขึ้น

แบบที่ 2 (รูป B) ปลายรากปิดโดยขนาดของคลองรากฟันกว้างเท่าเดิม

แบบที่ 3 (รูป C) มีการสร้างเนื้อเยื่อแข็งบริเวณปลายรากฟัน ขนาดของคลองรากฟันเท่าเดิม ดังนั้นจึงไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลงของปลายรากหรือคลองรากฟันในภาพรังสี แต่เมื่อใช้เครื่องมือตรวจสอบภายในคลองรากฟัน จะพบว่ามีจุดหยุดปลายราก

แบบที่ 4 (รูป D) มีการสร้างเนื้อเยื่อแข็งสร้างขึ้นในตำแหน่งสั้นกว่าปลายรากฟัน สามารถเห็นได้จากภาพรังสี



ภาพประกอบ 3 ลักษณะการปิดของปลายรากฟัน (41)

ต่อมาเกิดการเปลี่ยนแปลงสารละลายที่นำมาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากพบว่าแคมเฟอเรตเตดโมโนโคลโรฟีนอลมีความเป็นพิษต่อน้ำเยื่อ ดังนั้นในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่จึงนิยมผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับน้ำกลั่น (32)

ขั้นตอนในการรักษาเริ่มจากกำหนดความยาวในการทำงาน (Working length) ทำความสะอาดคลองรากฟันด้วยน้ำยาล้างคลองรากฟันไฮโปคลอไรต์ โดยระมัดระวังในการดันน้ำยาเกินออกไปนอกปลายรากฟัน หลังจากนั้นใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน อุดให้แน่นเต็มจากปลายรากฟันจนถึงคอฟัน และอุดปิดด้านบนด้วยวัสดุชั่วคราว นัดผู้ป่วยมาตรวจทางคลินิกและภาพรังสีทุก 3 เดือน และจะทำการอุดคลองรากฟันก็ต่อเมื่อพบว่าการปิดของปลายรากฟันแล้ว (17) แม้การรักษาด้วยวิธีนี้จะมีอัตราความสำเร็จ (Success rate) ของการรักษาค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 74-100 แต่ก็มีข้อด้อย คือ จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือของผู้ป่วยในการมาพบทันตแพทย์หลายครั้งเนื่องจากใช้ระยะเวลารักษาที่ยาวนาน ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 5-20 เดือน (42) โดยแต่ละการศึกษาจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยในการรักษาแตกต่างกัน (43-46) และยังมีความเสี่ยงในการติดเชื้อซ้ำ (Reinfection) หากเกิดการรั่วซึมของวัสดุอุดชั่วคราว (Coronal leakage) อีกทั้งการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลานานอาจเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดรากฟันแตกได้ จากการศึกษาของ Cvek ในปี 1992 (30) ที่ศึกษาการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันในฟันตัดหน้าบนที่เกิดอุบัติเหตุประเภทลักเซชัน (Luxation) เมื่อรักษาด้วยการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 885 ซี่ ผลการศึกษาพบว่าฟันที่ยังเจริญไม่สมบูรณ์ (Immature teeth) มีโอกาสเกิดการแตกหักบริเวณคอฟันมากกว่าฟันที่เจริญสมบูรณ์แล้ว (Mature teeth) และระยะในการพัฒนาของรากฟัน (Stage of root development)

ยังส่งผลต่อการแตกหักของรากฟันที่ยังเจริญไม่เต็มที่อีกด้วย โดยฟันที่มีการพัฒนาของรากฟันมากจะมีอัตราการเกิดการแตกหักน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟันที่มีการพัฒนาของรากฟันน้อย

จากข้อเสียดังกล่าวของการทำเอเพกซิฟิเคชันโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide apexification) จึงได้มีผู้พยายามคิดค้นทางเลือกอื่นเพื่อลดเวลาในการรักษาลง แต่ยังคงสามารถทำให้เกิดแนวกันที่ปลายรากฟันได้สมบูรณ์ จึงเป็นที่มาของวิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน (Apical barrier)

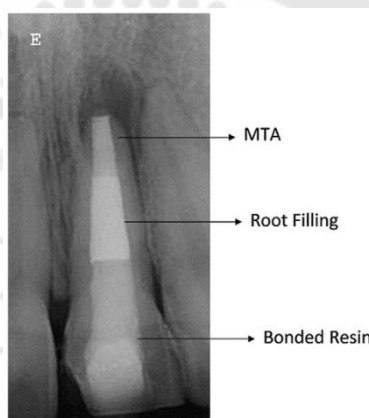
2. การสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน (Apical barrier)

การสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน เป็นหนึ่งในทางเลือกการรักษาฟันแท้ปลายรากเปิดที่มีการตายของเนื้อเยื่อใน โดยนำวัสดุมาใช้อุดปิดบริเวณปลายรากเพื่อสร้างจุดหยุดของปลายรากฟันแทนการเกิดเนื้อเยื่อแข็งกันตามธรรมชาติ ทำให้สามารถอุดคลองรากฟันได้อย่างสมบูรณ์ ลดระยะเวลาในการรักษา ทำให้สามารถบูรณะฟันได้อย่างรวดเร็ว (15) โดยจากการศึกษาของ Plascencia และคณะในปี 2017 (47) แนะนำให้ทำการรักษาด้วยวิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันในฟันปลายรากเปิดที่มีการพัฒนาของรากฟันในระยะที่ 3 ตามการจำแนกของ Cvek (30)

ปัจจุบันนี้มีการนำวัสดุไบโอเซรามิกส์ (Bioceramics) เช่น ไบรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลล์ เรโทรเอ็มทีเอ มาใช้ในการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ให้ความแนบสนิทที่ดี (25) โดยจากการศึกษาของ Torabinejad และคณะในปี 1995 (48) ที่ทำการศึกษาในฟันสุนัขที่มีการติดเชื้อ และในปี 1997 (49) ที่ทำการศึกษาในฟันปกติของลิง พบว่าฟันที่อุดปิดปลายรากด้วยเอ็มทีเอจะพบการอักเสบบริเวณปลายรากฟันน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟันที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยอะมัลกัม (Amalgam) สอดคล้องกับการศึกษาของ Economides และคณะในปี 2003 (50) ที่ดูการตอบสนองในระยะสั้นของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันต่อเอ็มทีเอเมื่อใช้เป็นวัสดุอุดปิดปลายราก ผลการศึกษาพบการสร้างเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissue) บริเวณปลายรากฟัน มีการอักเสบเล็กน้อย อีกทั้งยังมีการสร้างเนื้อเยื่อแข็งอีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าเอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อรอบปลายราก มีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ และสามารถกระตุ้นให้มีการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อรอบปลายรากได้

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันจะต้องมีความหนาของวัสดุอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร โดยจากการศึกษาของ Trope ในปี 2010 (17) กล่าวว่าเอ็มทีเอที่จะนำมาใส่ในคลองรากฟัน ต้องมีความหนาของเอ็มทีเอจากปลายรากขึ้นมาประมาณ 3-

4 มิลลิเมตร จากนั้นให้ใส่สำลีชุบน้ำหมาดๆ ไว้ในคลองรากฟัน ทิ้งไว้ประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อรอเวลาให้เอมที่เอนแข็งตัวเต็มที่แล้วค่อยทำการอุดคลองรากฟัน และในคลองรากฟันส่วนต้นอาจเสริมความแข็งแรงด้วยการอุดเรซินคอมโพสิต (Resin composite) (17) (ภาพประกอบ 4) Matt และคณะในปี 2004 (51) ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแนบสนิทและความแข็งแรงของเอมที่เอนที่ระดับความหนา 2 และ 5 มิลลิเมตร พบว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอมที่เอนที่ความหนา 5 มิลลิเมตร มีความแนบสนิทและแข็งแรงมากกว่าที่ความหนา 2 มิลลิเมตรภายหลังจากวัสดุก่อตัวเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง สอดคล้องกับการศึกษาของ Martin และคณะในปี 2007 (52) ที่พบว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอมที่เอนที่มีความหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร มีความแนบสนิทที่ดีไม่ต่างจากการอุดเอมที่เอนตลอดทั้งความยาวรากฟัน



ภาพประกอบ 4 วิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันด้วยเอมที่เอน (17)

จากข้อดีของการรักษาด้วยวิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน และด้วยคุณสมบัติของวัสดุอุดปิดปลายรากฟัน ส่งผลให้มีอัตราความสำเร็จในการรักษาสูง จากการศึกษาของ Simon และคณะในปี 2007 (15) ที่ทำการติดตามผลการรักษาโดยการใช้อีมที่เอนเป็นวัสดุอุดปิดปลายรากฟันในผู้ป่วยจำนวน 50 คน เป็นระยะเวลา 6 และ 12 เดือน ประเมินลักษณะทางคลินิก ร่วมกับการถ่ายภาพรังสี พบว่าผู้ป่วยไม่มีอาการใดๆ ค่าพีเอไอสกอร์ (PAI score) มีค่าลดลง และรอยโรครอบปลายรากฟันมีขนาดลดลง แสดงให้เห็นว่ามีการหายของรอยโรครอบปลายรากฟัน ซึ่งพบได้ร้อยละ 81 Jeeruphan และคณะในปี 2012 (18) พบว่าการรักษาด้วยวิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟันด้วยเอมที่เอนมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 95 สูงกว่าการทำเอเพกซิฟิเคชันด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอัตราความสำเร็จร้อยละ 77.2 สอดคล้องกับการศึกษาของ El Meligy และคณะในปี 2006 (53) ที่เปรียบเทียบการรักษาในฟันหน้าบนแท้ที่ปลายรากเปิดของมนุษย์ด้วยวิธีการทำเอเพกซิฟิเคชันด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 15 ซี่ กับวิธีการสร้างแนวกันปิดปลาย

รากฟันด้วยเอ็มทีเอ จำนวน 15 ที่ ประเมินผลจากการตรวจทางคลินิกและทางภาพรังสี โดยติดตามอาการเป็นระยะเวลา 3 เดือน 6 เดือน และ 12 เดือน ผลการศึกษาพบว่าผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยวิธีเอเพกซีพีเคชั่นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีอัตราความสำเร็จร้อยละ 87 ในขณะที่วิธีการสร้างแนวกันปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 100

3. รีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ (Regenerative Endodontics)

รีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ คือ ขบวนการทางชีวภาพเพื่อให้เกิดการซ่อมแซมด้วยกลไกตามธรรมชาติ (Physiologic) เพื่อทดแทนในส่วนของเนื้อฟัน รากฟัน รวมทั้งเซลล์ของพัลพ์เดนทินคอมเพล็กซ์ (Pulp-dentine complex) โดยยึดหลักของวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) และให้ความสนใจกับองค์ประกอบหลัก คือ เซลล์ต้นกำเนิด (Stem cell) หรือโปรเจเนเตอร์ เซลล์ (Progenitor cell) สแคฟโฟลด์ (Scaffold) หรือโครงแบบ (Matrix) และสารหลังจากเซลล์ที่ส่งสัญญาณกระตุ้นกำเนิดรูป (Morphogenesis) ที่เรียกว่า มอร์โฟเจน (Morphogen) หรือโกรวธแฟกเตอร์ (Growth factor) (54, 55) มีหลักการ คือ การกำจัดสาเหตุการติดเชื้อโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือยาปฏิชีวนะภายในคลองรากฟัน หลังจากนั้นทำการกระตุ้นให้เกิดลิ้มเลือดเพื่อหวังผลให้มีเซลล์ต้นกำเนิดที่มีความสามารถในการเพิ่มจำนวนและเปลี่ยนแปลงหน้าที่ไปเป็นเซลล์ที่มีความสามารถเฉพาะเข้ามาภายในคลองรากฟัน ซึ่งส่งเสริมให้มีการปิดของปลายรากฟันร่วมกับการหนาตัวของผนังคลองรากฟันและรากฟันยาวขึ้น (56) จากการศึกษาของ Bose และ Hargreaves ในปี 2009 (57) เปรียบเทียบการรักษาในฟันแท้ปลายรากเปิดด้วยวิธีการทำเอเพกซีพีเคชั่นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ฟอร์โมครีโซล (Formocresol) เป็นยาในคลองรากฟัน และวิธีรีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ โดยมีวิธีการสร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน และการรักษาคลองรากฟัน (Root canal treatment) เป็นกลุ่มควบคุม ทำการประเมินผลการรักษาจากภาพถ่ายรังสี โดยจะดูความยาวของรากฟัน และความหนาของเนื้อฟันส่วนรากที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการศึกษาพบว่าการรักษาด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ ทำให้ความยาวของรากฟันและความหนาของเนื้อฟันส่วนรากเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีการรักษาอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ข้อจำกัดในการรักษาด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ เอ็นโดดอนติกส์ คือ ผู้ป่วยมีอาการแพ้ยาปฏิชีวนะที่ใส่ในคลองรากฟัน หรือในกรณีที่ฟันซี่นั้นจำเป็นต้องใส่เดือยฟัน (56, 58) หรือในบางกรณีที่มีการพัฒนาของรากฟันใกล้จะสมบูรณ์ เช่น ระยะการพัฒนารากฟันในระยะที่ 4 แบ่งตามการศึกษาของ Cvek ในปี 1992 (30) ที่มีผนังคลองรากฟันขนานและมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดปลายรากฟันขนาดจำกัด (มีการปิดของปลายรากฟันบางส่วน) เป็นผลให้เซลล์ต้นกำเนิดเข้า

มาภายในคลองรากฟันได้จำกัด และหากจะใช้การกระตุ้นการสร้างแนวกันปิดปลายรากฟันจะใช้เวลานาน และอาจพบการปิดปลายรากฟันเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการหนาตัวของผนังคลองรากฟันและความยาวรากฟันที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Kling และคณะในปี 1986 (59) ได้ศึกษาการเกิดรีวาสคิวลาไรเซชัน (revascularization) ภายหลังจากปลูกฟันกลับ (Reimplant) ในฟันหน้าจำนวน 154 ซี่ ซึ่งเป็นฟันแท้ที่ยังเจริญไม่เต็มที่ (เส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดปลายรากฟันกว้าง 1.1-5 มิลลิเมตร) และฟันแท้ที่เจริญเต็มที่แล้ว (เส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดปลายรากฟันกว้างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร) จากนั้นติดตามผลการรักษาจากภาพรังสีเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 18 เดือน ผลการศึกษาพบว่าในฟันแท้ที่ยังเจริญไม่เต็มที่ที่มีการเกิดรีวาสคิวลาไรเซชันมากกว่าในฟันแท้ที่เจริญเต็มที่แล้ว คิดเป็นร้อยละ 18

วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (Calcium silicate cement; CSC)

วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์จัดเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cements) ชนิดหนึ่ง ซึ่งหมายถึง ปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำ สารประกอบหลักในส่วนผง ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) (25) โดยการก่อตัวของวัสดุจะเกิดขึ้นภายหลังการผสมส่วนผงรวมกับน้ำ ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ จะละลายตัวและทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) เกิดเป็นสารประกอบไฮเดรต (Hydrate) และมีการปลดปล่อยไอออนต่างๆ ออกมารอบวัสดุในปริมาณมากจนมีการตกตะกอนเกิดขึ้น (Precipitation) โดยกลไกในการก่อตัวประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และปฏิกิริยาตกตะกอน (Precipitation reaction) (60)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาที่ส่วนประกอบต่างๆ จะมีการละลาย และเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ โดยจะเกิดขึ้นหลังจากแคลเซียมซิลิเกตในส่วนผงรวมตัวกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium silicate hydrate gel) ซึ่งช่วงแรกมีลักษณะคอลลอยด์ (Colloid) และจะแข็งตัวขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป รวมถึงมีการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาเป็นระยะ ดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 (61)

ปฏิกิริยาที่ 1 ไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต



ปฏิกิริยาที่ 2 ไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต



ปฏิกิริยาตกตะกอน เป็นปฏิกิริยาที่ไอออนต่างๆ ถูกปล่อยออกมาจนเกิดเป็นสภาวะสารละลายอิ่มตัวสูงและเกิดการตกตะกอนในที่สุด ซึ่งเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีการสัมผัสกับสารเหลวในเนื้อเยื่อ (Tissue fluid) จะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน (Phosphate ion) ที่มีอยู่ในสารเหลว ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) และก่อตัวเป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite crystals) ดังปฏิกิริยาที่ 3 (60)

ปฏิกิริยาที่ 3 ปฏิกิริยาการเกิดผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์



คุณสมบัติเด่นของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) ไม่หดตัว มีความคงตัวทางเคมี มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อจุลชีพ (Antibacterial) มีความแนบสนิทที่ดี ไม่ทำให้เกิดการอักเสบที่รุนแรงบริเวณปลายรากฟันหากมีการอุดเกิน และยังสามารถกระตุ้นให้เกิดผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ (62) ตัวอย่างของวัสดุในกลุ่มนี้ ได้แก่ เช่น เอ็มทีเอ (MTA) เอ็มทีเอแองเจิลัส (MTA Angelus) เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA) (24, 25)

1. มินอรัลไตรออกไซด์ แอกริเกต หรือเอ็มทีเอ (mineral trioxide aggregate, MTA)

เอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีการพัฒนามาจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) โดยกระบวนการผลิตของเอ็มทีเอเกิดจากการเผา (Sintering) ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่คล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (63)

วัตถุดิบหลักของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วยหินปูน (Limestone; CaCO_3) และแผ่นหิน (Shale) โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำวัตถุดิบหลักไปบด แล้วนำไปเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ภายใต้อุณหภูมิสูง 1500 องศาเซลเซียส จนเกิดการก่อตัวของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) หลังจากนั้นจะลดอุณหภูมิลงเหลือ 1100-1200 องศาเซลเซียสจนเกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) ขณะเดียวกันก็เริ่มมีการสร้างผลึกของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) ร่วมกับการเติมยิปซัม (Gypsum) ลงไปเพื่อควบคุมระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์ (64) อย่างไรก็ตามกระบวนการเผาของเอ็มทีเอมีการควบคุมในห้องปฏิบัติการให้มีปริมาณของอะลูมิเนียม (Aluminium) น้อยกว่า และมีปริมาณของยิปซัม (Gypsum) เป็นครึ่งหนึ่งของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ส่งผลให้เอ็มทีเอ

มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกัน รวมถึงมีระยะเวลาก่อตัวที่นานขึ้น (65) นอกจากนี้กระบวนการเผาแล้ว เอ็มทีเอยังต้องผ่านกระบวนการที่ทำให้วัสดุมีความบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่กำหนดสารปนเปื้อนและโลหะหนัก เช่น โครเมียม (Cr) สารหนู (As) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) และสตรอนเชียม (Sr) จึงทำให้เอ็มทีเอมีความเป็นพิษต่อเซลล์น้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (26)

ในวงการเอ็นโดดอนติกส์ (Endodontics) มีการนำเอ็มทีเอมาใช้เป็นครั้งแรกช่วงปี 1993 เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมรอยทะลุบริเวณรากฟัน (Perforation repair) และการอุดย่นปลายรากฟัน (Root-end filling material) (66) จนถึงปัจจุบันนี้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการรักษาอย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อใน (Pulp capping material) และใช้สร้างแนวกันปิดส่วนปลายรากฟัน เนื่องจากเอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ และมีความแนบสนิทที่ดี (62) นอกจากนี้เอ็มทีเอยังได้รับการรับรองจากองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (FDA) ในปี 1998 และถูกจัดให้เป็นวัสดุที่มีมาตรฐานสูง (Gold standard) โดยมีชื่อทางการค้าว่า โปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot™ MTA) ซึ่งเริ่มแรกถูกผลิตออกมาในรูปแบบของเกรย์เอ็มทีเอ (Grey MTA) แต่เนื่องจากวัสดุมีสีเทาและสามารถทำให้ฟันเปลี่ยนสีได้ ต่อมาในปี 2002 จึงได้มีการผลิตเอ็มทีเอขึ้นใหม่ในรูปแบบของไวท์เอ็มทีเอ (White MTA) เพื่อให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น (67)

ส่วนผงของเอ็มทีเอมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่ละลายในน้ำได้โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate) แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม (Calcium sulfate dehydrate or gypsum) และมีเนอรัลออกไซด์ (Mineral oxide) อื่นๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide) ซึ่งช่วยให้ความทึบรังสี (ตาราง 1) (68) เอ็มทีเอมีแคลเซียมไอออน (Calcium ion) และฟอสเฟตไอออน (Phosphate ion) เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เอ็มทีเอมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพเมื่อสัมผัสกับเซลล์หรือเนื้อเยื่อ เนื่องจากไอออนดังกล่าวเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อแข็งของฟัน เอ็มทีเอสีขาวและสีเทามีส่วนประกอบคล้ายคลึงกัน แต่จะต่างกันตรงที่เอ็มทีเอสีขาวไม่มีเหล็ก (Iron) เป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้เอ็มทีเอยังมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (pH) ประมาณ 12.5 จึงทำให้มีความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ และยังส่งเสริมให้เกิดการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน (32) ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ประมาณ 165 นาที (69) และเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) 228.33 นาที (68) ส่วนค่าความทึบรังสีของเอ็มทีเอภายหลังการก่อตัว 3 ชั่วโมงจะเท่ากับ

แผ่นอะลูมิเนียมหนา 7.17 มิลลิเมตร เนื่องจากวัสดุอุดย่นปลายรากฟันควรมีความที่บร้งดีมากกว่าโครงสร้างบริเวณรอบๆ หรือวัสดุที่อยู่ใกล้เคียง นอกจากนี้เอนท์เอยังมีความที่บร้งดีมากกว่ากัตทาเพอร์ชาและเนื้อฟัน จึงสามารถแยกความแตกต่างได้ชัดเจนจากภาพรังสี (26)

ตาราง 1 ส่วนประกอบของเอนท์เอย

	ส่วนประกอบ	(wt%)	ผู้ผลิต
ส่วนผง	Tricalcium silicate (CaO) ₃ •SiO ₂	75	Dentsply Tulsa
	Dicalcium silicate (CaO) ₂ •SiO ₂		Dental, Tulsa, OK,
	Tricalcium aluminate (CaO) ₃ •Al ₂ O ₃		USA
	Bismuth oxide (Bi ₂ O ₃)	20	
	Calcium sulfate dehydrate (CaSO ₄) or gypsum	5	
ส่วนเหลว	Water	100	

ปัจจุบันนี้มีการนำเอนท์เอยมาใช้ในทางคลินิกอย่างแพร่หลาย และยังคงพบอัตราความสำเร็จทางคลินิกเป็นจำนวนมาก (70, 71) แต่เนื่องจากเอนท์เอยมีระยะเวลาในการก่อตัวที่ยาวนาน รวมถึงมีลักษณะทางกายภาพที่ยากต่อการใช้งาน และยังสามารทำให้ฟันเปลี่ยนสีได้จากการมีบิสมาท์ออกไซด์เป็นสารที่บร้งดี จึงมีการพัฒนาวัสดุชนิดต่างๆ ออกมาอย่างต่อเนื่องเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเอนท์เอย

2. เอนท์เอยแองเจลัส (MTA Angelus®)

เอนท์เอยแองเจลัสเป็นวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดหนึ่งที่มีการพัฒนาให้มีระยะเวลาในการก่อตัวสั้นลง ซึ่งกระบวนการผลิตของเอนท์เอยแองเจลัสเป็นกระบวนการเผาเช่นเดียวกับโปรรูทเอนท์เอย แต่มีความแตกต่างกันตรงที่เอนท์เอยแองเจลัสผลิตจากประเทศบราซิล ขณะที่โปรรูทเอนท์เอยผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา (26)

ส่วนประกอบในส่วนผงของเอนท์เอยแองเจลัสประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) ร้อยละ 80 ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate) แคลเซียมออกไซด์

(Calcium oxide) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) และบิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide) อีกร้อยละ 20 (ตาราง 2) (72) ซึ่งใช้เป็นสารที่บ่งชี้ เช่นเดียวกับโปรรูทเอ็มทีเอ แต่จะมีการนำส่วนผสมของแคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate) ออก เพื่อลดระยะเวลาในการก่อตัวลง (73) โดยมีเวลาก่อตัวเริ่มต้นประมาณ 10 นาที และเวลาก่อตัว สิ้นสุดท้าย 15 นาที (74)

ตาราง 2 ส่วนประกอบของเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์

	ส่วนประกอบ	(wt%)	ผู้ผลิต
ส่วนผง	Tricalcium silicate (CaO) ₃ •SiO ₂	80	Angelus, Londrina
	Dicalcium silicate (CaO) ₂ •SiO ₂		PR, Brazil
	Tricalcium aluminate (CaO) ₃ •Al ₂ O ₃		
	Calcium oxide (CaO)		
	Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)		
	Silicon dioxide (SiO ₂)		
	Bismuth oxide (Bi ₂ O ₃)	20	
ส่วนเหลว	Water	100	

นอกจากนี้เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ยังมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ มีความสามารถในการกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็งได้ และมีความแนบสนิทกับเนื้อฟันได้ดีไม่แตกต่างจากโปรรูทเอ็มทีเอ โดยจากการศึกษาของ Loyalakar และคณะในปี 2009 (74) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการปิดผนึก (Sealing ability) ของโปรรูทเอ็มทีเอและเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์เมื่อใช้เป็นวัสดุอุดปิดปลาย รากฟันที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร พบว่าทั้งโปรรูทเอ็มทีเอและเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์มีความสามารถในการปิดผนึกที่ดีและให้ผลไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Camilleri และคณะในปี 2013 (75) ที่ทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบในส่วนผงและวัสดุขณะก่อตัว พบว่าเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์มีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ค่อนข้างน้อย ขณะที่มีส่วนประกอบของไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) และซิลิกอนออกไซด์ (Silicon oxide) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาก่อนข้างมากกว่าวัสดุอื่น เนื่องจากกระบวนการเผาเม็ด ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) ของเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์มีอุณหภูมิต่ำเกินไป รวมถึง

แหล่งที่มาของวัตถุดิบมีความหลากหลาย ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ที่เกิดขึ้นของวัสดุไม่สม่ำเสมอ จึงอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุได้

3. เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA®)

เรโทรเอ็มทีเอเป็นวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น มีความเหมาะสมกับการใช้งาน และลดระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุ โดยกระบวนการผลิตของเรโทรเอ็มทีเอเป็นการสังเคราะห์ (Synthetic) จนได้ส่วนผสมที่มีความบริสุทธิ์ และไม่พบธาตุโลหะหนัก เช่น สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) ที่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อในร่างกาย ทำให้เรโทรเอ็มทีเอมีคุณสมบัติในเรื่องของความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและมีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ โดยจากการศึกษา Chung และคณะ ในปี 2016 (76) ทำการศึกษาผลของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่มีการก่อตัวเร็ว (Fast-setting calcium silicate cement) 2 ชนิด ได้แก่ เรโทรเอ็มทีเอ และเอ็นโดเซมเซอร์โคเนีย (Endocem Zr) ต่อความมีชีวิตของเซลล์เนื้อเยื่อในของมนุษย์เปรียบเทียบกับโปรรูทเอ็มทีเอ ผลการศึกษาพบว่าเรโทรเอ็มทีเอมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพไม่แตกต่างจากโปรรูทเอ็มทีเอ ขณะที่เอ็นโดเซมเซอร์โคเนียพบเซลล์เนื้อเยื่อในตายเล็กน้อย สอดคล้องกับการศึกษาของ Pomamazeh และคณะในปี 2017 (77) ที่เปรียบเทียบผลของแคลเซียมเอ็นริชเม็กซ์เจอร์ (Calcium- Enriched Mixture Cement) เรโทรเอ็มทีเอ และเอ็มทีเอเองเจิ้ลส์ต่อความมีชีวิตของเซลล์ไฟโบรบลาสต์ (Fibroblast cells) ของหนู โดยจะวัดความมีชีวิตของเซลล์ที่ระยะเวลา 1 24 และ 72 ชั่วโมง พบว่าเรโทรเอ็มทีเอมีปริมาณของเซลล์ไฟโบรบลาสต์สูงกว่าแคลเซียมเอ็นริชเม็กซ์เจอร์และเอ็มทีเอเองเจิ้ลส์ในทุกช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

ส่วนผสมของเรโทรเอ็มทีเอประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate), ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide) และแคลเซียมเซอร์โคเนียเชิงซ้อน (Hydraulic calcium zirconia complex) ส่วนเหลวจะใช้น้ำเป็นตัวผสม (ตาราง 3) ขนาดอนุภาคในส่วนผสมของเรโทรเอ็มทีเอจะมีความละเอียดและเล็กกว่าโปรรูทเอ็มทีเอ ทำให้สามารถสัมผัสกับน้ำได้มากและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุลดลง ซึ่งพบว่าเรโทรเอ็มทีเอมีเวลาก่อตัวเริ่มต้นเพียง 150 วินาที (78) และเวลาก่อตัวสุดท้าย 18 นาที (79)

ตาราง 3 ส่วนประกอบของเรโอมิเอ

	ส่วนประกอบ	(wt%)	ผู้ผลิต
ส่วนผง	Calcium carbonate (CaCO ₃)	60-80	BioMTA, Seoul,
	Silicon dioxide (SiO ₂)	5-15	Korea
	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	5-10	
	Hydraulic calcium zirconia	20-30	
	complex		
ส่วนเหลว	Water	100	

การใช้แคลเซียมเซอร์โคเนียเชิงซ้อนเป็นสารที่บ่งชี้แทนบิสฟีนอลเอในเรโอมิเอถือเป็นจุดเด่นอย่างหนึ่ง เนื่องจากไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟัน จากการศึกษาของ Kang และคณะในปี 2015 (80) เปรียบเทียบการเปลี่ยนสีของฟันเมื่อทำการอุดด้วยโพลีเมอร์เรโอมิเอ เรโอมิเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเอ็นโดเซมเซอร์โคเนีย พบว่าเอ็นโดเซมเซอร์โคเนียและเรโอมิเอเอ็มทีเอมีการเปลี่ยนสีของฟันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์เรโอมิเอและเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ ดังนั้นเรโอมิเอจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในบริเวณที่ต้องการความสวยงาม

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

การคัดเลือกฟันที่ใช้ในการทดลอง

ก่อนเริ่มดำเนินการศึกษา ได้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (SWUEC/X-302/2565) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยในการศึกษานี้ใช้ฟันกรามน้อยล่างของมนุษย์ที่ถูกถอน ซึ่งมีรากเดียว จำนวน 50 ซี่ ทำการตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์ปฏิบัติการทันตกรรม (Dental Operating Microscope) ซึ่งฟันที่นำมาศึกษาจะต้องไม่มีรอยผุที่รากฟัน และไม่มีรอยร้าวหรือรอยแตก จากนั้นวัดขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์ดิจิทัล (Digital vernier caliper) ฟันที่ถูกคัดเลือกเข้ามาในการศึกษาต้องมีขนาดไม่แตกต่างกันเกิน 1 มิลลิเมตร แล้วนำฟันที่ได้ไปถ่ายภาพรังสีทั้งในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางเพื่อดูลักษณะคลองรากฟัน จำนวนและรูปร่างคลองรากฟัน โดยจะต้องมี 1 คลองรากฟันตามการจัดหมวดหมู่ของ Vertucci (ชนิดที่ 1) (81) มีรูปร่างตรงทั้งในระดับ 1 ใน 3 ของรากฟันส่วนคอฟัน (Cervical 1/3) และระดับ 1 ใน 3 ของรากฟันส่วนกลางราก (Middle 1/3) สามารถเห็นคลองรากฟันได้อย่างชัดเจน ไม่พบการละลายภายในคลองรากฟันหรือการตีบของคลองรากฟัน จากนั้นนำฟันมาทำความสะอาด กำจัดหินปูน และเศษเนื้อเยื่อ แล้วนำไปแช่ในไทมอล (Thymol) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 จนถึงเวลาที่จะนำมารักษา

การเตรียมฟันที่ใช้ในการทดลอง

ทำการตัดตัวฟันเหนือตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันและตัดปลายรากฟันในแนวขวางด้วยหัวกรอแผ่นคาร์โบรันดัม (Carborundum disc) โดยวัดจากตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันลงมา 9 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความยาวส่วนรากฟันประมาณ 9 มิลลิเมตร (82) นำเนื้อเยื่อในออกด้วยบาร์บโบช (Barbed broach : Kerr Corporation, Orange, CA) แล้วใช้ไฟล์ชนิดเค (K-file) เบอร์ 20 (Dentsply Sirona, Ballaigues, Switzerland) ตรวจสอบความโค้งของคลองรากฟัน จากนั้นเตรียมคลองรากฟันด้วยพีโซรีมเมอร์ (Peeso reamer) ขนาด 1-6 ตามลำดับ (ManiInc., Tochigi, Japan) โดยทำการขยายตลอดคลองรากฟันจนทะลุออกนอกปลายรากฟัน 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟันเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะฟันปลายรากเปิดที่มีการพัฒนาของรากฟันในระยะที่ 3 ตามการจำแนกของ Cvek (30) (ภาพประกอบ 5) ในระหว่างขั้นตอนการทำจะ

ล้างคลองรากฟันด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายอีดีทีเอความเข้มข้นร้อยละ 17 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใช้แท่งกระดาษซับรูปกรวยแหลม (Absorbent paper points) ซักในคลองรากฟันให้แห้ง นำฟันไปถ่ายภาพรังสีในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางอีกครั้งเพื่อดูลักษณะของคลองรากฟันที่เตรียมไว้ โดยฟันที่จะนำมาเข้าร่วมในการศึกษาต้องมีรูปร่างคลองรากฟันขนานเท่ากันตลอดความยาวของคลองรากฟัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณปลายรากฟัน 1.7 มิลลิเมตร ทำการวัดความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟันด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียดิจิตอล (83) จากนั้นฟันทั้งหมดจะถูกสุ่มแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ซี่ ได้แก่ กลุ่มควบคุม 2 กลุ่ม (กลุ่มควบคุมแบบลบและกลุ่มควบคุมแบบบวก) และกลุ่มทดลอง 3 กลุ่ม



ภาพประกอบ 5 การเตรียมฟันในการทดลอง

การเตรียมกลุ่มทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot® MTA, Dentsply Tulsa dental, Tulsa OK, USA) เอ็มทีเอแองเจิลส์ (MTA Angelus®, Angelus, Londrina, PR, Brazil) และเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA®, BioMTA, Seoul, Korea) (ภาพประกอบ 6)



ภาพประกอบ 6 ก.โปรรูทเอ็มทีเอ ข.เอ็มทีเอแองเจิลส์ ค.เรโทรเอ็มทีเอ

กลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุมแบบลบ (Negative control group) เป็นกลุ่มของรากฟันจำลอง สภาวะปลายรากฟันเปิดที่ไม่ได้รับการรักษาใดๆ (ภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 7 กลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุมแบบลบ

กลุ่มที่ 2-5 จะทำการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์แบบสำเร็จรูป (Ultracal[®] XS, Ultradent Products, Inc.) ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน ร่วมกับอุดปิดด้านบนด้วยวัสดุอุดชั่วคราวเควิตจี (Cavit-G, 3M ESPE, St.Paul, Minnesota, USA) ความหนา 2 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 8) แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 เดือน ทำการกำจัดวัสดุอุดชั่วคราวออก และกำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันด้วยไฟล์ชนิดเค (K-file) เบอร์ 80 (Dentsply Sirona, Ballaigues, Switzerland) ล้างคลองรากฟันด้วยสารละลายไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายอีดีทีที่เอความเข้มข้นร้อยละ 17 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใช้แท่งกระดาษซับรูปกรวยแหลม ซับในคลองรากฟันให้แห้ง



ภาพประกอบ 8 การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน
ร่วมกับอุดปิดด้านบนด้วยวัสดุอุดชั่วคราว

กลุ่มที่ 2 กลุ่มควบคุมแบบบวก (Positive control group) เป็นกลุ่มของรากฟันจำลอง สภาวะปลายรากฟันเปิดที่ผ่านการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน และไม่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟัน (ภาพประกอบ 9)



ภาพประกอบ 9 กลุ่มที่ 2 กลุ่มควบคุมแบบบวก

กลุ่มที่ 3-5 เป็นกลุ่มทดลอง (Experimental groups) ที่ผ่านการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน แล้วได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (ภาพประกอบ 10) โดย

กลุ่มที่ 3 อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot[®] MTA, Dentsply Tulsa dental, Tulsa OK, USA) ที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร

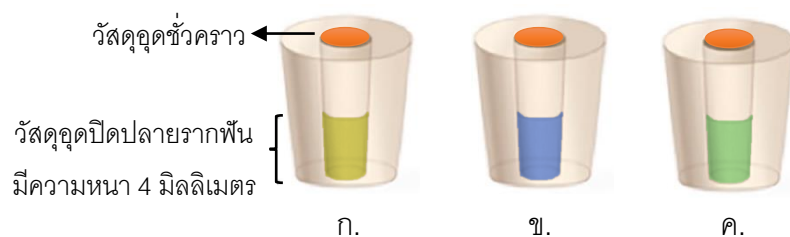
กลุ่มที่ 4 อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิลส์ (MTA Angelus[®], Angelus, Londrina, PR, Brazil) ที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร

กลุ่มที่ 5 อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA[®], BioMTA, Seoul, Korea) ที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร

การเตรียมโปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot[®] MTA, Dentsply Tulsa dental, Tulsa OK, USA) ให้ผสมส่วนผงและส่วนน้ำในอัตราส่วน 3:1 ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ผสมจนมีลักษณะเป็นก้อนปั้นได้แล้วนำไปอุดปิดปลายรากฟันที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร วิธีการทำคือ วางฟันลงบนแผ่นแก้ว (Glass slab) ให้ส่วนของปลายรากฟันสัมผัสกับแผ่นแก้วเพื่อป้องกันการหลุดวัสดุเกินออกปลายรากฟัน จากนั้นนำวัสดุใส่ในคลองรากฟัน กดวัสดุให้แนบกับผนังคลองรากฟันด้วยเอ็นโดคอนติคพลาจเจอร์ (Endodontic plugger) ร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (P5 Newtron XS[™], Acteon, North America) โดยจะใช้หัวอัลตราโซนิก (Ultrasonic Scaling tip, Satelec[®]) สัมผัสกับเอ็นโดคอนติคพลาจเจอร์ ใช้ความแรงของการสั่นที่ระดับ 4 จากนั้นนำแท่งกระดาษซับที่มีลักษณะเปียกเล็กน้อยกดที่วัสดุ เช็ดทำความสะอาดผนังคลองรากฟัน วัดความหนาของวัสดุด้วยเครื่องมือตรวจปริทันต์ (Periodontal probe) นำรากฟันไปถ่ายภาพรังสีเพื่อตรวจสอบความแน่นของวัสดุ วางสำลีชุบน้ำบนวัสดุภายในคลองรากฟัน อุดปิดด้านบนด้วยวัสดุอุดชั่วคราวเควิตจี (Cavit-G, 3M ESPE, St. Paul, Minnesota, USA) ความหนา 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) (28) เป็นระยะเวลา 1 วัน

การเตรียมเอ็มทีเอแองเจิลส์ (MTA Angelus[®], Angelus, Londrina, PR, Brazil) จะผสม ส่วนผง 1 ซ้อนและส่วนน้ำ 1 หยด ผสมเป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้เป็นเนื้อเดียวกันที่มีลักษณะ ทรายเปียกน้ำ (Wet sand) แล้วนำไปอุดปิดปลายรากฟันที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร วิธีการทำ คือ วางฟันลงบนแผ่นแก้วให้ส่วนของปลายรากฟันสัมผัสกับแผ่นแก้วเพื่อป้องกันการอุดวัสดุเกิน ออกนอกปลายรากฟัน จากนั้นนำวัสดุใส่ในคลองรากฟัน กดวัสดุให้แนบกับผนังคลองรากฟันด้วย เอ็นโดดอนติกพลาซมัลกเกอร์ร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (P5 Newtron XS[™], Acteon, North America) โดยจะใช้หัวอัลตราโซนิก (Ultrasonic Scaling tip, Satelec[®]) สัมผัสกับเอ็นโด ดอนติกพลาซมัลกเกอร์ ใช้ความแรงของการสั่นที่ระดับ 4 จากนั้นนำแท่งกระดาษซับที่มีลักษณะเปียก เล็กน้อยกดที่วัสดุ เช็ดทำความสะอาดผนังคลองรากฟัน วัดความหนาของวัสดุด้วยเครื่องมือตรวจ ปริทัศน์ นำรากฟันไปถ่ายภาพรังสีเพื่อตรวจสอบความแน่นของวัสดุ วางสำลีชุบน้ำบนวัสดุภายใน คลองรากฟัน อุดปิดด้านบนด้วยวัสดุอุดชั่วคราวเควิตจี (Cavit-G, 3M ESPE, St.Paul, Minnesota, USA) ความหนา 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ใน สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (28) เป็นระยะเวลา 1 วัน

การเตรียมเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA[®], BioMTA, Seoul, Korea) จะผสมส่วนผงเท่ากับ 0.3 กรัมต่อส่วนน้ำจำนวน 3 หยด ตามที่บริษัทแนะนำ จากนั้นผสมทั้งสองส่วนให้เป็นเนื้อเดียวกัน อย่างเบามือเป็นเวลา 20 วินาที จนวัสดุมีลักษณะชุ่มไปด้วยของเหลว รอจนกระทั่งพื้นผิวของวัสดุ ที่มีลักษณะมันวาวหายไป แล้วนำไปอุดปิดปลายรากฟันที่ระดับความหนา 4 มิลลิเมตร วิธีการทำ คือ วางฟันลงบนแผ่นแก้วให้ส่วนของปลายรากฟันสัมผัสกับแผ่นแก้วเพื่อป้องกันการอุดวัสดุเกิน ออกนอกปลายรากฟัน จากนั้นนำวัสดุใส่ในคลองรากฟัน กดวัสดุให้แนบกับผนังคลองรากฟันด้วย เอ็นโดดอนติกพลาซมัลกเกอร์ร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (P5 Newtron XS[™], Acteon, North America) โดยจะใช้หัวอัลตราโซนิก (Ultrasonic Scaling tip, Satelec[®]) สัมผัสกับเอ็นโด ดอนติกพลาซมัลกเกอร์ ใช้ความแรงของการสั่นที่ระดับ 4 จากนั้นนำแท่งกระดาษซับที่มีลักษณะเปียก เล็กน้อยกดที่วัสดุ เช็ดทำความสะอาดผนังคลองรากฟัน วัดความหนาของวัสดุด้วยเครื่องมือตรวจ ปริทัศน์ นำรากฟันไปถ่ายภาพรังสีเพื่อตรวจสอบความแน่นของวัสดุ วางสำลีชุบน้ำบนวัสดุภายใน คลองรากฟัน อุดปิดด้านบนด้วยวัสดุอุดชั่วคราวเควิตจี (Cavit-G, 3M ESPE, St.Paul, Minnesota, USA) ความหนา 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ใน สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (28) เป็นระยะเวลา 1 วัน



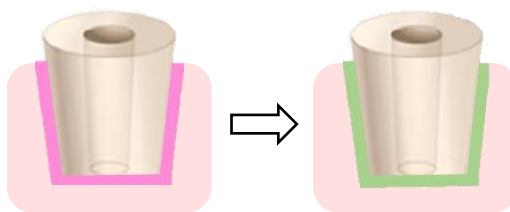
ภาพประกอบ 10 กลุ่มทดลองที่ผ่านการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน แล้วได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

ก.กลุ่มที่ 3 โปรรูทเอ็มทีเอ (สีเหลือง) ข.กลุ่มที่ 4 เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ (สีน้ำเงิน)

ค.กลุ่มที่ 5 เวโทรเอ็มทีเอ (สีเขียว)

การทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟัน

หลังจากที่นำรากฟันไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว รากฟันแต่ละซี่จะถูกนำมาสร้างเอ็นยึดปริทันต์จำลอง (Periodontal ligament; PDL) โดยจะนำรากฟันมาจุ่มซีเมนต์เหลวเป็นเวลา 1 วินาที ให้มีความหนาประมาณ 0.2-0.3 มิลลิเมตร และมีระยะห่างจากขอบรากฟันด้านบน 2 มิลลิเมตร (29) จากนั้นนำรากฟันไปยึดกับเครื่องสำรวจความขนาน (Surveyor) เพื่อให้มั่นใจว่าแนวแกนของรากฟันจะตั้งฉากกับผิวด้านบนของเรซินอะคริลิก (84) แล้วค่อยๆ จุ่มฟันลงไปใส่ในเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง (Self-cure acrylic resin) ที่อยู่ในวงแหวนพอลิไวนิลคลอไรด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร โดยจะต้องมีระยะห่างระหว่างส่วนบนของเรซินอะคริลิกกับขอบรากฟันด้านบน 2 มิลลิเมตร เพื่อจำลองความสัมพันธ์ระหว่างฟันและสันกระดูกเบ้าฟัน (Crestal bone) เมื่อเรซินอะคริลิกเกิดการบ่มตัวให้ทำเครื่องหมายที่รากฟันและบล็อครีซินอะคริลิก แล้วนำรากฟันออกจากบล็อกขณะที่เรซินอะคริลิกกำลังร้อน เช็ดทำความสะอาดผิวรากฟันและภายในบล็อกเพื่อกำจัดซีเมนต์ออก โดยบริเวณผิวรากฟันจะใช้ผ้าก๊อซแห้งเช็ด ส่วนภายในบล็อกจะใช้ไม้พันสำลีเช็ด จากนั้นทำการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนชนิดไลท์บอดี้ (Silagum[®] light, DMG, Germany) (ภาพประกอบ 11) แล้วใส่รากฟันกลับเข้าที่เดิมอีกครั้ง ตรวจสอบตำแหน่งให้ตรงกับเครื่องหมายที่ได้ทำไว้ก่อนหน้านี้ (ภาพประกอบ 12) และทำการกำจัดส่วนเกินของวัสดุออกด้วยมีดผ่าตัด (Scalpel blade) (83, 85)



ภาพประกอบ 11 การสร้างเอ็นยึดปริทันต์จำลองโดยนำรากฟันมาจุ่มด้วยขี้ผึ้งเหลว (สีชมพู) แล้วแทนที่ขี้ผึ้งด้วยวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนไลต์บอดี้ (สีเขียว)



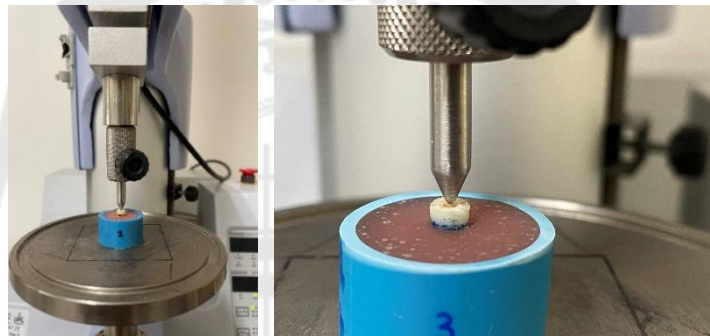
ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างชิ้นงานบล็อคเรซินอะคริลิก

หลังจากนั้นนำบล็อกเรซินอะคริลิกไปวางที่ตำแหน่งตรงกลางบนแท่นของเครื่องทดสอบแรงสากล (Universal Testing Machine, EZTest; Shimadzu, Kyoto, Japan) เพื่อให้แท่งหัวกดสามารถกดลงมาบริเวณกึ่งกลางของรากฟันส่วนต้นและสัมผัสกับเนื้อฟันส่วนรากฟันโดยตลอดทั้งคลองรากฟัน แท่งหัวกดที่ใช้ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมรูปทรงกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตรงปลาย 1 มิลลิเมตร ให้แรงกดในแนวตั้ง (Vertical load) ขนานกับแนวแกนของรากฟัน (86) (ภาพประกอบ 13) ด้วยความเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีจนเกิดการแตกหัก ทำการบันทึกค่าแรงกดด้วยหน่วยนิวตัน (Newton) (21) และบันทึกรูปแบบการแตกหักของรากฟัน (Fracture pattern) ที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ (83) ดังนี้ (ภาพประกอบ 14)

1. การแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก (Supraacrylic resin fracture)
2. การแตกของรากฟันอยู่ในระดับใต้เรซินอะคริลิก (Subacrylic resin fracture)
3. การแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้ง (Vertical root fracture)

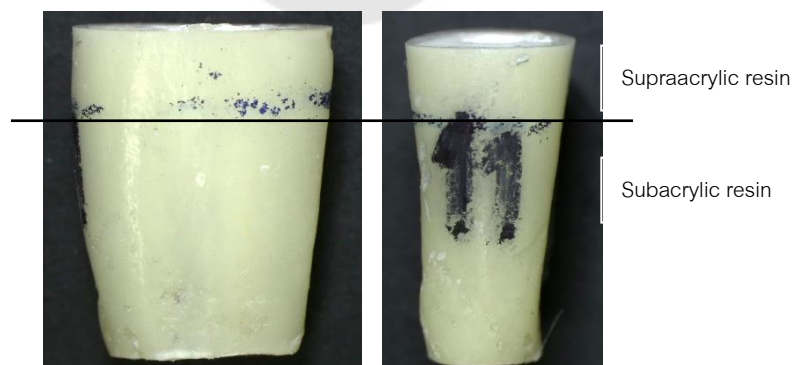


ก.



ข.

ภาพประกอบ 13 การทดสอบการแตกหักของรากฟันด้วยเครื่องทดสอบแรงสากด
 ก. เครื่องทดสอบแรงสากด ข. แท่งหัวกดทำมุมในแนวตั้งขนานกับแนวแกนของรากฟัน



ภาพประกอบ 14 การแบ่งระดับการแตกหักของรากฟันที่อยู่เหนือและใต้เรซินอะคริลิก

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistics 27; SPSS Inc., IL, USA) โดยจะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันของแต่ละกลุ่ม และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันหลังการเตรียมฟันของแต่ละกลุ่มด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ซึ่งกำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$

ทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดจากค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหัก โดยจะประเมินการแจกแจงของข้อมูลด้วยการทดสอบชาปิโร-วิลค์ (Shapiro-Wilk Test) และทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Homogeneity of variance) ด้วยวิธีการของเลอวีเน (Levene's test) จากนั้นจะใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงระหว่างกลุ่ม และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยสถิติทูเกย์ เอชเอสดี (Tukey's HSD) กำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$

เปรียบเทียบรูปแบบการแตกหักของฟันที่เกิดขึ้นด้วยสถิติเชิงพรรณนา โดยใช้ตารางแจกแจงความถี่แสดงร้อยละของลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลด์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน ซึ่งได้ทำการศึกษาในฟันกรามน้อยล่าง และเพื่อให้ได้ฟันที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงมีการควบคุมขนาดของฟัน โดยจะวัดขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน แล้วทำการสุ่มแบ่งฟันออกเป็น 5 กลุ่ม พบว่ากลุ่มควบคุมแบบลบมีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน เท่ากับ 7.16 ± 0.26 มิลลิเมตร และ 5.01 ± 0.23 มิลลิเมตร กลุ่มควบคุมแบบบวกมีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน เท่ากับ 7.16 ± 0.43 มิลลิเมตร และ 5.03 ± 0.33 มิลลิเมตร กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอมีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน เท่ากับ 7.16 ± 0.34 มิลลิเมตร และ 5.17 ± 0.27 มิลลิเมตร กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิลด์มีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน เท่ากับ 7.02 ± 0.44 มิลลิเมตร และ 5.08 ± 0.19 มิลลิเมตร และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอมีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางใกล้กลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน เท่ากับ 7.42 ± 0.68 มิลลิเมตร และ 5.12 ± 0.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟัน (มิลลิเมตร)

กลุ่ม	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	
	แนวใกล้แก้มใกล้ลิ้น	แนวใกล้กลางไกลกลาง
กลุ่มควบคุมแบบลบ	7.16 ± 0.26	5.01 ± 0.23
กลุ่มควบคุมแบบบวก	7.16 ± 0.43	5.03 ± 0.33
โปรรูทเอ็มทีเอ	7.16 ± 0.34	5.17 ± 0.27
เอ็มทีเอเองเจสต์	7.02 ± 0.44	5.08 ± 0.19
เรโทรเอ็มทีเอ	7.42 ± 0.68	5.12 ± 0.29
ค่า p-value	0.40	0.59

เมื่อนำค่าเฉลี่ยขนาดของฟันทั้ง 5 กลุ่มไปวิเคราะห์ด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่าทั้ง 5 กลุ่มมีขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้นและแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ภายหลังการคัดเลือกฟันที่ใช้ในการทดลอง ฟันเหล่านั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมคลองรากฟันเพื่อจำลองสภาวะฟันปลายรากเปิดที่มีการพัฒนาของรากฟันในระยะที่ 3 ตามการจำแนกของ Cvek (30) ด้วยพีชีริมเมอร์ (Peeso reamer) ขนาด 1-6 และเพื่อเป็นการควบคุมความหนาของเนื้อฟันในแต่ละกลุ่ม จะทำการวัดความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟัน ซึ่งพบว่ากลุ่มควบคุมแบบลบ กลุ่มควบคุมแบบบวก กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอเองเจสต์ และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ มีความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟันเท่ากับ 2.03 ± 0.06 มิลลิเมตร 2.03 ± 0.10 มิลลิเมตร 2.01 ± 0.07 มิลลิเมตร 2.05 ± 0.10 มิลลิเมตร และ 2.03 ± 0.07 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟันภายหลังการเตรียมฟันที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิเมตร)

กลุ่ม	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
	ความหนาของเนื้อฟัน
กลุ่มควบคุมแบบลบ	2.03 ± 0.06
กลุ่มควบคุมแบบบวก	2.03 ± 0.10
โปรรูทเอ็มทีเอ	2.01 ± 0.07
เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์	2.05 ± 0.10
เรโทรเอ็มทีเอ	2.03 ± 0.07
ค่า p-value	0.91

จากการนำค่าเฉลี่ยความหนาของเนื้อฟันทั้ง 5 กลุ่มไปวิเคราะห์ด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่าทั้ง 5 กลุ่มมีความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันและเคลือบฟันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

การทดสอบความต้านทานการแตกหักของรากฟัน

เมื่อนำรากฟันในแต่ละกลุ่มไปทดสอบความต้านทานการแตกหัก พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในกลุ่มควบคุมแบบบวกมีค่าต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ 239.98 ± 27.19 นิวตัน และกลุ่มควบคุมแบบลบมีค่าสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 543.33 ± 37.17 นิวตัน ตามมาด้วยกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอที่มีค่าเฉลี่ยของแรงกดเท่ากับ 432.82 ± 68.06 นิวตัน 396.92 ± 59.93 นิวตัน และ 389.08 ± 56.25 นิวตัน ดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหัก (นิวตัน)

กลุ่ม	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน)	ค่าต่ำสุด (นิวตัน)	ค่าสูงสุด (นิวตัน)
กลุ่มควบคุมแบบลบ	543.33 ± 37.17 ^a	506.55	626.50
กลุ่มควบคุมแบบบวก	239.98 ± 27.19 ^b	200.28	277.08
โปรรูทเอ็มทีเอ	432.82 ± 68.06 ^c	325.75	541.53
เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์	396.92 ± 59.93 ^c	328.55	507.88
เรโทรเอ็มทีเอ	389.08 ± 56.25 ^c	314.95	477.54
ค่า p-value	0.000		

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษตัวยกที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดจากค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักด้วยการทดสอบชาปิโรวิลค์ (Shapiro-Wilk test) และทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Homogeneity of variance) ด้วยวิธีการของเลอวีเน (Levene's test) พบว่าแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ และข้อมูลของทุกกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน

จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในกลุ่มควบคุมแบบลบ กลุ่มควบคุมแบบบวก กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ โดยพบว่าค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 7 และเมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยสถิติทูเกย์ เฮชเอสดี (Tukey's HSD) พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในกลุ่มควบคุมแบบลบที่มีค่าสูงที่สุดมีความแตกต่างจากกลุ่มควบคุมแบบบวก กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในกลุ่มควบคุมแบบบวกที่มีค่าต่ำที่สุดก็มี

ความแตกต่างจากกลุ่มควบคุมแบบลบ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจล์ส และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักทั้งในกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจล์ส และกลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตาราง 8 และภาพประกอบ 15

ตาราง 7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดที่ทำให้รากฟันเกิดการแตกหักในแต่ละกลุ่มด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	473530.740	4	118382.685	43.815	.000
Within Groups	121583.707	45	2701.860		
Total	595114.446	49			

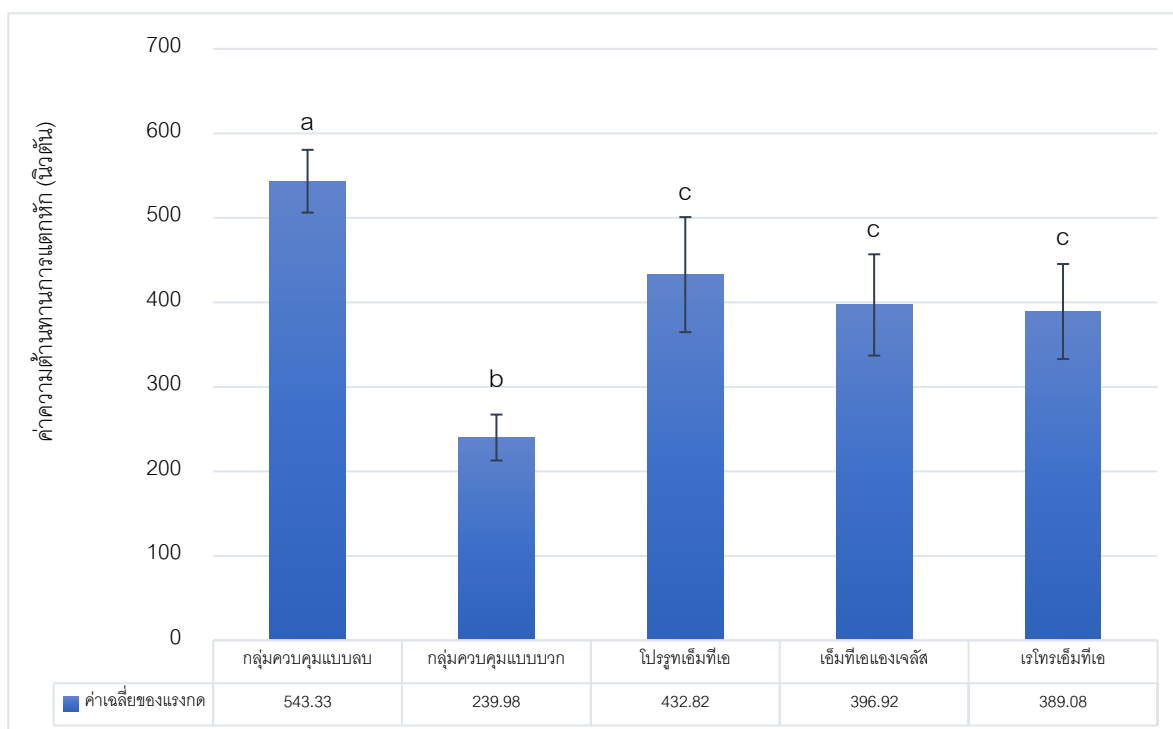
ตาราง 8 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยสถิติทูเก้ เอชเอสดี (Tukey's HSD)

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Negative control	Positive control	303.34500 [*]	23.24590	.000	237.2929	369.3971
	Proroot MTA	110.51000 [*]	23.24590	.000	44.4579	176.5621
	MTA Angelus	146.40250 [*]	23.24590	.000	80.3504	212.4546
	RetroMTA	154.24400 [*]	23.24590	.000	88.1919	220.2961
Positive control	Negative control	-303.34500 [*]	23.24590	.000	-369.3971	-237.2929
	Proroot MTA	-192.83500 [*]	23.24590	.000	-258.8871	-126.7829
	MTA Angelus	-156.94250 [*]	23.24590	.000	-222.9946	-90.8904
	RetroMTA	-149.10100 [*]	23.24590	.000	-215.1531	-83.0489

ตาราง 8 (ต่อ)

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Proroot MTA	Negative control	-110.51000*	23.24590	.000	-176.5621	-44.4579
	Positive control	192.83500*	23.24590	.000	126.7829	258.8871
	MTA Angelus	35.89250	23.24590	.540	-30.1596	101.9446
	RetroMTA	43.73400	23.24590	.342	-22.3181	109.7861
MTA Angelus	Negative control	-146.40250*	23.24590	.000	-212.4546	-80.3504
	Positive control	156.94250*	23.24590	.000	90.8904	222.9946
	Proroot MTA	-35.89250	23.24590	.540	-101.9446	30.1596
	RetroMTA	7.84150	23.24590	.997	-58.2106	73.8936
RetroMTA	Negative control	-154.24400*	23.24590	.000	-220.2961	-88.1919
	Positive control	149.10100*	23.24590	.000	83.0489	215.1531
	Proroot MTA	-43.73400	23.24590	.342	-109.7861	22.3181
	MTA Angelus	-7.84150	23.24590	.997	-73.8936	58.2106

* The mean difference is significant at the 0.05 level.



ภาพประกอบ 15 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดในหน่วยนิวตันที่ทำให้
รากฟันเกิดการแตกหักในแต่ละกลุ่ม

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษตัวย่อกที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

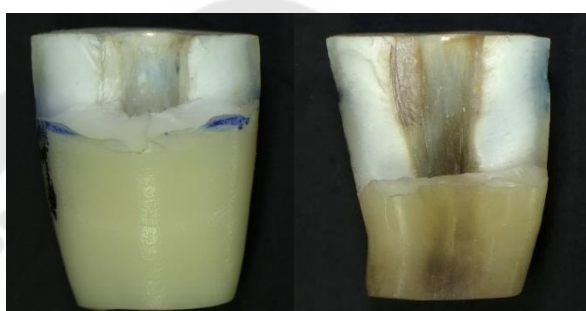
การศึกษารูปแบบการแตกหักของรากฟัน

ในการศึกษารูปแบบการแตกหักของรากฟันหลังจากการให้แรงกระทำจนเกิดการแตกหัก พบว่าส่วนใหญ่รอยแตกมีลักษณะเฉียงลง (Oblique fracture) ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการแตกหักของรากฟันพบทั้งการแตกระดับเหนือเรซินอะคริลิก และการแตกระดับใต้เรซินอะคริลิก ส่วนการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้งพบได้บ้างเล็กน้อย ดังแสดงในภาพประกอบ 16



ก.

ข.



ก.

ข.

ภาพประกอบ 16 รูปแบบการแตกหักของรากฟัน (ภาพบน: มุมด้านหน้า ภาพล่าง: มุม ด้านข้าง)

ก.การแตกหักในระดับเหนือเรซินอะคริลิก (Supraacrylic resin fracture)

ข.การแตกหักในระดับใต้เรซินอะคริลิก (Subacrylic resin fracture)

กลุ่มควบคุมแบบลบ พบการแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 5 ซี่ และระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 5 ซี่

กลุ่มควบคุมแบบบวก พบการแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 3 ซี่ ระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 4 ซี่ และรากฟันแตกในแนวตั้ง จำนวน 2 ซี่

กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ พบการแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 6 ซี่ ระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 3 ซี่ และรากฟันแตกในแนวตั้ง จำนวน 1 ซี่ ซึ่งไม่พบการผยุผึ่งของโปรรูทเอ็มทีเอ

กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ พบการแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 5 ซี่ ระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 4 ซี่ และรากฟันแตกในแนวตั้ง จำนวน 1 ซี่ ซึ่งไม่พบการผยุผึ่งของเอ็มทีเอแองเจิ้ลส์

กลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอ พบการแตกของรากฟันอยู่ในระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 4 ซี่ ระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 5 ซี่ และรากฟันแตกในแนวตั้ง จำนวน 1 ซี่ ซึ่งไม่พบการผेยผิงของเรโทรเอ็มทีเอ

ตาราง 9 ตารางแจกแจงความถี่และร้อยละของรูปแบบการแตกหักของรากฟัน

กลุ่ม	รูปแบบการแตกหักของรากฟัน			รวม
	เหนือเรซินอะคริลิก	ใต้เรซินอะคริลิก	รากฟันแตกในแนวตั้ง	
กลุ่มควบคุมแบบลบ	5	5	0	10
กลุ่มควบคุมแบบบวก	3	5	2	10
โปรรูทเอ็มทีเอ	6	3	1	10
เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์	5	4	1	10
เรโทรเอ็มทีเอ	4	5	1	10
รวม	22 (44%)	23 (46%)	5 (10%)	50 (100%)

จากการศึกษานี้พบว่า การแตกของรากฟันส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับใต้เรซินอะคริลิก จำนวน 23 ซี่ และระดับเหนือเรซินอะคริลิก จำนวน 22 ซี่ ส่วนการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้งพบได้บ้าง จำนวน 5 ซี่ ดังแสดงในตาราง 8 นอกจากนี้ในกลุ่มที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิ้ลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ซึ่งแม้ว่าจะพบการแตกของรากฟันในระดับใต้เรซินอะคริลิกและการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้ง แต่ก็ไม่พบการผेยผิงของวัสดุอุดปิดปลายรากฟันทั้งสามชนิด

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

การอภิปรายผลการศึกษาวิจัย

การรักษาในฟันตายปลายรากเปิดถือเป็นสิ่งที่ทำลาย เนื่องจากมีปลายรากฟันเปิดกว้าง รวมไปถึงผนังคลองรากฟันบาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณคอฟัน (Cervical area) ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกหักของรากฟันได้ง่าย (87) สอดคล้องกับการศึกษาของ Cvek ในปี 1992 (30) ที่พบว่าฟันปลายรากเปิดสามารถเกิดการแตกหักบริเวณคอฟัน (Cervical root fractures) ได้มากกว่าฟันที่มีการสร้างรากฟันสมบูรณ์ และยังพบว่าความชุกของการเกิดการแตกหักนั้นยังขึ้นอยู่กับระยะในการพัฒนาของรากฟันอีกด้วย Marchi และคณะในปี 2008 (88) กล่าวว่าความหนาของเนื้อฟันที่เหลืออยู่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของรากฟัน แต่อย่างไรก็ตามในฟันปลายรากเปิดที่ผนังคลองรากฟันยังไม่มี การสะสมของเนื้อฟันมากพอ การเสริมความแข็งแรงของรากฟันจึงเป็นสิ่งจำเป็น (29)

ในการศึกษาครั้งนี้คำนึงถึงความแปรผันของโครงสร้างเนื้อฟัน ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอายุ ชนิดของซี่ฟัน ตำแหน่งของเนื้อฟัน การมีหรือไม่มีรอยโรค (89) ดังนั้นฟันที่นำมาใช้ในการศึกษาจะเลือกใช้เฉพาะฟันที่ไม่มีรอยโรค และถอนเพื่อจัดฟัน ซึ่งน่าจะมีอายุใกล้เคียงกัน จึงเลือกทำในฟันกรามน้อยล่างที่มีเพียงรากเดียว และมี 1 คลองรากฟันเท่านั้น โดยจากการศึกษาของ Thanaruengrong และคณะในปี 2021 (90) รายงานว่าฟันกรามน้อยล่างในคนไทยสามารถพบรากเดียวได้มากถึงร้อยละ 98 และพบ 1 คลองรากฟันได้ตั้งแต่ร้อยละ 61-98 (90, 91) อีกทั้งฟันกรามน้อยยังเป็นฟันที่ถูกถอนมากที่สุดตามแผนการรักษาของการจัดฟัน (92) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นไปที่ส่วนของรากฟันเป็นหลัก เพื่อเป็นการควบคุมปัจจัยรบกวนที่อาจเกิดขึ้นจากลักษณะทางกายวิภาคของตัวฟัน โดยเฉพาะบริเวณคอฟัน จึงพิจารณาตัดส่วนของตัวฟันออกให้เหลือเพียงส่วนของรากฟัน (93)

สำหรับการจำลองสภาวะฟันปลายรากเปิดที่มีการพัฒนาของรากฟันในระยะที่ 3 ตามการจำแนกของ Cvek (30) ซึ่งเป็นระยะที่มีความยาวรากฟันเท่ากับ $\frac{2}{3}$ ของความยาวรากฟันที่สมบูรณ์ จากการศึกษาของ Kim และคณะในปี 2013 (82) พบว่าฟันกรามน้อยล่างมีความยาวของรากฟันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ดังนั้นการศึกษานี้จะได้ความยาวของรากฟันในระยะที่ 3 เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (94) ต่อมาในการเตรียมคลองรากฟัน Stuart และคณะในปี 2006 (95) พบว่าฟันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟันมากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักของฟันน้อย และไม่มีความจำเป็นต้องเสริมความแข็งแรง การศึกษานี้

จึงทำการเตรียมคลองรากฟันด้วยพีซีริมเมอร์ ขนาด 1-6 เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลองรากฟันเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตร และได้อัตราส่วนระหว่างผนังคลองรากฟันต่อพื้นที่ในคลองรากฟันตามแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันเท่ากับ 1 ต่อ 1 ซึ่งเป็นลักษณะการพัฒนาของรากฟันในระยะที่ 3 (21)

การใช้อัลตราโซนิกร่วมในการอุดปิดปลายรากฟันเป็นวิธีที่ช่วยให้วัสดุสามารถไหลแผ่และอัดแน่นบริเวณส่วนของปลายรากที่มีความขรุขระหรือมีลักษณะบานออกได้ ซึ่งบริเวณเหล่านี้มักทำให้เกิดช่องว่างบริเวณขอบ (Marginal gaps) ระหว่างวัสดุและเนื้อฟัน (96) โดยจากการศึกษาของ Lawley และคณะในปี 2004 (97) พบว่ากลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยเอมที่เอโดยใช้เอ็นโดคอนดิกพลากร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกจะมีลักษณะของเอมที่เอที่อัดแน่น มีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อวัสดุน้อยมาก รวมไปถึงมีการแทรกซึมของแบคทีเรียเพียงร้อยละ 11 ซึ่งน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้เอ็นโดคอนดิกพลากร่วมเพียงอย่างเดียว (Hand condensation) ที่พบการแทรกซึมของแบคทีเรียถึงร้อยละ 33 สอดคล้องกับการศึกษาของ Escribano-Escribà และคณะในปี 2016 (98) ที่พบว่าการใช้อัลตราโซนิกร่วมในการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอมที่เอจะทำให้วัสดุแนบสนิทไปกับผนังคลองรากฟัน ลดโอกาสในการแทรกซึมได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพิจารณาใช้เอ็นโดคอนดิกพลากร่วมกับการกระตุ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (99) เพื่อให้วัสดุมีการแผ่และอัดแน่นบริเวณปลายราก ทำให้เกิดความแนบสนิทที่ดีระหว่างวัสดุและผนังคลองรากฟัน อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุด้วย

ในการจำลองแรงที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักมีวิธีการให้แรงกดไปที่พื้นที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาและผลที่จะทดสอบ เช่น การศึกษาของ Andreasen และคณะในปี 2006 (14) ใช้ตัวอย่างเป็นฟันหน้า จึงกำหนดให้แรงกดที่ผิวฟันด้านใบหน้า (Facial surface) ทำมุม 90 องศากับแนวแกนฟัน เพื่อกระตุ้นให้เกิดการแตกหักบริเวณคอฟัน การศึกษาของ Bortoluzzi และคณะในปี 2007 (100) ใช้หัวกดแบบแท่งวางทำมุม 45 องศากับแนวแกนฟัน โดยให้แรงจากทางด้านใบหน้า เพื่อจำลองการกระแทกที่ระดับ 1 ใน 3 ของฟันส่วนกลางฟัน (Middle 1/3 of crown) จากวิทยานิพนธ์ของกฤติกาในปี 2564 (94) ทำการศึกษาในฟันกรามน้อยล่างโดยให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของด้านบดเคี้ยวซึ่งทำมุม 30 องศากับแนวแกนฟัน เพื่อจำลองแรงในแนวผิดปกติที่ทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงดึง (Tensile stress) และแรงเฉือน (Shear stress) เสมือนแรงที่เกิดจากการกระแทกจากอุบัติเหตุ การศึกษาของ El-Ma'aita และคณะในปี 2014 (86) ใช้หัวกดทรงกลมกระทำกับรากฟันในแนวตั้ง (Vertical load) เพื่อจำลองการเกิดรากฟันแตกในแนวตั้งที่เป็นผลจากการได้รับแรงแบบลิ้ม (Wedging effect) อย่างไรก็ตามในฟันหลังมักได้รับ

แรงแนวตั้ง (Vertical forces) มากกว่าแรงด้านข้าง (Lateral forces) ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการดูดคลองรากฟันหรือการสบฟัน (101) อีกทั้งในการศึกษานี้มีความสนใจเฉพาะในส่วนของการฟันเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงแนวตั้งที่เป็นแรงกดอัด (Compressive force) กระทำต่อรากฟันส่วนต้นด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งแรงจะกระทำขนานกับแนวแกนของรากฟัน และอยู่บริเวณกึ่งกลางภายในคลองรากฟัน เพื่อให้แรงถ่ายทอดไปตลอดผนังของคลองรากฟัน (102)

สำหรับการทดสอบความต้านทานการแตกหักของฟัน การจำลองเอ็นยึดปริทันต์และเนื้อเยื่อรองรับ (Supporting tissue) ถือว่ามีบทบาทสำคัญในเรื่องของการกระจายแรงที่เกิดจากเครื่องให้แรง (Load application) และรูปแบบการแตกหักของฟัน จากการศึกษาของ Soares และคณะในปี 2005 (103) พบว่าวิธีการยึดรากฟันและการจำลองเอ็นยึดปริทันต์มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของฟันและรูปแบบการแตกหัก โดยกลุ่มที่รากฟันมีการยึดติดโดยตรงกับวัสดุที่มีความแข็งและไม่มีการจำลองเอ็นยึดปริทันต์ร่วมด้วย จะมีแรงกระทำเฉพาะบริเวณตัวฟันด้านบนที่อยู่เหนือเรซินอะคริลิก ทำให้การแตกหักที่เกิดขึ้นจำกัดอยู่เฉพาะส่วนของตัวฟันเหนือเรซินอะคริลิกเท่านั้น แตกต่างจากกลุ่มของรากฟันที่มีการจำลองเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งจะมีการกระจายแรงหลายตำแหน่งตั้งแต่ผิวรากฟันด้านบนไปยังพื้นผิวของรากฟันทั้งหมด ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักของฟันในตำแหน่งต่างกัน โดยส่วนใหญ่มักจะเกิดการแตกหักที่รากฟันมากกว่า สำหรับการศึกษานี้จะใช้เรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยตัวเองจำลองเป็นกระดูกเบ้าฟัน ซึ่งวัสดุชนิดนี้สามารถทนต่อแรงอัดและแรงที่จำลองสภาวะการบดเคี้ยวได้ (83) ส่วนเอ็นยึดปริทันต์จะจำลองโดยใช้วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนชนิดไลทบอดี้ที่มีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นเท่ากับ 0.31 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลาการก่อตัวและ 0.35 เมกะปาสคาลภายหลังวัสดุก่อตัว 30 นาที (104) ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเอ็นยึดปริทันต์มนุษย์ที่มีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นเท่ากับ 0.12-0.96 เมกะปาสคาล (105) นอกจากนี้ยังได้จำลองความสัมพันธ์ระหว่างฟันและสันกระดูกเบ้าฟัน (Crestal bone) โดยกำหนดให้มีระยะห่างของรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันและขอบด้านบนของเรซินอะคริลิกเท่ากับ 2 มิลลิเมตร (106)

การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการติดเชื้อภายในคลองรากฟันที่หลงเหลืออยู่ภายหลังการขยายและการล้างคลองรากฟัน จากการศึกษาของ Nerwich และคณะในปี 1993 (8) พบว่าเมื่อใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ค่าความเป็นกรดต่างที่ผิวเนื้อฟันด้านนอกบริเวณคอฟันและปลายรากฟันจะขึ้นสูงสุดเท่ากับ 9.3 และ 9.0 ซึ่งเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย สอดคล้องกับการศึกษาของ Fuss และคณะในปี 1996 (107) ที่พบว่าภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็น

ระยะเวลา 30 วัน ค่าความเป็นกรดต่างยังคงสูงอยู่และเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรียภายในคลองรากฟัน Andreasen และคณะในปี 2006 (14) พบว่าการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นระยะเวลา 30 วันนั้นเพียงพอต่อการควบคุมการติดเชื้อภายในคลองรากฟัน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน

จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน สามารถส่งผลให้ความต้านทานการแตกหักของรากฟันลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมแบบลบที่เนื้อฟันส่วนรากฟันไม่ได้มีการสัมผัสกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สอดคล้องกับหลายการศึกษาที่ทำในฟันมนุษย์ (108, 109) และในฟันสัตว์ (11, 14) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับเนื้อฟันแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนของสารอินทรีย์ในเนื้อฟัน โดยส่วนของสารอินทรีย์ในเนื้อฟันจะประกอบด้วยคอลลาเจนชนิดที่ 1 ร้อยละ 90 ทำให้เนื้อฟันมีความยืดหยุ่น และอีกร้อยละ 10 เป็นโปรตีนที่มีกลุ่มฟอสเฟตและคาร์บอกซิเลทเป็นองค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนยึดระหว่างโครงร่างคอลลาเจนกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีส่วนช่วยในแง่ความแข็งแรงของฟัน (108) ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นยาใส่ในคลองรากฟันเป็นสารเคมีที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งความเป็นด่างสูงนี้สามารถละลายหรือทำลายส่วนของสารอินทรีย์ในเนื้อฟันที่ทำหน้าที่เป็นส่วนยึดระหว่างโครงร่างคอลลาเจนกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ โดยจากการศึกษาของ Pacios และคณะในปี 2003 (31) พบส่วนประกอบของโปรตีนและไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline) ปะปนอยู่ในสารละลาย บ่งบอกได้ว่าการสลายของคอลลาเจนเกิดขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของปรารธนาและคณะในปี 2551 (110) ที่พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการแตกสลายของพันธะเอไมด์วัน ($C=O$) ซึ่งเป็นพันธะหนึ่งในกรดอะมิโนในสายคอลลาเจนในเนื้อฟัน จะเห็นได้ว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อส่วนของสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเนื้อฟัน ดังนั้นเมื่อมีการทำลายส่วนยึดระหว่างโครงร่างคอลลาเจนกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ขึ้น จะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของเนื้อฟัน ทำให้เนื้อฟันมีความอ่อนแอ และมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักของฟันได้ (11)

กระบวนการผลิตวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีทั้งการเผา (Sintering) และการสังเคราะห์ (Synthetic) ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้วัสดุที่มีกระบวนการผลิตทั้งจากการเผาและการสังเคราะห์เพื่อนำมาอุดปิดปลายรากฟัน ได้แก่ โปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ โดยกระบวนการผลิตของโปรรูทเอ็มทีเอและเอ็มทีเอแองเจิลส์เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เหมือนกัน (63) ต่างกันตรงที่โปรรูทเอ็มทีเอผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา เอ็มทีเอแองเจิลส์ผลิตจากประเทศบราซิล (26) มีส่วนประกอบหลักเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ยิปซัม

และบิสท็อกไฮต์ที่เป็นสารที่บรัสส์ ส่วนกระบวนการผลิตของเรโทรเอ็มทีเอเป็นการสังเคราะห์จนได้ส่วนประกอบที่บริสุทธิ์ มีส่วนประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมเซอร์โคเนียเชิงซ้อนเป็นสารที่บรัสส์ (62)

ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ากลุ่มที่อุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอเอง เจลลัส และเรโทรเอ็มทีเอมีค่าความต้านทานการแตกหักเท่ากับ 432.82 ± 68.06 นิวตัน 396.92 ± 59.93 นิวตัน และ 389.08 ± 56.25 นิวตัน สูงกว่ากลุ่มควบคุมแบบบวทที่มีค่าความต้านทานการแตกหักเท่ากับ 239.98 ± 27.19 นิวตัน จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอเอง เจลลัส และเรโทรเอ็มทีเอภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Andreassen และคณะในปี 2006 (14) ที่พบว่ากรอุดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอในฟันปลายรากเปิดภายหลังการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันเป็นระยะเวลา 30 วัน สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันได้ นอกจากนี้ในการศึกษาของ Tuna และคณะในปี 2011 (111) การศึกษาของ Darak และคณะในปี 2021 (112) และการศึกษาของภัทรและสุวิทย์ในปี 2564 (28) ก็พบว่ากรอุดคลองรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

ค่าความต้านทานการแตกหักของรากฟันที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากความแข็งแรงในการยึดติดของวัสดุกับเนื้อฟัน (Bond strength) ซึ่งความแข็งแรงพันธะผลัดออก (Push-out bond strength) ถือเป็นสมบัติทางกลที่สำคัญสำหรับวัสดุอุดปิดปลายรากในการยึดติดกับผนังคลองรากฟัน เพื่อต้านทานแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุ (113) โดยวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงพันธะผลัดออกสูงจะส่งผลให้มีค่าความต้านทานการแตกหักของฟันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงพันธะผลัดออกของวัสดุยังเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้นด้วย (114) จากการศึกษาของ Sluyk และคณะในปี 1998 (115) พบว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เอ็มทีเอมีค่าความแข็งแรงพันธะผลัดออกเท่ากับ 2.2 ปอนด์ และเมื่อเวลาผ่านไปที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง เอ็มทีเอมีค่าความแข็งแรงพันธะผลัดออกเพิ่มขึ้นเป็น 6.3 ปอนด์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Aggarwal และคณะในปี 2013 (116) ที่พบว่าค่าความแข็งแรงพันธะผลัดออกของเอ็มทีเอที่ระยะเวลา 7 วัน เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไปนานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

อีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของรากฟัน คือ ค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่น โดยจากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) แสดงให้

เห็นว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเนื้อฟันสามารถเสริมความแข็งแรงให้รากฟันที่มีความอ่อนแอได้ โดยเมื่อมีแรงมากระทำ วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใกล้เคียงกับเนื้อฟัน ร่วมกับมีการกระจายความเค้นได้ดี จึงช่วยลดโอกาสที่จะเกิดการแตกหักของรากฟัน (117) สำหรับค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นของเอ็มทีเอนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของเอ็มทีเอนี้มีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นเท่ากับ 1.7 จิกะปาสคาลที่ระยะเวลาเริ่มต้นของการก่อตัว และเพิ่มเป็น 15-30 จิกะปาสคาลที่ระยะเวลา 2 สัปดาห์ ซึ่งใกล้เคียงกับเนื้อฟันที่มีค่าโมดูลัสของสภาวะยืดหยุ่นเท่ากับ 14-18.6 จิกะปาสคาล (112)

ความแนบสนิทที่ดีระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟันจะทำให้เกิดความเป็นหน่วยเดียวกัน และส่งผลให้ความต้านทานการแตกหักของฟันเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไปก็จะมีส่งผลให้เกิดความแนบสนิทที่ดีมากขึ้น ทำให้มีช่องว่างระหว่างวัสดุและผนังคลองรากฟันน้อยลง (118) จากการศึกษาของ Hardy และคณะในปี 2004 (119) พบว่าที่ระยะเวลา 1 เดือน เอ็มทีเอนี้มีการรั่วซึมของวัสดุน้อยลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้การที่วัสดุขยายตัวภายหลังการก่อตัวก็ส่งผลให้เกิดความแนบสนิทที่ดีระหว่างวัสดุและผนังคลองรากฟันเช่นกัน (25) รวมไปถึงลักษณะของวัสดุที่เป็นวัสดุชีวกัมมันต์ (Bioactive material) (112) ก็คาดว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของรากฟัน ซึ่งวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์นั้นมีความสามารถในการสร้างชั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite layer) ขึ้นระหว่างเนื้อฟันและวัสดุ โดยเมื่อวัสดุสัมผัสกับสารเหลวในเนื้อเยื่อ แคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากวัสดุจะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต จากนั้นจะตกตะกอนกลายเป็นโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ปกคลุมที่ผิวของวัสดุแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุกับเนื้อฟัน และแทรกเข้าไปในท่อเนื้อฟัน (Tag-like structures) (61) ทำให้การผนึกของวัสดุกับเนื้อฟันในระยะแรกเป็นพันธะเชิงกล (Mechanical bond) และเมื่อเวลาผ่านไปมีปฏิกิริยาการแพร่ (Diffusion-controlled reaction) ระหว่างชั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์และเนื้อฟันนำไปสู่การเกิดพันธะเคมี (Chemical bond) กับเนื้อฟัน ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการยึดติดที่ดีกับผนังคลองรากฟัน (120) และมีส่วนช่วยในการเสริมความแข็งแรงของรากฟันที่อ่อนแอได้เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น

ส่วนของสารอินทรีย์ในเนื้อฟันนอกจากจะประกอบไปด้วยคอลลาเจนชนิดที่ 1 และโปรตีนที่มีกลุ่มฟอสเฟตและคาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเนื้อฟันแล้ว ยังประกอบไปด้วยเอนไซม์เมทริกซ์เมทัลโลโปรตีนเนส (Matrix metalloproteinase; MMP) เป็นจำนวนมาก โดยเอนไซม์เมทริกซ์เมทัลโลโปรตีนเนสชนิดที่ 2 และ 14 (MMP-2,14) มีบทบาทสำคัญในการ

ทำลายคอลลาเจนเมทริกซ์ (Collagen matrix) ในเนื้อฟัน และในทางกลับกันเอนไซม์ยับยั้งเมทริกซ์เมทัลโลโปรตีนเนส (Tissue inhibitor of metalloproteinase; TIMP) จะทำหน้าที่ยับยั้งการสร้างของโปรตีนเมทริกซ์เมทัลโลโปรตีนเนส โดยเฉพาะเอนไซม์ TIMP-2 ที่ทำหน้าที่ยับยั้งการสร้างเอนไซม์ MMP-2 (121) ซึ่งเอนไซม์ที่มีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดการแสดงออกของเอนไซม์ TIMP-2 ในเนื้อฟัน จึงช่วยป้องกันการทำลายคอลลาเจนเมทริกซ์ในเนื้อฟันได้ (29) โดยจากการศึกษาของ Hatibović-Kofman และคณะในปี 2008 (121) พบว่าในกลุ่มที่ได้รับการอุดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอจะมีค่าความต้านทานการแตกหักมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการอุดคลองรากฟัน และเมื่อทำการศึกษาด้วยปฏิกิริยาอิมมูโนเรืองแสง (Immunofluorescence assay) จะพบว่าคอลลาเจนชนิดที่ 1 เอนไซม์ MMP-2 และ MMP-14 สามารถตรวจพบได้ทั้งในกลุ่มที่ได้รับการอุดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอและกลุ่มที่ไม่ได้รับการอุดคลองรากฟัน แต่เอนไซม์ TIMP-2 จะตรวจพบเฉพาะในกลุ่มที่ได้รับการอุดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอเท่านั้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเอนไซม์สามารถกระตุ้นการแสดงออกของเอนไซม์ TIMP-2 ในเนื้อฟัน ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ MMP-2 และ MMP-14 ที่ทำหน้าที่ทำลายคอลลาเจนเมทริกซ์ในเนื้อฟัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่าเอนไซม์สามารถกระตุ้นให้มีการหลั่งอินเตอร์ลิวคิน (Interleukin) และไซโตไคน์ (Cytokines) ซึ่งจะไปกระตุ้นให้เกิดการแสดงออกของเอนไซม์ TIMP ได้เช่นกัน (122)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้พบว่าค่าความต้านทานการแตกหักของรากฟันในกลุ่มที่อุดปิดปลายรากด้วยวัสดุทั้งสามชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่มีความคล้ายคลึงกัน (27) รวมไปถึงสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นความแข็งจุลภาค (Microhardness) หรือความทนต่อแรงกด (Compressive strength) ก็ถือเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของรากฟันเช่นเดียวกัน จากการศึกษาของ Dawood และคณะในปี 2015 (25) พบว่าที่ระยะ 1 วันหลังวัสดุก่อตัว โปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความแข็งจุลภาคเท่ากับ 37.5 HV (Vicker's microhardness, HV) เอ็มทีเอเองเจิ้ลส์มีค่าความแข็งจุลภาคเท่ากับ 32.7 HV ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับความทนต่อแรงกด Shen และคณะในปี 2015 (72) กล่าวว่าวัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงอัดสูงสามารถทนต่อแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป (Deformation) และการหดตัว (Shrinkage) ได้ โดยโปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความทนต่อแรงกดเท่ากับ 40-56.2 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 1 วันหลังวัสดุก่อตัว (69, 79) และเพิ่มขึ้นเป็น 62 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 7 วัน (79) เอ็มทีเอเองเจิ้ลส์มีค่าความทนต่อแรงกดเท่ากับ 46.4 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 1 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 65.1 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 4 วัน (25) ส่วนเรโพรเอ็มทีเอมีค่าความทนต่อแรง

กุดเท่ากับ 58.2 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 1 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 61.1 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลา 7 วัน ซึ่งจากการศึกษาของ Che และคณะในปี 2016 (79) พบว่าค่าความทนต่อแรงกดของโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรมเอ็มทีเอไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การแตกหักของรากฟันสามารถพบได้หลายรูปแบบ โดยแบ่งเป็นการแตกหักที่สามารถบูรณะฟันต่อได้ (Restorable) ได้แก่ การแตกในระดับเหนือเรซินอะคริลิก และการแตกหักที่ไม่สามารถบูรณะต่อได้ (Non-restorable) ได้แก่ การแตกในระดับใต้เรซินอะคริลิกและการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้ง (29, 83) ในการศึกษาที่พบว่าการแตกหักของรากฟันส่วนใหญ่จะเป็นการแตกระดับใต้เรซินอะคริลิก ซึ่งการแตกหักรูปแบบนี้ในทางคลินิกมักพิจารณาว่าไม่สามารถบูรณะต่อได้ ตามมาด้วยการแตกระดับเหนือเรซินอะคริลิก และการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้ง สอดคล้องกับการศึกษาของ Karapinar-Kazandag และคณะในปี 2016 (29) ที่พบการแตกหักของรากฟันในลักษณะเฉียงลงไปใต้เรซินอะคริลิกเรซินรูปทรงกระบอก (Fracture with partial invasion of cylinder insertion) มากที่สุดถึงร้อยละ 69 แตกต่างจากการศึกษาของ E. Żuk-Grajewska และคณะในปี 2021 (83) ที่พบว่ารูปแบบการแตกหักของรากฟันส่วนใหญ่ร้อยละ 69 เป็นการแตกแบบฟันแยก (Spilt) และร้อยละ 31 เป็นการแตกแบบหลายชิ้นส่วน (Comminuted) ซึ่งพบทั้งในระดับใต้เรซินอะคริลิก ระดับเหนือเรซินอะคริลิก และการแตกแบบรากฟันแตกในแนวตั้ง อย่างไรก็ตามอาจมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการแตกหักของรากฟัน เช่น การสูญเสียโครงสร้างของฟัน ผลของสารเคมี ยาที่ใส่ในคลองรากฟัน ขั้นตอนในการบูรณะ ตำแหน่งของฟัน (123)

ในการศึกษานี้แม้ว่าการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันได้ แต่ก็ยังพบว่ามีความต้านทานการแตกหักที่น้อยกว่ากลุ่มควบคุมแบบลบ อาจเนื่องมาจากกลุ่มควบคุมแบบลบเป็นกลุ่มของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดที่ไม่ได้รับการรักษาใดๆ ทำให้ไม่ได้รับผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถส่งผลต่อสมบัติทางกลของเนื้อฟัน และทำให้ฟันอ่อนแอลงได้ ดังนั้นหลังจากทำการอุดปิดปลายรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์แล้ว การเสริมความแข็งแรงภายในคลองรากฟันก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน จากการศึกษาของ Linsuwanont และคณะในปี 2018 (124) พบว่าหลังการอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอในฟันปลายรากเปิด แล้วทำการเสริมความแข็งแรงภายในคลองรากฟันด้วยการใส่เดือยฟันเส้นใย (Fiber post) เรซินคอมโพสิต (Composite resin) หรือการอุดตลอดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันได้ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับวิทยานิพนธ์ของกฤติกาในปี 2564 (94) ที่พบว่าการเสริมความแข็งแรงของฟันปลายรากเปิดโดยวิธีการอุดตลอดคลองรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอและวิธีการอุด

ปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอร่วมกับการใช้เดือยเสมือนรากฟันสามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของฟันได้ไม่แตกต่างกัน

สรุปผลการวิจัย

การอุดปิดปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอ เอ็มทีเอแองเจิลส์ และเรโทรเอ็มทีเอ ภายหลังจากการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟัน สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดได้อย่างมีนัยสำคัญ และไม่มีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุทั้งสามชนิด

ข้อเสนอแนะ

ด้วยข้อจำกัดของระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาจึงทำให้การศึกษานี้เปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักของรากฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดที่ได้รับการอุดปิดปลายรากฟันด้วยเอ็มทีเอ ภายหลังจากการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคลองรากฟันได้เพียงช่วงระยะเวลาเดียว ในการศึกษาต่อไปอาจต้องเพิ่มระยะเวลาในการศึกษาเป็นหลายช่วงเวลามากขึ้น เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหักของรากฟันได้อย่างชัดเจน ร่วมกับการศึกษาถึงกลไกของวัสดุที่สามารถเพิ่มความต้านทานการแตกหักของรากฟันได้

บรรณานุกรม

1. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ. The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1965;20(3):340-9.
2. Wilkinson KL, Beeson TJ, Kirkpatrick TC. Fracture resistance of simulated immature teeth filled with resilon, gutta-percha, or composite. *J Endod.* 2007;33(4):480-3.
3. Byström A, Sundqvist G. Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. *Scand J Dent Res.* 1981;89(4):321-8.
4. Law A, Messer H. An evidence-based analysis of the antibacterial effectiveness of intracanal medicaments. *J Endod.* 2004;30(10):689-94.
5. Mohammadi Z, Dummer PM. Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology. *Int Endod J.* 2011;44(8):697-730.
6. Heithersay GS. Calcium hydroxide in the treatment of pulpless teeth with associated pathology. *J Br Endod Soc.* 1975;8(2):74-93.
7. Shuping GB, Orstavik D, Sigurdsson A, Trope M. Reduction of intracanal bacteria using nickel-titanium rotary instrumentation and various medications. *J Endod.* 2000;26(12):751-5.
8. Nerwich A, Figdor D, Messer HH. pH Changes in Root Dentin over a 4-Week Period following Root Canal Dressing with Calcium Hydroxide. *J Endod.* 1993;19(6):302-6.
9. Yoldaş O, Doğğan C, Seydaoğlu G. The effect of two different calcium hydroxide combinations on root dentine microhardness. *Int Endod J.* 2004;37(12):828-31.
10. Grigoratos D, Knowles J, Ng YL, Gulabivala K. Effect of exposing dentine to sodium hypochlorite and calcium hydroxide on its flexural strength and elastic modulus. *Int Endod J.* 2001;34(2):113-9.
11. Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol.* 2002;18(3):134-7.
12. White JD, Lacefield WR, Chavers LS, Eleazer PD. The Effect of Three Commonly Used Endodontic Materials on the Strength and Hardness of Root Dentin. *J Endod.*

2002;28(12):828-30.

13. Elnaghy AM, Elsaka SE. Fracture resistance of simulated immature teeth filled with Biodentine and white mineral trioxide aggregate - an in vitro study. *Dent Traumatol.*

2016;32(2):116-20.

14. Andreasen JO, Munksgaard EC, Bakland LK. Comparison of fracture resistance in root canals of immature sheep teeth after filling with calcium hydroxide or MTA. *Dent Traumatol.*

2006;22(3):154-6.

15. Simon S, Rilliard F, Berdal A, Machtou P. The use of mineral trioxide aggregate in one-visit apexification treatment: a prospective study. *Int Endod J.* 2007;40(3):186-97.

16. Damle SG, Bhattal H, Loomba A. Apexification of Anterior Teeth: A Comparative Evaluation of Mineral Trioxide Aggregate and Calcium Hydroxide Paste. *J Clin Pediatr Dent.*

2012;36(3):263-8.

17. Trope M. Treatment of the Immature Tooth with a Non-Vital Pulp and Apical Periodontitis. *Dent Clin North Am.* 2010;54(2):313-24.

18. Jeeruphan T, Jantarat J, Yanpiset K, Suwannapan L, Khewsawai P, Hargreaves KM. Mahidol Study 1: Comparison of Radiographic and Survival Outcomes of Immature Teeth Treated with Either Regenerative Endodontic or Apexification Methods: a

Retrospective Study. *J Endod.* 2012;38(10):1330-6.

19. Alobaid AS, Cortes LM, Lo J, Nguyen TT, Albert J, Abu-Melha AS, et al.

Radiographic and clinical outcomes of the treatment of immature permanent teeth by revascularization or apexification: a pilot retrospective cohort study. *J Endod.*

2014;40(8):1063-70.

20. Milani AS, Rahimi S, Borna Z, Jafarabadi MA, Bahari M, Deljavan AS. Fracture resistance of immature teeth filled with mineral trioxide aggregate or calcium-enriched mixture cement: An ex vivo study. *Dent Res J (Isfahan).* 2012;9(3):299-304.

21. Çiçek E, Yılmaz N, Kocak MM, Sağlam BC, Kocak S, Bilgin B. Effect of Mineral Trioxide Aggregate Apical Plug Thickness on Fracture Resistance of Immature Teeth. *J Endod.*

2017;43(10):1697-700.

22. Hachmeister DR, Schindler WG, Walker III WA, Thomas DD. The sealing ability and

retention characteristics of mineral trioxide aggregate in a model of apexification. *J Endod.* 2002;28(5):386-90.

23. Valois CR, Costa ED. Influence of the thickness of mineral trioxide aggregate on sealing ability of root-end fillings in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2004;97(1):108-11.
24. Sinkar RC, Patil SS, Jogad NP, Gade VJ. Comparison of sealing ability of ProRoot MTA, RetroMTA, and Biodentine as furcation repair materials: An ultraviolet spectrophotometric analysis. *J Conserv Dent.* 2015;18(6):445-8.
25. Dawood AE, Parashos P, Wong RHK, Reynolds EC, Manton DJ. Calcium silicate-based cements: composition, properties, and clinical applications. *J Investig Clin Dent.* 2015;8(2):1-15.
26. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod.* 2010;36(1):16-27.
27. Bayram E, Bayram HM. Fracture resistance of immature teeth filled with mineral trioxide aggregate, bioaggregate, and biodentine. *Eur J Dent.* 2016;10(2):220-4.
28. ภัทร อันชีน, สุวิทย์ วิมลจิตต์. ความต้านทานการแตกหักของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดเมื่ออุดรากฟันด้วยวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามชนิด. *วทันต ขอนแก่น.* 2564;24(1):66-75.
29. Karapinar-Kazandag M, Basrani B, Tom-KunYamagishi V, Azarpazhooh A, Friedman S. Fracture resistance of simulated immature tooth roots reinforced with MTA or restorative materials. *Dent Traumatol.* 2016;32(2):146-52.
30. Cvek M. Prognosis of luxated non-vital maxillary incisors treated with calcium hydroxide and filled with gutta-percha. A retrospective clinical study. *Endod Dent Traumatol.* 1992;8(2):45-55.
31. Pacios MG, de la Casa ML, de los Angeles Bulacio M, López ME. Calcium hydroxide's association with different vehicles: In vitro action on some dentinal components. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003;96(1):96-101.
32. Rafter M. Apexification: a review. *Dent Traumatol.* 2005;21(1):1-8.
33. Schwartz RS, Mauger M, Clement DJ, Walker III WA. Mineral trioxide aggregate: a

new material for endodontics. *J Am Dent Assoc.* 1999;130(7):967-75.

34. Torabinejad M, Chivian N. Clinical Applications of Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod.* 1999;25(3):197-205.

35. Mituro TH, Mugonzibwa EA, Kahabuka FK. A retrospective study of root apices closure of permanent incisors and first molars in Tanzanian children's digital Orthopantomographs. *Oral Biol Dent.* 2018;6(1):1-6.

36. Byström A, Sundqvist G. Bacteriologic evaluation of the effect of 0.5 percent sodium hypochlorite in endodontic therapy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1983;55(3):307-12.

37. Bystrom A, Sundqvist G. The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J.* 1985;18(1):35-40.

38. Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff AJ. Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis. *J Endod.* 2001;27(2):76-81.

39. Farhad A, Mohammadi Z. Calcium hydroxide: a review. *Int Dent J.* 2005;55(5):293-301.

40. Morse DR, O'Larnic J, Yesilsoy C. Apexification: review of the literature. *Quintessence Int.* 1990;21(7):589-98.

41. Frank AL. Therapy for the divergent pulpless tooth by continued apical formation. *J Am Dent Assoc.* 1966;72(1):87-93.

42. Sheehy EC, Roberts GJ. Use of calcium hydroxide for apical barrier formation and healing in non-vital immature permanent teeth: a review. *Br Dent J.* 1997;183(7):241-6.

43. Cvek M. Treatment of non-vital permanent incisors with calcium hydroxide. I. Follow-up of periapical repair and apical closure of immature roots. *Odontol Revy.* 1972;23(1):27-44.

44. Yates JA. Barrier formation time in non-vital teeth with open apices. *Int Endod J.* 1988;21(5):313-9.

45. Kleier DJ, Barr ES. A study of endodontically apexified teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1991;7(3):112-7.

46. Finucane D, Kinirons MJ. Non-vital immature permanent incisors: factors that may

influence treatment outcome. *Endod Dent Traumatol.* 1999;15(6):273-7.

47. Plascencia H, Díaz M, Gascón G, Garduño S, Guerrero-Bobadilla C, Márquez-DeAlba S, et al. Management of permanent teeth with necrotic pulps and open apices according to the stage of root development. *J Clin Exp Dent.* 2017;9(11):e1329-39.

48. Torabinejad M, Hong CU, Lee SJ, Monsef M, Pitt Ford TR. Investigation of Mineral Trioxide Aggregate for Root-End Filling in Dogs. *J Endod.* 1995;21(12):603-8.

49. Torabinejad M, Pitt Ford TR, McKendry DJ, Abedi HR, Miller DA, Kariyawasam SP. Histologic Assessment of Mineral Trioxide Aggregate as a Root-End Filling in Monkeys. *J Endod.* 1997;23(4):225-8.

50. Economides N, Pantelidou O, Kokkas A, Tziafas D. Short-term periradicular tissue response to mineral trioxide aggregate (MTA) as root-end filling material. *Int Endod J.* 2003;36(1):44-8.

51. Matt GD, Thorpe JR, Strother JM, McClanahan SB. Comparative study of white and gray mineral trioxide aggregate (MTA) simulating a one- or two-step apical barrier technique. *J Endod.* 2004;30(12):876-9.

52. Martin RL, Monticelli F, Brackett WW, Loushine RJ, Rockman RA, Ferrari M, et al. Sealing Properties of Mineral Trioxide Aggregate Orthograde Apical Plugs and Root Fillings in an In Vitro Apexification Model. *J Endod.* 2007;33(3):272-5.

53. El-Meligy OAS, Avery DR. Comparison of Apexification With Mineral Trioxide Aggregate and Calcium Hydroxide. *Pediatr Dent.* 2006;28(3):248-53.

54. Murray PE, Garcia-Godoy F, Hargreaves KM. Regenerative endodontics: a review of current status and a call for action. *J Endod.* 2007;33(4):377-90.

55. Nakashima M, Akamine A. The application of tissue engineering to regeneration of pulp and dentin in endodontics. *J Endod.* 2005;31(10):711-8.

56. Galler KM, Krastl G, Simon S, Gorp GV, Meschi N, Vahedi B, et al. European Society of Endodontology position statement: Revitalization procedures. *Int Endod J.* 2016;49(8):717-23.

57. Bose R, Nummikoski P, Hargreaves K. A retrospective evaluation of radiographic outcomes in immature teeth with necrotic root canal systems treated with regenerative

endodontic procedures. *J Endod.* 2009;35(10):1343-9.

58. American Association of Endodontists. AAE Clinical Considerations for a Regenerative Procedure Revised 4/1/2018. Available from https://www.aae.org/specialty/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/ConsiderationsForRegEndo_AsOfApril2018.pdf.

59. Kling M, Cvek M, Mejare I. Rate and predictability of pulp revascularization in therapeutically reimplanted permanent incisors. *Endod Dent Traumatol.* 1986;2(3):83-9.

60. Malhotra S, Hegde MN, Shetty CM. Bioceramic Technology in Endodontics. *Br J Med Med Res.* 2014;4(12):2446-54.

61. Camilleri J. Mineral trioxide aggregate: present and future developments. *Endod Topics.* 2015;31(1):31-46.

62. Wang Z. Bioceramic materials in endodontics. *Endod Topics.* 2015;32(1):3-30.

63. Camilleri J. Hydration mechanisms of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2007;40(6):462-70.

64. Dammaschke T, Gerth HUV, Züchner H, Schäfer E. Chemical and physical surface and bulk material characterization of white ProRoot MTA and two Portland cements. *Dent Mater.* 2005;21(8):731-8.

65. Roberts HW, Toth JM, Berzins DW, Charlton DG. Mineral trioxide aggregate material use in endodontic treatment: a review of the literature. *Dent Mater.* 2008;24(2):149-64.

66. Haapasalo M, Parhar M, Huang X, Wei X, Lin J, Shen Y. Clinical use of bioceramic materials. *Endod Topics.* 2015;32(1):97-117.

67. Camilleri J, Pitt Ford TR. Mineral trioxide aggregate: a review of the constituents and biological properties of the material. *Int Endod J.* 2006;39(10):747-54.

68. Kaup M, Schäfer E, Dammaschke T. An in vitro study of different material properties of Biodentine compared to ProRoot MTA. *Head Face Med.* 2015;11:16.

69. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod.* 1995;21(7):349-53.

70. Ree MH, Schwartz RS. Long-term Success of Nonvital, Immature Permanent

Incisors Treated With a Mineral Trioxide Aggregate Plug and Adhesive Restorations: A Case Series from a Private Endodontic Practice. *J Endod.* 2017;43(8):1370-7.

71. Witherspoon DE, Small JC, Regan JD, Nunn M. Retrospective Analysis of Open Apex Teeth Obturated with Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod.* 2008;34(10):1171-6.
72. Shen Y, Peng B, Yang Y, Ma J, Haapasalo M. What do different tests tell about the mechanical and biological properties of bioceramic materials? *Endod Topics.* 2015;32(1):47-85.
73. Hashem AA, Hassanien EE. ProRoot MTA, MTA-Angelus and IRM used to repair large furcation perforations: sealability study. *J Endod.* 2008;34(1):59-61.
74. Lolayekar N, Bhat SS, Hegde S. Sealing ability of ProRoot MTA and MTA-Angelus simulating a one-step apical barrier technique--an in vitro study. *J Clin Pediatr Dent.* 2009;33(4):305-10.
75. Camilleri J, Sorrentino F, Damidot D. Investigation of the hydration and bioactivity of radiopacified tricalcium silicate cement, Biodentine and MTA Angelus. *Dent Mater.* 2013;29(5):580-93.
76. Chung CJ, Kim E, Song M, Park JW, Shin SJ. Effects of two fast-setting calcium-silicate cements on cell viability and angiogenic factor release in human pulp-derived cells. *Odontology.* 2016;104(2):143-51.
77. Pornamazeh T, Yadegari Z, Ghasemi A, Sheykh-Al-Eslamian SM, Shojaeian S. In Vitro Cytotoxicity and Setting Time Assessment of Calcium-Enriched Mixture Cement, Retro Mineral Trioxide Aggregate and Mineral Trioxide Aggregate. *Iran Endod J.* 2017;12(4):488-92.
78. Souza LC, Yadlapati M, Dorn SO, Silva R, Letra A. Analysis of radiopacity, pH and cytotoxicity of a new bioceramic material. *J Appl Oral Sci.* 2015;23(4):383-9.
79. Che JL, Kim JH, Kim SM, Choi Nk, Moon HJ, Hwang MJ, et al. Comparison of Setting Time, Compressive Strength, Solubility, and pH of Four Kinds of MTA. *Korean J Dent Mater.* 2016;43(1):61-72.
80. Kang SH, Shin YS, Lee HS, Kim SO, Shin Y, Jung IY, et al. Color changes of teeth after treatment with various mineral trioxide aggregate-based materials: an ex vivo study. *J*

Endod. 2015;41(5):737-41.

81. Vertucci FJ. Root Canal Anatomy of the Human Permanent Teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1984;58(5):589-99.

82. Kim SY, Lim SH, Gang SN, Kim HJ. Crown and root lengths of incisors, canines, and premolars measured by cone-beam computed tomography in patients with malocclusions. *Korean J Orthod.* 2013;43(6):271-8.

83. Żuk-Grajewska E, Saunders WP, Chadwick RG. Fracture resistance of human roots filled with mineral trioxide aggregate mixed with phosphate-buffered saline, with and without calcium hydroxide pre-medication. *Int Endod J.* 2021;54(3):439-53.

84. Schmoltdt SJ, Kirkpatrick TC, Rutledge RE, Yaccino JM. Reinforcement of simulated immature roots restored with composite resin, mineral trioxide aggregate, gutta-percha, or a fiber post after thermocycling. *J Endod.* 2011;37(10):1390-3.

85. Brito-Júnior M, Pereira RD, Veríssimo C, Soares CJ, Faria-e-Silva AL, Camilo CC, et al. Fracture resistance and stress distribution of simulated immature teeth after apexification with mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2014;47(10):958-66.

86. EL-Ma'aïta AM, Qualtrough AJE, Watts DC. Resistance to vertical fracture of MTA-filled roots. *Dent Traumatol.* 2014;30(1):36-42.

87. Katebzadeh N, Dalton BC, Trope M. Strengthening immature teeth during and after apexification. *J Endod.* 1998;24(4):256-9.

88. Marchi GM, Mitsui FHO, Cavalcanti AN. Effect of remaining dentine structure and thermal-mechanical aging on the fracture resistance of bovine roots with different post and core systems. *Int Endod J.* 2008;41(11):969-76.

89. Marshall GWJr. Dentin: microstructure and characterization. *Quintessence Int.* 1993;24(9):606-17.

90. Thanaruengrong P, Kulvitit S, Navachinda M, Charoenlarp P. Prevalence of complex root canal morphology in the mandibular first and second premolars in Thai population: CBCT analysis. *BMC Oral Health.* 2021;16;21(1):449.

91. Apiwattanasevee N, Suratanasurang O. Root canal morphology of premolars in a Thai population. *M Dent J.* 2020;40(3):243-56.

92. Alesia K, Khalil HS. Reasons for and patterns relating to the extraction of permanent teeth in a subset of the Saudi population. *Clin Cosmet Investig Dent*. 2013;5:51-6.
93. Al-Hiyasat AS, El-Farraj HS, Alebrahim MA. The effect of calcium hydroxide on dentine composition and root fracture resistance of human teeth: An in vitro study. *Eur J Oral Sci*. 2021;129(4):e12798.
94. กฤติกา เจริญวุฒิสลาม, สุวิทย์ วิมลจิตต์. ความต้านทานการแตกหักของฟันจำลองสภาวะปลายรากฟันเปิดเมื่อได้รับการเสริมความแข็งแรงด้วยเดือยเสมือนรากฟัน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2564.
95. Stuart CH, Schwartz SA, Beeson TJ. Reinforcement of immature roots with a new resin filling material. *J Endod*. 2006;32(4):350-3.
96. Plotino G, Pameijer CH, Grande NM, Somma F. Ultrasonics in endodontics: a review of the literature. *J Endod*. 2007;33(2):81-95.
97. Lawley GR, Schindler WG, Walker III WA, Kolodrubetz D. Evaluation of ultrasonically placed MTA and fracture resistance with intracanal composite resin in a model of apexification. *J Endod*. 2004;30(3):167-72.
98. Escribano-Escrivá B, Micó-Muñoz P, Manzano-Saiz A, Giner-Lluesma T, Collado-Castellanos N, Muwaquet-Rodríguez S. MTA apical barrier: In vitro study of the use of ultrasonic vibration. *J Clin Exp Dent*. 2016;8(3):e318-21.
99. Witherspoon DE, Ham K. One-visit apexification: technique for inducing root-end barrier formation in apical closures. *Pract Proced Aesthet Dent*. 2001;13(6):455-60.
100. Bortoluzzi EA, Souza EM, Reis JM, Esberard RM, Tanomaru-Filho M. Fracture strength of bovine incisors after intra-radicular treatment with MTA in an experimental immature tooth model. *Int Endod J*. 2007;40(9):684-91.
101. Soliman PS, Roshdy NN, Fouda MY. Assessment of Fracture Resistance in Teeth with Simulated Perforating Internal Root Resorption Cavities Repaired with Biodentine, Retro MTA and Portland Cement (A Comparative In Vitro Study). *Acta Sci Dent Sci*. 2021;5(8):85-92.
102. Ballal NV, Rao S, Yoo J, Ginjupalli K, Toledano M, Husain NA-H, et al. Fracture

resistance of teeth obturated with two different types of Mineral Trioxide Aggregate Cements. *Braz Dent Sci.* 2020;23(3).

103. Soares CJ, Pizi EC, Fonseca RB, Martins LR. Influence of root embedment material and periodontal ligament simulation on fracture resistance tests. *Braz Oral Res.* 2005;19(1):11-6.

104. Jamani KD, Harrington E, Wilson HJ. Rigidity of elastomeric impression materials. *J Oral Rehabil.* 1989;16(3):241-8.

105. Yoshida N, Koga Y, Peng CL, Tanaka E, Kobayashi K. In vivo measurement of the elastic modulus of the human periodontal ligament. *Med Eng Phys.* 2001;23(8):567-72.

106. Hemalatha H, Sandeep M, Kulkarni S, Yakub SS. Evaluation of fracture resistance in simulated immature teeth using Resilon and Ribbond as root reinforcements - an in vitro study. *Dent Traumatol.* 2009;25(4):433-8.

107. Fuss Z, Rafaeloff R, Tagger M, Szajkis S. Intracanal pH Changes of Calcium Hydroxide Pastes Exposed to Carbon Dioxide In Vitro. *J Endod.* 1996;22(7):362-4.

108. Rosenberg B, Murray PE, Namerow K. The effect of calcium hydroxide root filling on dentin fracture strength. *Dent Traumatol.* 2007;23(1):26-9.

109. Sahebi S, Moazami F, Abbott P. The effects of short-term calcium hydroxide application on the strength of dentine. *Dent Traumatol.* 2010;26(1):43-6.

110. ปจรรถนา ขอดมโนธรรม, วราภรณ์ ฐิตินันทพันธุ์, สมอง เอกสิทธิ์. ผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อฟันส่วนรากตอนที่ 2: ชนิดผสมสำเร็จรูป 3 สูตร. *ว ทนต.* 2551;58(4):205-13.

111. Tuna EB, Dinçol ME, Gençay K, Aktören O. Fracture resistance of immature teeth filled with BioAggregate, mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide. *Dent Traumatol.* 2011;27(3):174-8.

112. Darak P, Likhitkar M, Goenka S, Kumar A, Madale P, Kelode A. Comparative evaluation of fracture resistance of simulated immature teeth and its effect on single visit apexification versus complete obturation using MTA and biodentine. *J Family Med Prim Care.* 2020;9(4):2011-5.

113. Shahi S, Rahimi S, Yavari HR, Samiei M, Janani M, Bahari M, et al. Effects of

Various Mixing Techniques on Push-out Bond Strengths of White Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod.* 2012;38(4):501-4.

114. Rohan B. A Comparative evaluation of fracture resistance and push-out bond strength to root dentin using three different root canal sealers: An Invitro study [Masters thesis]. Chennai: Tamilnadu Government Dental College and Hospital; 2015.

115. Sluyk SR, Moon PC, Hartwell GR. Evaluation of setting properties and retention characteristics of mineral trioxide aggregate when used as a furcation perforation repair material. *J Endod.* 1998;24(11):768-71.

116. Aggarwal V, Singla M, Miglani S, Kohli S. Comparative evaluation of push-out bond strength of ProRoot MTA, Biodentine, and MTA Plus in furcation perforation repair. *J Conserv Dent.* 2013;16(5):462-5.

117. Li LI, Wang Zy, Bai Zc, Mao Y, Gao B, Xin Ht, et al. Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chin Med J.* 2006;119(4):305-11.

118. Atom J, Moolchandani K. To study and compare the apical sealing ability and fracture resistance to root canal dentine with Endosequence bioceramic, MTA and AH plus sealers -an ex- vivo study. *Int J Sci Res Dent Med Sci.* 2018;2(7):21-6.

119. Hardy I, Liewehr FR, Joyce AP, Agee K, Pashley DH. Sealing Ability of One-Up Bond and MTA With and Without a Secondary Seal as Furcation Perforation Repair Material. *J Endod.* 2004;30(9):658-61.

120. DeDeus G, Camilleri J, Primus CM, Duarte MAH, Bramante CM. Introduction to Mineral Trioxide Aggregate. In: Camilleri J. (eds) *Mineral Trioxide Aggregate in Dentistry.* Springer, Berlin, Heidelberg. 2014:1-17.

121. Hatibović-Kofman S, Raimundo L, Zheng L, Chong L, Friedman M, Andreasen JO. Fracture resistance and histological findings of immature teeth treated with mineral trioxide aggregate. *Dent Traumatol.* 2008;24(3):272-6.

122. Koh ET, McDonald F, Pitt Ford TR, Torabinejad M. Cellular response to Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod.* 1998;24(8):543-7.

123. Kishen A. Biomechanics of fractures in endodontically treated teeth. *Dent*

Traumatol. 2015;33(1):3-13.

124. Linsuwanont P, Kulvitit S, Santiwong B. Reinforcement of Simulated Immature Permanent Teeth after Mineral Trioxide Aggregate Apexification. J Endod. 2018;44(1):163-7.





ตาราง 1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดของฟันในแนวใกล้แก้มใกล้ลิ้น และแนวใกล้กลางไกลกลางที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันในแต่ละกลุ่มด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

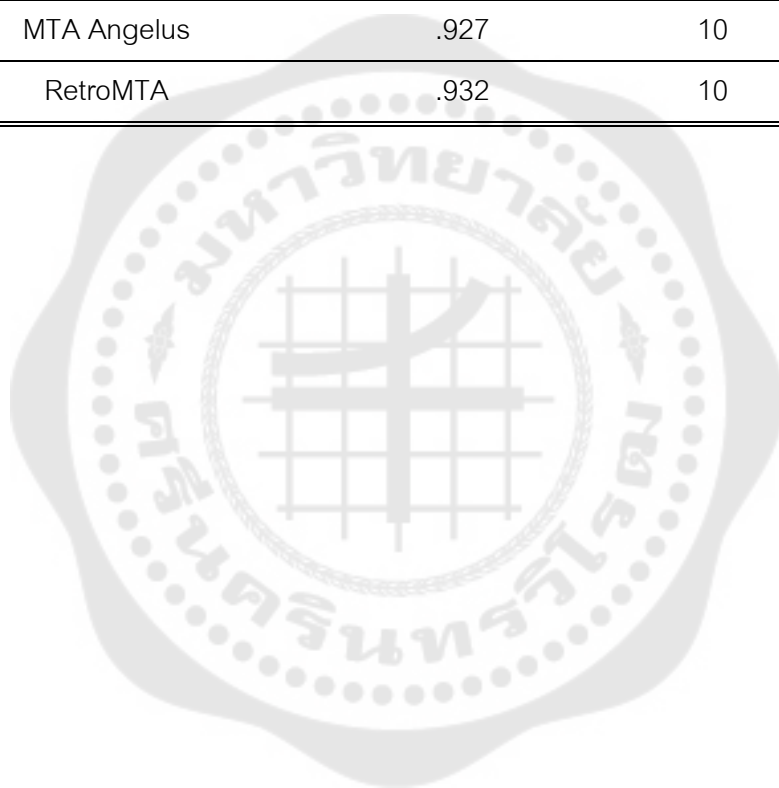
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Bucco-Lingual	Between Groups	.855	4	.214	1.040	.397
	Within Groups	9.246	45	.205		
	Total	10.101	49			
Mesio-Distal	Between Groups	.184	4	.046	.715	.586
	Within Groups	2.902	45	.064		
	Total	3.087	49			

ตาราง 2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความหนาของเนื้อฟันที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบรากฟันกับเคลือบฟันภายหลังการเตรียมฟันที่ใช้ในการทดลองในแต่ละกลุ่มด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.006	4	.002	.244	.912
Within Groups	.292	45	.006		
Total	.298	49			

ตาราง 3 การวิเคราะห์การแจกแจงข้อมูลความต้านทานการแตกหักของรากฟันด้วยสถิติการทดสอบชาฟิโล-วิลค์ (Shapiro-Wilk Test)

Group	Statistic	df	Sig.
Negative control	.846	10	.052
Positive control	.922	10	.377
Proroot MTA	.955	10	.731
MTA Angelus	.927	10	.421
RetroMTA	.932	10	.469



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กัทลี ศรีประศาสน์
วัน เดือน ปี เกิด	18 มีนาคม 2537
สถานที่เกิด	ระยอง
วุฒิการศึกษา	ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมคลินิก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 10/8 หมู่ 1 ตำบลขุนกระโทก อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร รหัสไปรษณีย์ 86190

