



ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สองชนิดต่อ  
ความสามารถในการผนึกขอบและความสามารถในการเกิดอะพาไทต์

THE EFFECT OF VARYING WATER TO POWDER RATIO OF TWO CALCIUM SILICATE  
CEMENTS ON SEALING ABILITY AND APATITE-FORMING ABILITY

พลรบ โพธิ์กำเนิด

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2561

ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิดต่อ  
ความสามารถในการฉีกขอบและความสามารถในการเกิดอะพาไทต์



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก  
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE EFFECT OF VARYING WATER TO POWDER RATIO OF TWO CALCIUM  
SILICATE CEMENTS ON SEALING ABILITY AND APATITE-FORMING ABILITY



PONROP POKAMNERD

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements  
for MASTER OF SCIENCE (Clinical Dentistry)  
Faculty of Dentistry Srinakharinwirot University

2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิดต่อความสามารถในการฉีกขอบและความสามารถในการเกิดอะพาไทต์

ของ

พลรบ โพธิ์กำเนิด

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์จิตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ทันตแพทย์หญิง ดร.จารุมา ศักดิ์ดี)

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร.ศิริ  
จันทร์ เจียรพุฒิ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิงชินาลย์ ปี  
ยะชน)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วรรณธนะ  
สัตตบรรณสุข)

ชื่อเรื่อง	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิดต่อความสามารถในการผนึกขอบและความสามารถในการเกิดอะพาไทต์
ผู้วิจัย	พลรบ โพธิ์กำเนิด
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ทันตแพทย์หญิง ดร. จารุมา ศักดิ์ดี

เพื่อทดสอบความแนบสนิทขอบและความสามารถในการสร้างอะพาไทต์ของวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิดเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อผง นำฟันกรามน้อยที่ถูกถอนของมนุษย์จำนวน 300 ซี่มาตัดส่วนตัวฟันออก เตรียมคลองรากฟันด้วยระบบไฟล์ซี่ห่อ ProtaperNEXT ขนาด X3 ตัดปลายรากฟันออก 3 มิลลิเมตรและเตรียมโพรงปลายรากฟันให้มีความลึก 3 มิลลิเมตรด้วยวิธีอัลตราโซนิคส์ ทำการศึกษาโดยแบ่งกลุ่มการศึกษาเป็น 2 กลุ่มตามแต่ละชนิดวัสดุด้วยการสุ่มโดยในแต่ละกลุ่มจะอุดย่นปลายรากด้วยอัตราส่วนน้ำต่อผงที่แตกต่างกัน 3 กลุ่มคือ ชัน เหลว และปกติ ต่อมาตัวอย่างที่ได้รับการอุดย่นปลายรากจนเสร็จ นำตัวอย่างแช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวร่างกายเป็นระยะเวลา 2, 7, 30 และ 60 วัน เมื่อถึงเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างมาวัดระยะช่องว่างระหว่างวัสดุกับเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและศึกษาการเกิดอะพาไทต์ด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรมิเตอร์ชนิดกระจายพลังงาน ในวันที่ 60 นำตัวอย่างที่ถูกตัดแบ่งในแนวใกล้กลางไกลออกเป็นสองส่วนและนำมาวัดระยะช่องว่างในแนวตามยาว โดยอีกครั้งหนึ่งนำมาศึกษาองค์ประกอบของธาตุในอะพาไทต์ด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรมิเตอร์ชนิดกระจายพลังงาน นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยสถิติชนิดการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางและการทดสอบแบบทูกี้ ในกลุ่มโปรรูทเอ็มทีเอ ปัจจัยของอัตราส่วนส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) แต่ระยะเวลาที่แช่ลงในสารละลายไม่มีผล โดยพบว่าอัตราส่วนเหลวพบระยะช่องว่างมากกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลในกลุ่มเรโทรเอ็มทีเอพบว่าปัจจัยของอัตราส่วนของวัสดุและระยะเวลาส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) การวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนชั้นของเรโทรเอ็มทีเอจะเกิดระยะช่องว่างมากกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ในวันที่ 7 จะมีค่าระยะช่องว่างมากที่สุดระยะช่องว่างจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป จากการศึกษาในวัสดุชนิดโปรรูทเอ็มทีเอสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนแตกต่างไปจากปกติได้แต่ในเรโทรเอ็มทีเอแนะนำให้ใช้อัตราส่วนที่ปกติแนะนำ

คำสำคัญ : เรโทรเอ็มทีเอ, โปรรูทเอ็มทีเอ, อะพาไทต์, ความแนบสนิทขอบ, เคลือบซีเมนต์

Title	THE EFFECT OF VARYING WATER TO POWDER RATIO OF TWO CALCIUM SILICATE CEMENTS ON SEALING ABILITY AND APATITE-FORMING ABILITY
Author	PONROP POKAMNERD
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Jaruma Sakdee

The purpose of this study is to investigate the marginal adaptation and apatite-forming ability of varying levels of the water to powder ratio of two brands of the calcium silicate cement. Three hundred extracted human premolar teeth were decoronated. All root canals were prepared with ProtaperNEXT size X3. The roots were resected three millimeters from the apices and retroprepared ultrasonically to three millimeters depth. All apical cavities were randomly divided into two groups: ProRoot MTA and RetroMTA. Each of the groups was retrofilled with the material assigned in consistency: thin, thick and normal. Subsequently, all samples were immersed in the simulating body fluid for four interval times: two, seven, thirty and sixty days. After completing each immersion time, the samples were examined under scanning electron microscope to measure the gap distances at the interfaces between the dentin and the surface of the material and study the topography of the apatite forming on the mature surface with an energy dispersive X-ray spectrometer (EDX). At the end point, the samples were mesiolingually cut into two halves to investigate longitudinal gaps in one half and analyze the composition of apatite in the others. All of the data with the same material were analyzed in two ways ANOVA and Tukey's test. In the ProRoot MTA group, significant effects were found in the consistency factor ( $P < 0.05$ ) but not found in the immersion time factor. A Thin consistency had more gap distance than others ( $P < 0.05$ ). In the RetroMTA group, both the consistency of material and the immersion time had an effect on the means of gap distances ( $P < 0.05$ ). The Statistical analysis was revealed that the thick consistency of RetroMTA had more gap distances than the others. The gap distances between RetroMTA and dentin in seven days of immersion time were the highest value. Then the gap distances were reduced due to more immersion time. From the study, varying water to powder ratio of ProRoot MTA can be used, but the normal consistency of RetroMTA is recommended.

Keyword : RetroMTA, ProRoot MTA, apatite, sealing ability, calcium silicate cement

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของวัสดุอุดยึดก่อน  
ปลายรากต่อคุณสมบัติที่จำเป็นในงานศัลยกรรมปลายรากฟันและเป็นประโยชน์ในคลินิก ผู้วิจัย  
ขอขอบคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยครั้งนี้

การดำเนินการวิจัยมีอาจสำเร็จลุล่วงไปได้หากปราศจากคำแนะนำของคณาจารย์ใน  
ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ วิทยาเข็นโดดอนต์ โดยเฉพาะผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ทันตแพทย์ สุวิทย์ วิมลจิตต์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์  
และเป็นแนวคิดสำคัญในการดำเนินการวิจัยในทุกขั้นตอน

กรรมกรทุกท่านในการให้คำแนะนำและแก้ไขปริญญาานิพนธ์รวมถึงบุคลากรประจำ  
ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุศาสตร์และห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด คณะ  
ทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจน  
ส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน  
ที่ผู้ศึกษาค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พลรบ โพธิ์กำเนิด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ตัวแปรการทดลอง .....	3
คำสำคัญและนิยามในการวิจัย .....	4
กรอบแนวคิดวิจัย .....	5
สมมุติฐานในการวิจัย .....	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม .....	7
1. วัสดุเคลือบซีเมนต์ซิลิเกตซีเมนต์ชนิดมินิเอร์อัลไตรออกไซด์แอ็กกรีเกต หรือ เอ็มทีเอ (Mineral Trioxide Aggregation; MTA) .....	8
1.1 คุณสมบัติทางเคมีของเอ็มทีเอ.....	8
1.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุเอ็มทีเอ .....	9
2. สมบัติของเอ็มทีเอที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุอุดยึดอนพลายราก .....	13

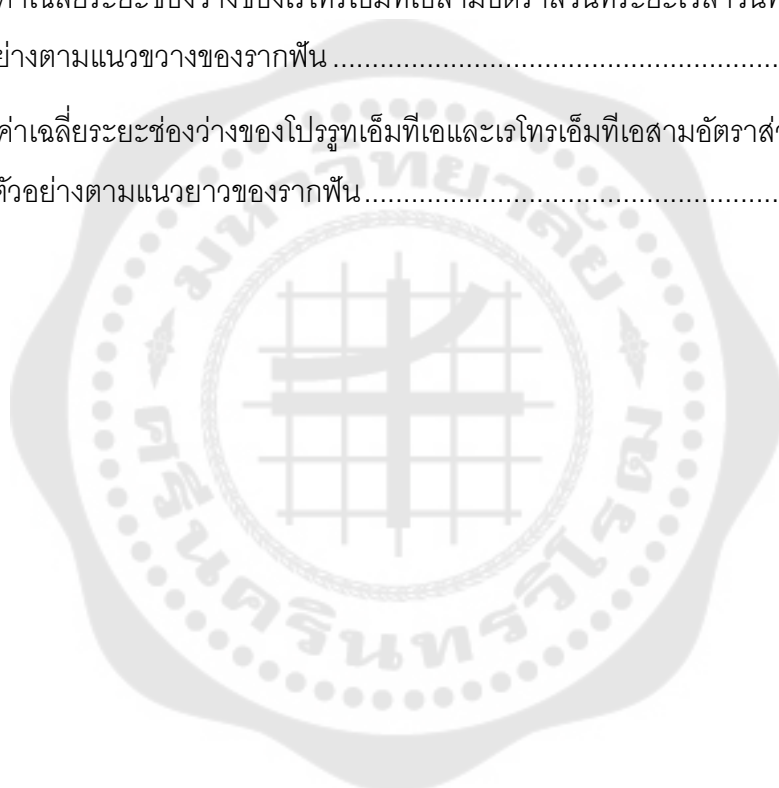


3. วัสดุเคลือบซีเมนต์ชนิดเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA) .....	15
4. ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงของวัสดุในกลุ่มเคลือบซีเมนต์.....	17
5. ความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์ของวัสดุกลุ่มเคลือบซีเมนต์ .....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	22
การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง .....	22
การเตรียมตัวอย่าง .....	22
การเตรียมวัสดุอุดย่นปลายรากฟันและการแบ่งกลุ่มการศึกษา .....	23
การเตรียมสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated body fluid, SBF) .....	24
การประเมินความเหมาะสมของวัสดุอุดย่นปลายรากฟันทั้งสองชนิด .....	25
การประเมินความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์ .....	27
การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	27
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	28
การศึกษาที่ 1 ความเหมาะสมของวัสดุกลุ่มเคลือบซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่มีการ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง.....	28
การศึกษาที่ 2 ความสามารถในการสร้างอะพาไทต์ของวัสดุกลุ่มเคลือบซีเมนต์ทั้งสอง ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับ เนื้อฟัน.....	34
บทที่ 5 อภิปรายผลการศึกษา.....	43
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา .....	48
บรรณานุกรม .....	49
ภาคผนวก.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	84

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ลำดับการเตรียมสารละลาย SBF โดยใส่สารทีละตัวตามลำดับจาก 1-10 (83).....	25
ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60 ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวางของรากฟัน .....	29
ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของเรโทรเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60 ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวางของรากฟัน .....	32
ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอสและเรโทรเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนในวันที่ 60 ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวยาวของรากฟัน .....	34



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย .....	5
ภาพประกอบ 2 การกำหนดตำแหน่งอ้างอิง 4 จุดเพื่อใช้ในการประเมินค่าเฉลี่ยช่องว่าง ภาคตัดขวางของรากฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 .....	24
ภาพประกอบ 3 กำหนดตำแหน่งอ้างอิง 4 จุดภายหลังจากแบ่งครึ่งรากตามแนวยาวของรากฟัน ณ วันที่ 60 เพื่อใช้ในการประเมินค่าเฉลี่ยช่องว่างในครึ่งส่วนแรก.....	26
ภาพประกอบ 4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดโปรทูเอเอ็มที่เอสามอัตราส่วนที่ ระยะเวลาต่างกับกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง (*และ**คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ) .....	28
ภาพประกอบ 5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดเรโทเรเอ็มที่เอสามอัตราส่วนที่ ระยะเวลาต่างกับกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อแสดงความแตกต่างกันของอัตราส่วนอย่างมี นัยสำคัญ (*และ**คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ) .....	30
ภาพประกอบ 6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดเรโทเรเอ็มที่เอสามอัตราส่วนที่ ต่างกับกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อความแตกต่างกันของช่วงเวลาการแช่ในสารละลายอย่างมี นัยสำคัญ (*และ**คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ) .....	31
ภาพประกอบ 7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองตามแนวยาวกับรากฟันของวัสดุทั้งสอง ชนิดในสามอัตราส่วน ณ วันที่ 60 กับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง (*, ** และ*** คือสัญลักษณ์แสดงระดับ นัยสำคัญทางสถิติ).....	33
ภาพประกอบ 8 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลาย จำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 2 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลาย รากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน) .....	35
ภาพประกอบ 9 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลาย จำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 7 (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลายราก ฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน).....	36

ภาพประกอบ 10 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางที่ภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 30 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน).....	37
ภาพประกอบ 11 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางที่ภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 60 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน).....	38
ภาพประกอบ 12 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวขวางที่ได้รับการอุดย่นปลายรากด้วยวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอ.....	39
ภาพประกอบ 13 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวขวางที่ได้รับการอุดย่นปลายรากด้วยวัสดุเรโทรเอ็มทีเอ.....	40
ภาพประกอบ 14 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวยาวที่ไม่พบการสร้างอะพาไทต์	41
ภาพประกอบ 15 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวยาวที่ได้รับการอุดย่นปลายรากด้วยวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ทั้งสองชนิด (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน).....	42

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ในกรณีที่การรักษาคลองรากฟันไม่ประสบความสำเร็จนั้นสามารถดูได้จากการที่ผู้ป่วยยังคงมีอาการปวด การเกิดอาการปวดกำเริบ หรือการที่รอยโรครอบปลายรากฟันยังคงอยู่รวมถึงการขยายขนาดของรอยโรค โดยทั่วไปแนวทางแก้ไขกรณีดังกล่าวทันตแพทย์นิยมใช้การรักษาคลองรากฟันซ้ำแต่ในกรณีที่ไม่สามารถกระทำได้เช่นคลองรากที่มีเดือยฟันโลหะขนาดใหญ่(1) และมีรอยโรคปลายรากฟันที่ยังคงอยู่หรือมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยพยาธิสภาพปลายรากฟันอาจจะเป็นแกรนูโลมาหรือถุงน้ำของปลายรากฟันที่ไม่ตอบสนองต่อการรักษาคลองรากฟันซ้ำ(2) กรณีเหล่านี้ที่กล่าวมาแล้วนั้นจะพิจารณาทำศัลยกรรมปลายรากฟัน

ในอดีตนั้นผลสำเร็จในการทำศัลยกรรมปลายรากฟันไม่ค่อยสูงมากนัก เนื่องจากเทคนิคและวัสดุอุดย่นปลายรากที่ไม่เหมาะสม(3-7) ต่างจากปัจจุบันที่พบว่าความสำเร็จในการทำศัลยกรรมปลายรากแบบใหม่สูงขึ้น(8-11) เนื่องจากมีการใช้กล้องจุลทรรศน์ทางทันตกรรมทำให้มองเห็นพื้นที่ทำงานได้ดีกว่า การใช้หัวอัลตราโซนิคส์เตรียมช่องว่างที่ปลายรากฟันทำให้ได้ช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่าวิธีแบบเดิมแต่ก็ยังคงครอบคลุมบริเวณปลายรากฟันได้อย่างดี(5, 8, 12) และสิ่งที่สำคัญคือมีการปรับปรุงวัสดุอุดย่นปลายรากฟันซึ่งจะเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างนั้นซึ่งสามารถป้องกันการรั่วซึมของเชื้อโรคและผลผลิตของเชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกที่นิยมกันในปัจจุบันได้แก่ซูเปอร์อีเอ (SuperEBA)(8, 9, 13) และมีเนอรัล ไตรออกไซด์ แอกริเกต (Mineral Trioxide Aggregate) หรือเอ็มทีเอ (MTA)(10, 11, 14-16)

เอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เด่นในแง่ของความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อได้ดี มีความสามารถในการผนึกขอบดีและมีความเป็นชีวคอมแพต จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าเอ็มทีเอสามารถตอบสนองได้ดีต่อเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันโดยมีการเหนี่ยวนำให้มีการสร้างเคลือบรากฟัน(17-19)มีการอักเสบเกิดขึ้นได้น้อยและเหนี่ยวนำให้มีการสร้างเกิดกระดูก(19, 20) มีความสามารถในการผนึกขอบที่ดีโดยได้รับการยืนยันด้วยการทดสอบรั่วซึมด้วยแบคทีเรีย(21, 22) นอกจากนี้ความสามารถในการผนึกขอบที่ดีพบที่เกิดจากความสามารในการสร้างผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งผลึกนี้จะเข้าไปผนึกบริเวณช่องว่างระหว่างวัสดุกับผิวของเนื้อฟันได้เสริมสร้างการผนึกขอบที่ดีมากขึ้น(23-26)

อย่างไรก็ตามเอ็มทีเอมีข้อเสียได้แก่ เมื่อนำวัสดุไปอุดย่นปลายรากฟันเอ็มทีเออาจจะถูกชะล้างหายออกไปจากในบริเวณที่ทำศัลยกรรมด้วยเลือด นอกจากนี้เนื่องจากระยะเวลาในการ

ก่อดตัวของวัสดุถึง 3 ชั่วโมงนานเกินไปทำให้วัสดุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรดอันเกิดจากการอักเสบในบริเวณรอยโรคที่ปลายรากฟันจากสิ่งที่ยกเลิกไปทั้งหมดนั้นจะทำให้สิ่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะความสามารถในการผนึกขอบและการป้องกันการรั่วซึมลดลง(27, 28) อีกประเด็นหนึ่งคือเอ็มทีเอยังคงเป็นวัสดุที่มีราคาสูง(29) จากข้อเสียดังที่ได้กล่าวที่ไปแล้วนั้นจึงมีพัฒนาวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์กลุ่มใหม่ตามมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวเช่น ไบโอเดนทีน (Biodentine), ออโธเอ็มทีเอ (OrthoMTA) และ เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA)

การปรับปรุงวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์เน้นที่การปรับปรุงระยะเวลาในการก่อดตัวของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตให้มีระยะเวลาสั้นลงเช่นในไบโอเดนทีนจะมีการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อดตัวของวัสดุ(30) และเปลี่ยนองค์ประกอบในส่วนน้ำให้เป็นโพลีเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ รวมถึงการทำให้ส่วนผงมีอนุภาคมีขนาดเล็กลงมีพื้นผิวสัมผัสมากขึ้นเหล่านี้จะทำให้ระยะเวลาในการก่อดตัวของไบโอเดนทีนเร็วขึ้นโดยมีระยะเวลาก่อดตัวเพียง 9-12 นาที

เรโทรเอ็มทีเอมีระยะเวลาในการก่อดตัวเร็วกว่าเอ็มทีเอเนื่องจากอนุภาคของเรโทรเอ็มทีเอมีขนาดเล็ก คุณสมบัติของเรโทรเอ็มทีเอมีความใกล้เคียงกับเอ็มทีเอได้แก่ มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อดี(31-34) ไม่เป็นพิษต่อเซลล์(33, 35) และมีความสามารถในการแนบสนิทและผนึกขอบได้ดี(36, 37) มีความเป็นชีวกัมมันต์ของวัสดุหรือความสามารถในการสร้างผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่จะผนึกรอยต่อระหว่างวัสดุและเนื้อฟัน เรโทรเอ็มทีเอยังมีข้อดีอีกอย่างคือราคาไม่แพงและใช้งานง่ายโดยหยดส่วนน้ำสามหยดลงบนส่วนผง ผสมและรอประมาณ 20 วินาทีที่มีความหนืดที่เหมาะสมนำไปใช้งานได้โดยง่าย

วัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์เช่น โปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอมีปฏิกิริยาก่อดตัวของวัสดุกับน้ำที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน การดัดแปลงอัตราส่วนของน้ำให้มากขึ้นหรือลดลงตามทำให้ส่วนผสมของวัสดุมีความหนืดเปลี่ยนแปลงให้เหมาะกับการใช้งานในแต่ละบุคคลและเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในคลินิก(38, 39) อัตราส่วนน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเปลี่ยนแปลงไปด้วยส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

ที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำของเอ็มทีเอมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอ็มทีเอ(40-45) โดยเมื่อปริมาณส่วนน้ำมากกว่าอัตราส่วนที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต การปลดปล่อยไอออนของแคลเซียม(44) การละลายตัวของวัสดุและความเป็นรูพรุนจะเพิ่มสูงขึ้น(43, 44)แต่ความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive

strength) และ ความแข็งแรงกดออกของเอนท์ที่เอ (Push-out bond strength) มีค่าต่ำลง(40, 45) ในทางกลับกันหากปริมาณส่วนน้ำน้อยกว่าอัตราส่วนที่ได้กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต ระยะเวลาในการก่อตัวของเอนท์ที่เอจะสั้นลง(44) และการรั่วซึมของวัสดุจะน้อยลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่น้อยลงจะทำให้ความที่บ่งชี้ของวัสดุมากขึ้นด้วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงจะมุ่งเน้นในเรื่องผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิดต่อความสามารถในการฉีกขอบและความสามารถในการเกิดอะพาไทต์

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. ศึกษาระยะเวลาช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันกับวัสดุโปรรูทเอนท์ที่เอซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวาง (transverse) กับรากฟัน
2. ศึกษาระยะเวลาช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันกับเรโพรเอนท์ที่เอซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวางกับรากฟัน
3. ศึกษาระยะเวลาช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันกับวัสดุโปรรูทเอนท์ที่เอและเรโพรเอนท์ที่เอซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 60 ตามแนวยาว (longitudinal) กับรากฟัน

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

#### กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ฟันมนุษย์ที่ถูกลอนมาโดยไม่ระบุตัวของผู้ป่วยเป็นฟันกรามน้อยล่างคลองรากเดี่ยว จำนวน 300 ซี่ ได้รับการแช่สารละลายไทมอลมาก่อนทำวิจัย

#### ตัวแปรการทดลอง

ตัวแปรอิสระ แบ่งเป็นดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อผงของเรโพรเอนท์ที่เอและโปรรูทเอนท์ที่เอ
2. ระยะเวลาที่ตัวอย่างที่ได้รับการอุดด้วยวัสดุเคลือบซีเมนต์สองชนิด สัมผัสกับสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60

ตัวแปรตาม

1. ความสามารถในการฉีกขอบของวัสดุเรโพรเอนท์ที่เอและโปรรูทเอนท์ที่เอกับเนื้อฟันที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60



2. การเกิดผลึกอะพาไทต์บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเรโทรเอ็มทีเอและโปรรูทเอ็มทีเอกับเนื้อฟันที่ระยะเวลา ณ วันที่ 60

### คำสำคัญและนิยามในการวิจัย

1. ผลึกอะพาไทต์ (apatite) คือผลึกที่ประกอบด้วยกลุ่มแคลเซียมและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อแข็งเช่นกระดูกและฟันหรืออาจจะเรียกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite)

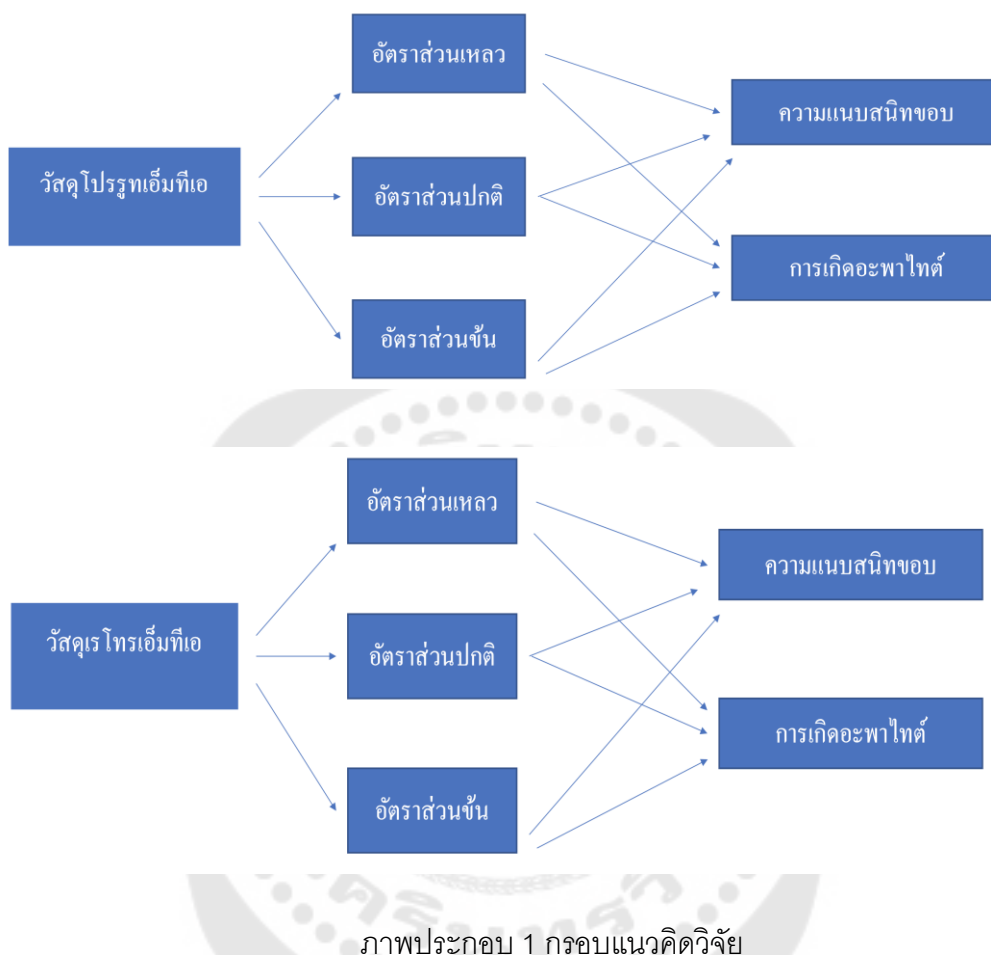
2. ความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์ (Apatite-forming ability) คือความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์บนผิวของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สองชนิด

3. แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ คือ เรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA) และโปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot MTA) ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุอุดยึดอนปลายราก





## กรอบแนวคิดวิจัย



## สมมติฐานในการวิจัย

### สมมติฐาน 1

**สมมติฐานหลัก  $H_0$**  คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันและวัสดุโปรรุธเอ็มทีเอที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวางกับรากฟันไม่ แตกต่างกัน

**สมมติฐานทางเลือก  $H_A$**  คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันและวัสดุโปรรุธเอ็มทีเอที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวางกับรากฟันแตกต่างกัน

## สมมติฐาน 2

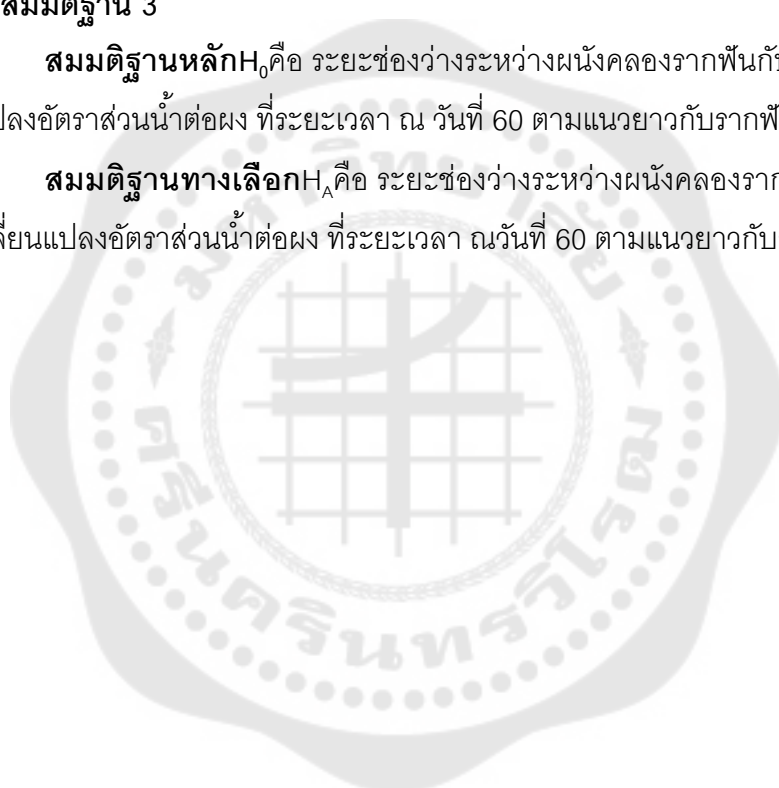
**สมมติฐานหลัก $H_0$** คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันและวัสดุเรโตรีเอ็มทีเอ ที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวางกับรากฟัน ไม่ แตกต่างกัน

**สมมติฐานทางเลือก $H_A$** คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันและวัสดุเรโตรีเอ็มทีเอที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามแนวขวางกับรากฟันแตกต่างกัน

## สมมติฐาน 3

**สมมติฐานหลัก $H_0$** คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันกับวัสดุทั้งสองชนิดที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 60 ตามแนวยาวกับรากฟันไม่ แตกต่างกัน

**สมมติฐานทางเลือก $H_A$** คือ ระยะช่องว่างระหว่างผนังคลองรากฟันกับวัสดุทั้งสองชนิดที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง ที่ระยะเวลา ณ วันที่ 60 ตามแนวยาวกับรากฟันแตกต่างกัน



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

การทำศัลยกรรมปลายรากฟันได้แก่การเปิดแผ่นเหงือกและกระดูกให้เห็นปลายรากฟันที่เกี่ยวข้องการตัดปลายรากเตรียมโพรงปลายรากฟันให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะใช้อุดและอุดย้อนปลายรากฟันปิดโพรงปลายรากฟันที่เตรียมไว้โดยการอุดย้อนปลายรากฟันเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยป้องกันการรั่วซึมซึ่งจะทำให้เกิดความล้มเหลวหลังการศัลยกรรมปลายรากฟันได้ดังนั้นการเลือกวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันที่มีสมบัติที่เหมาะสมจึงมีการคำนึงถึงคุณสมบัติในอุดมคติได้แก่ไม่เป็นสารพิษต่อเซลล์และไม่ก่อมะเร็งมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อมีความคงตัวของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงแม้ผ่านไประยะเวลานานและหากสัมผัสกับเลือดจากบริเวณพื้นที่ศัลยกรรมคุณสมบัติของวัสดุไม่ควรจะเปลี่ยนไปการใช้งานของวัสดุควรใช้งานได้ง่ายและมีความที่รังสีที่ดีสามารถเห็นได้จากภาพรังสี(46) โดยคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดคือความสามารถในการผนึกขอบที่ดีซึ่งช่วยป้องกันการรั่วซึมของเชื้อจุลินทรีย์และผลผลิตของเชื้อดังนั้นการผนึกขอบที่ดีของวัสดุส่งผลต่อความสำเร็จในการทำศัลยกรรมปลายรากฟัน(47)

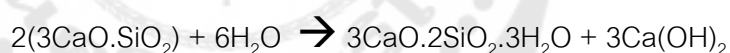
ปัจจุบันมีการนำวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มาเป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันอันได้แก่ มินอรัลไตรออกไซด์แอกกรีเกตหรือเอ็มทีเอ (Mineral Trioxide Aggregate; MTA) ไบโอเดนทิน และ เรโทรเอ็มทีเอ ซึ่งพิจารณาแล้วว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีรายงานเกี่ยวกับความสำเร็จในการรักษาโดย Chong และคณะ(11) ประเมินอัตราการประสบความสำเร็จของวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน เอ็มทีเอ กับ ไออาร์เอ็ม เมื่อใช้ในงานศัลยกรรมปลายรากฟัน ประเมินผลความสำเร็จที่ 1 และ 2 ปีโดยใช้ภาพรังสีและอาการทางคลินิก ตาม แนวปฏิบัติของ สมาคมวิทยาเอ็นโดดอนต์แห่งยุโรป ปี 1994 ผลพบว่า ที่ 1 ปี กลุ่ม เอ็มทีเอ เกิดการหายที่เร็วกว่า ไออาร์เอ็ม จำนวนพื้นที่เกิด การหายอย่างสมบูรณ์ในกลุ่ม เอ็มทีเอ มีมากที่สุด และคำนวณอัตราการประสบความสำเร็จของเอ็มทีเอ ได้ร้อยละ 84 ส่วน ไออาร์เอ็ม ร้อยละ 76 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 2 ปี จำนวนพื้นที่เกิดการหายอย่างสมบูรณ์ในกลุ่มเอ็มทีเอ มีมากที่สุด และอัตราการประสบความสำเร็จของเอ็มทีเอ เท่ากับร้อยละ 92 ส่วน ไออาร์เอ็ม ร้อยละ 87 ซึ่งไม่พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากเอ็มทีเอ มีคุณสมบัติในการกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็งจะเห็นว่าวัสดุในกลุ่มที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงอุดมคติและมีผลสำเร็จในการรักษาสูง

## 1. วัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดมินิเออร์อัลไตรออกไซด์แอกกรีเกต หรือ เอ็มทีเอ (Mineral Trioxide Aggregation; MTA)

### 1.1 คุณสมบัติทางเคมีของเอ็มทีเอ

เอ็มทีเอผลิตออกมาในชื่อการค้าเรียกว่า โปรรูทเอ็มทีเอ(ProRoot MTA) ในครั้งแรกจะผลิตเป็น เอ็มทีเอสีเทา แต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟันจึงมีการพัฒนาวัสดุเป็นเอ็มทีเอสีขาว โดยจากการศึกษาจะพบว่า เอ็มทีเอสีขาว นั้นมีส่วนประกอบของธาตุเหล็ก, อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม น้อยกว่า เอ็มทีเอสีเทา เอ็มทีเอสีเทามีองค์ประกอบได้แก่ ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) กับ บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide)(48)

เอ็มทีเอ มีปฏิกิริยาการก่อตัวของวัสดุกับน้ำและหลังจากนั้นมีความคงตัวภายในน้ำ เมื่อส่วนผงของเอ็มทีเอ ผสมกับโมเลกุลของน้ำกลั่นจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) โดยสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญสองตัวคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำก่อนไดแคลเซียมซิลิเกตจากนั้นเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) และระยะเวลาต่อมาจะเกิดการเปลี่ยนไปเป็นผลึกและเป็นเจลแข็งที่มีรูพรุนเกิดขึ้นโดยมีสมการของปฏิกิริยาไฮเดรชันแสดงไว้ดังนี้(49, 50)



จากการตกตะกอนเกิดผลึกของแคลเซียมทำให้อัตราส่วนของแคลเซียมซิลิเกตลดลง และจากการที่เกิดปฏิกิริยาทำยที่สุดเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้หลังปฏิกิริยาความเป็นเบสจะสูงขึ้น (51, 52) Camilleri(52) พบว่า ในส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนใหญ่ที่พบได้จะเป็นผลึกรูปร่างชัดเจนชัดเจน (crystalline) แต่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะไม่มีรูปร่างที่แน่นอน (amorphous) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต พบว่าเป็นลักษณะเจลที่สร้างอยู่บนอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตเมื่อระยะเวลาผ่านไปแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะแข็งตัวขึ้นเป็นลักษณะตาข่ายของแข็งซึ่งจะเป็นรูพรุนโดยจะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ใจกลางของช่องว่างรูพรุนปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 10-15 ของปริมาณเจลที่เกิดขึ้น Asgary และคณะ(53) ทำการศึกษาพื้นผิวของ เอ็มทีเอ พบว่า เอ็มทีเอสีเทา นั้นจะมีลักษณะผลึกที่ใหญ่กว่า

เอมที่เอสซีขาวถึง 8 เท่า และพบว่าจะมีออกซิเจนแพร่กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของ เอ็มที่เอ ทั้ง ส่วนผลึกและส่วนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังนั้นส่วนประกอบส่วนใหญ่จะพบในรูปของสารประกอบ ออกไซด์ บิสมัทออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในเอ็มที่เอ ทำให้มีความที่บ่งชี้ของวัสดุโดย บิสมัทออกไซด์จะพบทั้งในเอ็มที่เอ ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเอ็มที่เอ ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วและยังเป็นสามารถพบได้ในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

## 1.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุเอ็มที่เอ

ระยะเวลาก่อตัวของเอ็มที่เอ อัตราส่วนในการเตรียมเอ็มที่เอเพื่อการใช้งานในคลินิก จากการศึกษาในปี 1993 Torabinejad ใช้อัตราส่วนผงต่อน้ำเท่ากับ 3:1 โดยระยะเวลาเฉลี่ยในการ ก่อตัวของวัสดุคือ  $165 \pm 5$  นาที จะใช้เวลาในการก่อตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเช่น อะมัลกัม, ไออาร์เอ็ม หรือ ซุปเปอร์อีบีเอที่ใช้อุดย้อนปลายราก(54) ในวัสดุกลุ่มเอ็มที่เอ ถ้าเทียบระหว่าง เอ็มที่เอสซีเทา กับ เอ็มที่เอสซีขาว จะพบว่า เอ็มที่เอสซีเทา นั้นจะมีระยะเวลาก่อตัวของวัสดุเริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดที่มากกว่า เอ็มที่เอสซีขาว (55, 56) และถ้าเทียบระหว่างวัสดุ เอ็มที่เอสซีขาว กับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะพบว่า เอ็มที่เอสซีขาว ก็มีระยะเวลาก่อตัวที่นานกว่าเช่นกันทั้งนี้เนื่องจาก เอ็มที่เอสซีขาว มีส่วนประกอบของ กำมะถัน และ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ที่น้อยกว่า ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์(57) ในงานซ่อมรอยทะลุง่ามรากฟันหาก เอ็มที่เอ มีระยะเวลาในการก่อตัวที่ค่อนข้างนาน ทำให้การใช้งานไม่ค่อยสะดวก ทำให้มีความพยายามหาวิธีที่จะทำงานให้เสร็จในครั้งเดียว เช่น การที่ใช้ วัสดุชนิดกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์หรือจีไอซี (Glass ionomer cement; GIC) ปิดทับลง บน เอ็มที่เอ ในการซ่อมรอยทะลุ พบว่าการใช้ จีไอซี ไม่มีผลต่อเวลาการก่อตัวของ เอ็มที่เอ (58) นอกจากนี้มีความพยายามทำให้การใช้งานเอ็มที่เอ ง่ายขึ้นโดย Budig และ Eleazer ใช้ เอ็มที่เอ ในรูปผงเป็นวัสดุอุดคลองรากฟันโดยอาศัยความชื้นที่ซึมผ่านเนื้อฟันในการก่อตัว ซึ่งตัวอย่างส่วนใหญ่มีการก่อตัวภายหลังจากเก็บตัวอย่างในน้ำเกลือแต่ต้องจะใช้เวลานานถึง 72 ชั่วโมง(59) การ เก็บตัวอย่างไว้ในที่แห้งไม่มีความชื้นเลย จะส่งผลให้วัสดุไม่ก่อตัว รวมทั้งทำให้เกิดการรั่วซึมของ แบริกที่เร็วมากขึ้น(60) ดังนั้นไม่แนะนำให้ใช้ เอ็มที่เอ โดยที่ไม่มีความชื้นภายนอกมาสัมผัสเลยใน การทำงานเพียงครั้งเดียวสอดคล้องกับการศึกษาของ Walker เปรียบเทียบผลของสภาวะต่าง ๆ ในการก่อตัวของ เอ็มที่เอ ต่อ กำลังตัดขวางของวัสดุโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มคือกลุ่มที่สัมผัสกับความชื้น 2 ด้านเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง, 1 ด้าน 24 ชั่วโมง, 2 ด้าน 72 ชั่วโมง และ 1 ด้าน 72 ชั่วโมง พบว่ากลุ่มที่สัมผัสกับความชื้น 2 ด้านระยะเวลา 72 ชั่วโมงจะให้โค้งงอสูงสุด อย่างมี นัยสำคัญและแนะนำว่าควรจะใช้สลัสนี้ขึ้นบนผิว เอ็มที่เอ ก่อนอุดด้วยวัสดุชั่วคราวและควรทิ้งไว้ อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้วัสดุมีกำลังตัดขวางที่เพียงพอ(61)

การขยายตัวของอะตอมของวัสดุ (Setting expansion) การศึกษาเกี่ยวกับการขยายตัวของเอมทิเอในขณะที่เกิดการก่อตัวของวัสดุซึ่งพบว่าในขณะที่เกิดการก่อตัวของเอมทิเอสีขาว จะเกิดการขยายตัวมากกว่าเอมทิเอสีเทา เล็กน้อย (55, 56) แต่ Storm และคณะ (62) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการขยายตัวของ เอมทิเอสีเทา และเอมทิเอสีขาว พบว่า เมื่อทำการปิดบนผิวของเอมทิเอ ด้วยสารละลายแอสคัลบาลาสซอลท์ (Hank's balanced salt solution) และน้ำกลั่นนั้น จะเกิดการขยายตัวของ เอมทิเอสีเทา มากกว่าเมื่อเทียบกับเอมทิเอสีขาว โดยถ้าดูเฉพาะเอมทิเอสีเทา จะพบว่าเมื่อปิดบนผิวด้วยน้ำกลั่นจะเกิดการขยายตัวมากกว่าปิดด้วยสารละลายแอสคัลบาลาสซอลท์ แต่ถ้าเป็น เอมทิเอสีขาว จะพบว่าปิดผิวด้วยสารละลายแอสคัลบาลาสซอลท์จะเกิดการขยายตัวมากกว่าเมื่อปิดด้วยน้ำกลั่นซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมาจากส่วนประกอบที่ต่างกันของ เอมทิเอ ทั้งสองชนิดหรืออาจจะมาจากส่วนประกอบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HNa}_2\text{O}_4\text{P}$ ) ในสารละลายแอสคัลบาลาสซอลท์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชนิดสารละลายที่มาสัมผัสกับเอมทิเอ และชนิดของ เอมทิเอ จะส่งผลการขยายตัวของอะตอมของวัสดุ และที่สำคัญการที่วัสดุมีการขยายตัวในขณะที่มีการก่อตัวของวัสดุนี้จะส่งผลมีความสามารถในการผนึกขอบ(62)

ความสามารถในการละลายตัว (Solubility) คุณสมบัติในการละลายน้ำของ เอมทิเอ นั้นมีหลายการศึกษาได้ทำการศึกษาและพบว่า เอมทิเอ ไม่ละลายน้ำหรืออัตราในการละลายน้ำต่ำ ซึ่งในการศึกษาของ Islam พบว่า เอมทิเอสีเทา จะละลายน้ำได้มากกว่า เอมทิเอสีขาว และถ้าเปรียบเทียบระหว่าง เอมทิเอสีขาว กับ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะละลายน้ำน้อยกว่าเอมทิเอสีขาว (55) ซึ่งจะแตกต่างจากการศึกษาของ Danesh พบว่า เอมทิเอสีขาว จะละลายน้ำน้อยกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ทั้งสองชนิด (63) นอกจากนี้โดยคุณสมบัติในการละลายจะมากหรือน้อยขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อผงด้วยซึ่งถ้ายิ่งมากหรือปริมาณส่วนน้ำมากโอกาสในการเกิดรูพรุนและละลายน้ำจะยิ่งสูงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fridland และ Rosado เกี่ยวกับการเกิดรูพรุนและความสามารถในการละลายตัวของเอมทิเอที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อผงที่แตกต่างกัน พบว่ายิ่งการผสมมีอัตราส่วนที่มีปริมาณของน้ำมากจะยิ่งเพิ่มการปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออก ปฏิกิริยาของเอมทิเอ การที่วัสดุมีองค์ประกอบที่เป็นบิสฟีนอลเอซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำและเป็นส่วนผสมที่ช่วยให้เอมทิเอที่ไม่สามารถละลายน้ำไปด้วยเช่นกัน (43) มีการศึกษารายงานว่าเอมทิเอสีขาว จะมีน้ำหนักที่ลดลงเมื่อผ่านไประยะเวลา 7 วันภายหลังจากที่วัสดุลงในสารละลายในร่างกายแต่ต่อมา 30 วันวัสดุดังกล่าวจะมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุที่ลดลงไปนั้นเกิดจากการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากตัววัสดุจากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาจากการสร้างผลึกอะพาไทต์ขึ้นบนผิวของวัสดุ เอมทิเอสีขาว ซึ่งแคลเซียม



ไอออนจะจับกับฟอสเฟตไอออนที่อยู่ในสารละลายในร่างกาย(64) หากมีการใช้สารตัวเร่งต่าง ๆ ผสมเข้าไปให้เอมที่เอเกิดปฏิกิริยาก่อตัวเร็วขึ้นดังเช่น Antunes และ Bortoluzzi พบว่าการผสมแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เข้าไปในเอมที่เอสีขาว จะทำให้เกิดการปล่อยแคลเซียมไอออนจากเอมที่เอสีขาว มากขึ้นใน 24 ชั่วโมงแรก และการปล่อยแคลเซียมไอออนที่มากขึ้นนี้จะไปทำให้จำนวนของเซลล์ที่เกาะบนผิวเอมที่เอลดน้อยลง(65) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการละลายตัวของเอมที่เอจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ ชนิดของเอมที่เอ, ระยะเวลาที่มีการสัมผัสกับสารละลายในร่างกายและอัตราส่วนน้ำต่อผงที่ผสม โดยความสามารถในการละลายตัวจะแสดงออกถึงความสามารถในการปลดปล่อยแคลเซียมไอออน

ความแข็งแรงทางแรงกด (Compressive strength) และความแข็งแรงกดออก (push-out strength) ความแข็งแรงของวัสดุดังกล่าวนี้มีความสำคัญสำหรับการใช้งานทางคลินิกบางกรณีเช่น การซ่อมรอยทะลุบริเวณง่ามรากฟันและการทำไดเร็ค พัลป์แคปปิง (direct pulp capping) ซึ่งวัสดุที่ใช้ควรมีความแข็งแรงมากพอสำหรับทนต่อแรงบิดเคี้ยว จากการศึกษาของ Torabinejad ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงทางแรงกดของวัสดุสี่ชนิดคือ เอมที่เอ, อะมัลกัม, ไออาร์เอม หรือ ซุปเปอร์อีบีเอ จะพบว่าใน 24 ชั่วโมงแรกนั้น ความแข็งแรงทางแรงกดของเอมที่เอ จะน้อยกว่าวัสดุทั้งสามชนิด แต่หลังจาก 3 อาทิตย์จะพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงทางแรงกด ที่ 24 ชั่วโมงแรกหลังผสมประมาณ 40 เมกกะปาสคาล และจะเพิ่มเป็น 67.3 เมกกะปาสคาลเมื่อผ่านไป 21วัน(54) เนื่องจากการศึกษาของ Dammaschke พบว่าด้วยส่วนประกอบหลักของเอมที่เอ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเวลาเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นไดแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตทำให้ต้องใช้เวลหลายวันหลังผสมกว่าที่เอมที่เอ ถึงจะมีความแข็งแรงทางแรงกดและความแข็งแรงกดออกสูงสุด(57)

กำลังดัดขวางของวัสดุ (Flexural strength) การศึกษาของ Torabinejad และ Chivian ได้แนะนำว่าควรวางลำสี่ขึ้นบนวัสดุ เอมที่เอสีเทา ในงานเช่นการซ่อมง่ามรากฟัน การทำ pulp capping และการสร้างตัวกั้นปลายราก (apical barrier)(66) โดย Walker ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการให้ความชื้นแก่ เอมที่เอ 1 และ 2 ด้าน และผลต่อกำลังดัดขวางของ เอมที่เอ พบว่าการวางลำสี่ที่เปียกบนผิวทั้งสองด้านของ เอมที่เอสีขาว จะให้ กำลังดัดขวางของเอมที่เอ ที่สูงกว่าการวางไว้ด้านเดียว โดยจะมีค่าสูงที่ 24 ชั่วโมงแรก โดยที่หลังจาก 72 ชั่วโมงจะมีค่าจะลดลง ดังนั้นจึงควรเอาลำสี่ที่เปียกออกหลังจาก 24 ชั่วโมง(61)

สภาพ pH จากการศึกษ Torabinejad พบว่าค่า pH หลังผสมของเอมทีเอ หลังผสมเฉลี่ยเท่ากับ 10.2 และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยที่ 3 ชั่วโมงหลังผสมจะมีค่าสูงขึ้นเป็น 12.5 โดยหลังผสม 60 นาที เอ็มทีเอสีขาวย จะมีค่า pH สูงกว่าเมื่อเทียบกับเอ็มทีเอสีเทา โดยค่า pH ที่เพิ่มขึ้นหลังผสมนั้นเป็นผลมาจากการปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน(54)

ขนาดอนุภาค รูปร่างของเอมทีเอ และความแข็งผิวระดับจุลภาค (surface microhardness)เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคระหว่าง เอ็มทีเอสีขาว, เอ็มทีเอสีเทา และ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดย Camilleri พบว่า เอ็มทีเอสีขาวย นั้นจะมีขนาดอนุภาคละเอียดเล็กที่สุดและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด(67) ในขณะที่ เอ็มทีเอสีเทา และ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันและมีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน(68)โดยพบว่าขนาดอนุภาคของเอมทีเอสีขาวย จะมีขนาดประมาณน้อยกว่า 1 ถึง 30 ไมโครเมตรก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(52) ขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุโดยขนาดของอนุภาคที่เล็กจะทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับของเหลวที่ผสมกันได้มากขึ้นทำให้มีความแข็งแรงในช่วงแรกที่สูงขึ้นรวมทั้งสามารถใช้งานได้ง่ายซึ่งถ้าเทียบกันระหว่าง เอ็มทีเอสีเทา และ เอ็มทีเอสีขาวยนั้น เอ็มทีเอสีขาวย จะมีขนาดที่เล็กละเอียดกว่าทำให้แข็งแรงและใช้งานได้ง่ายกว่า โดย Komabayashi และ Spangberg ศึกษาเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างอนุภาคของ เอ็มทีเอ และ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าอนุภาคของ เอ็มทีเอ ที่มีขนาดเล็กเท่ากับ 1.5 ไมครอนซึ่งเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเนื้อฟัน ซึ่งอาจช่วยให้เกิดความสามารรถในการฉีกขอบที่ตึกว่าหลังจากการผสมโดยสิ่งทีสรุปในการศึกษานี้เป็นเพียงแค่อธิสมมติฐานเท่านั้นเพราะในทางคลินิกหลังจากที่เตรียมโพรงรากฟันก่อนอุดย่นปลายรากจะมีชั้นของสเมียร์ (smear layer) เกิดขึ้นบดบังส่วนของท่อเนื้อฟันหากไม่มีการกำจัดชั้นดังกล่าวนี้ก่อน(68) ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลึกของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปร่างต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นปัจจัยด้วยเช่นกัน โดย Lee และคณะ(69) ศึกษาผลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอมทีเอ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดผลึกขึ้นทั้งลักษณะคล้ายรูปเข็มและผลึกทรงลูกบาศก์ซึ่งจะพบได้โดดเด่นเป็นส่วนใหญ่ โดยผลึกคล้ายรูปเข็มจะแทรกอยู่ระหว่างผลึกทรงลูกบาศก์ แต่ในสภาวะที่เป็นกรดจะไม่พบผลึกดังกล่าวนี้ ดังนั้นที่ระยะเวลา 7 วันพบว่าผลของค่า pH ของสิ่งแวดล้อมจะส่งผลต่อรูปร่างของผลึกที่เกิดขึ้นคือเอมทีเอ ที่เก็บไว้ในน้ำกลั่นที่ค่า pH 7 จะพบลักษณะผลึกทั้งคล้ายรูปเข็มและ ทรงลูกบาศก์ส่วนเอมทีเอ ที่เก็บไว้ในน้ำเกลือที่ค่า pH 7 ก็ จะพบลักษณะผลึกทั้งสองชนิดเช่นกัน แต่เมื่อเก็บตัวอย่างไว้ที่ค่า pH 5 จะพบลักษณะของผลึกจะ



มีขนาดใหญ่กว่า,พบลักษณะเป็นชั้นบาง ๆบนผิวด้านนอกของผลึกทรงลูกบาศก์,พบลักษณะผลึกทรงลูกบาศก์น้อยลงและจะไม่พบผลึกคล้ายรูปเข็ม แต่ในขณะที่การศึกษาของ Namazikhahไม่พบความแตกต่างของ เอ็มทีเอ ที่เก็บไว้ในสภาวะกรดและสภาวะค่า pH ปกติโดยตัวอย่างที่เก็บในค่า pH ปกติ จะมีแค่ลักษณะรูพรุนของเอ็มทีเอ จะมีมากกว่า และในสภาวะที่สิ่งแวดล้อมเป็นกรดนอกจากจะส่งผลทำให้รูปร่างของผลึกภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ไม่มีผลึกรูปร่างคล้ายเข็มแล้วยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเช่นความแข็งผิวระดับจุลภาค (microhardness) ของวัสดุมีค่าลดลงด้วย(28) สอดคล้องกับ Wang และคณะ(70) พบว่าเมื่อเอ็มทีเอ สัมผัสกับกรดจะทำให้มีความเป็นผลึกน้อยลง มีความเป็นรูพรุนมากขึ้นและค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคต่ำลง

## 2. สมบัติของเอ็มทีเอที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุอุดยึดอนปลายราก

ความสามารถในการผนึกขอบ (Sealing ability) ในปี 1993 Torabinejad และคณะ(71) เริ่มมีการนำวัสดุตัวใหม่เข้ามาใช้ในการอุดยึดอนปลายรากฟันซึ่งวัสดุนั้นก็คือ mineral trioxide aggregate (MTA) การศึกษานี้ต้องการทดสอบความสามารถในการผนึกขอบของวัสดุ 3 ตัวคือ อะมัลกัมที่ปราศจากสังกะสี, ซุปเปอร์อีบีเอ และ เอ็มทีเอ โดยการทดสอบการรั่วซึมของสีย้อม ผลพบว่า MTA มีการรั่วซึมน้อยกว่า ซุปเปอร์อีบีเอ และอะมัลกัมที่ปราศจากสังกะสีตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อมาในปี 1994 Torabinejad และคณะ(72) ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงเรื่องการปนเปื้อนเลือดระหว่างอุดคลองรากฟันว่าจะมีผลต่อการรั่วซึมของวัสดุอุดยึดอนปลายรากฟันหรือไม่ โดยครั้งนี้ศึกษาวัสดุอุดยึดอนปลายรากฟัน 4 ชนิดคือ อะมัลกัมที่ปราศจากสังกะสี, ไออาร์เอ็ม, ซุปเปอร์อีบีเอ และ เอ็มทีเอ ผลพบว่า วัสดุที่มีค่ารั่วซึมของสีย้อมน้อยที่สุดทั้งที่อุดแบบปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนเลือดก็คือ เอ็มทีเอ ต่อมาในปี 1996 Bates และคณะ(73) ต้องการยืนยันถึงคุณสมบัติความสามารถในการผนึกขอบของ เอ็มทีเอ จึงได้ศึกษาโดยเปลี่ยนวิธีเป็นการทดสอบการรั่วซึมของของเหลว (fluid filtration) โดยพบว่าเอ็มทีเอมีความสามารถในการผนึกขอบที่เหนือกว่าวัสดุอะมัลกัม การทดสอบการรั่วซึมที่ผ่านมาอาจจะไม่ได้แสดงการรั่วซึมของแบคทีเรียที่แท้จริงดังนั้น Torabinejad และคณะ(21) ได้ทดสอบการรั่วซึมของเชื้อแบคทีเรียเพื่อประเมินความสามารถในการผนึกขอบของวัสดุอุดยึดอนปลายรากฟัน 4 ชนิดคือ อะมัลกัม, ไออาร์เอ็ม, ซุปเปอร์อีบีเอ และเอ็มทีเอ โดยแบคทีเรียที่เลือกใช้เป็นชนิด *Staphylococcus epidermidis* ผลการศึกษาพบว่า หากอุดยึดอนปลายรากฟันด้วย อะมัลกัม จะเริ่มพบการรั่วซึมได้ในช่วง 6-50 วัน ไออาร์เอ็มพบในช่วง 8-52 วัน ซุปเปอร์อีบีเอ พบในช่วง 11-57 วัน ซึ่งวัสดุอุดทั้ง 3 ชนิดนี้ไม่มีความแตกต่างกันของการเกิดการรั่วซึม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนเอ็มทีเอ เวลาผ่านไป 90 วันก็ยัง

ไม่พบการเกิดการรั่วซึมของแบคทีเรียเลยขึ้นนั้นแสดงว่า เอ็มทีเอมีคุณสมบัติความสามารถในการฝึกรักษาที่ต่ำกว่าวัสดุอีกสามชนิด Torabinejad และคณะ(74) ทำการศึกษาเพื่อดูผลของความสามารถในการฝึกรักษา (marginal adaptation) ของวัสดุอุดอุดยอนปลายรากฟัน 4 ชนิดคือ อะมัลกัม ไออาร์เอ็ม ซุปเปอร์อีบีเอ และเอ็มทีเอ การทดสอบทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และใช้ อีพอกซีเรซินจำลองพื้นผิวของรากฟันขึ้นมาเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน ผลพบว่าเอ็มทีเอ เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการฝึกรักษาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุ 3 ชนิดที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสามารถในการฝึกรักษาเมื่อทดสอบทั้งในส่วนของวิธีการรั่วซึมในทุกเทคนิคอาจพอที่จะสรุปได้ว่า เมื่อมีการผ่าตัดปลายรากฟันถ้าเป็นไปได้ควรมีการอุดยอนปลายรากฟัน เนื่องจากไม่แน่ใจว่าในคลองรากฟันจะมีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่หรือไม่ การอุดยอนปลายรากฟันจะช่วยป้องกันการรั่วซึมจากในคลองรากฟันสู่นเนื้อเยื่อรอบปลายรากได้ และวัสดุที่แนะนำให้ใช้ที่มีความสามารถในการฝึกรักษาที่ดี คือ เอ็มทีเอ นอกจากนี้ เอ็มทีเอให้ค่าความสามารถในการฝึกรักษาที่ดีซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปในทางเดียวกับผลการศึกษาของความสามารถในการฝึกรักษา

ความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของเอ็มทีเอ ในปี 1995 Torabinejad และคณะ(18) ได้สนใจศึกษาผลการตอบสนองของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันสุนัขกับวัสดุ เอ็มทีเอ และอะมัลกัม จากการศึกษานี้ผลพบว่า เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเอ็มทีเอ กับอะมัลกัม พบว่าเอ็มทีเอ เกิดการอักเสบบริเวณเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันน้อยกว่า ยิ่งไปกว่านั้นยังพบเคลือบรากฟันบนพื้นผิวของเอ็มทีเอด้วย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเอ็มทีเอ มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุอุดยอนปลายรากฟันได้ ส่วนผลการศึกษาในปี 2009 ที่ทำในลิงก็ให้ผลสอดคล้องกัน(17) การศึกษาของ Baek และคณะ(19) มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟันต่อวัสดุอุดยอนปลายรากฟัน 3 ชนิดคือ อะมัลกัม ซุปเปอร์อีบีเอ และเอ็มทีเอ เป็นการศึกษาในสุนัข โดยประเมินผลหลังจากทำศัลยกรรมปลายรากฟันไป 5 เดือนผลพบว่า มีความแตกต่างกันของวัสดุทั้ง 3 ชนิดในเรื่องระดับของการอักเสบ ชนิดของเซลล์อักเสบที่เข้ามา จำนวนของการสร้างไฟบรอสแคปซูลการเกิดเคลือบรากฟันเหนือต่อวัสดุ การหายของกระดูก และความหนาของเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งวัสดุเอ็มทีเอ แสดงการตอบสนองที่ดีที่สุด โดยสามารถพบเคลือบรากฟันบนพื้นผิวของเอ็มทีเอได้ สรุปได้ว่าเอ็มทีเอ เป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้ดีที่สุดเพราะนอกจากจะทำให้เกิดการอักเสบต่ำแล้ว ยังมีความสามารถเหนียวนำไปเกิดการสร้างเคลือบรากฟันบนพื้นผิวของวัสดุได้อีกด้วย

สมบัติการต้านเชื้อ การศึกษาเกี่ยวกับการต้านเชื้อราและแบคทีเรียของเอ็มทีเอ ยังคงมีการศึกษาที่ให้ผลแตกต่างกันบางการศึกษาพบว่าเอ็มทีเอ ยับยั้งเชื้อบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก เชื้อที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละการศึกษาแตกต่างกันไป รวมทั้งชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นคอนกรีตอย่างเช่น การศึกษาของ Torabinejad ศึกษาคุณสมบัติการต้านแบคทีเรียของวัสดุอุดยอนปลายากแต่ละชนิดพบว่าเอ็มทีเอ มีผลต่อเชื้อแบคทีเรียชนิดที่สามารถดำรงอยู่ในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน แต่ไม่มีผลต่อเชื้อแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนในทางตรงกันข้าม ซุปเปอร์อีบีเอ และ แซทไฮดี ให้ผลต่อเชื้อทั้ง 2 ชนิด(75) และการศึกษาของ Mohammadi เป็นอีกการศึกษาหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเอ็มทีเอสีเทา และเอ็มทีเอสีขาวยมี เชื้อราทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากค่าพีเอช สูงและสารบางอย่างที่ถูกปล่อยออกมาจากเอ็มทีเอ แต่ก็มีการศึกษาที่ให้ผลขัดแย้งเช่นกัน(76)

### 3. วัสดุเคลือบซีเมนต์ชนิดเรโทรเอ็มทีเอ (RetroMTA)

วัสดุชนิดนี้ได้รับการพัฒนาโดย BioMTA (Meta Biomed Co.,Ltd) ประเทศเกาหลีใต้ เป็นวัสดุในกลุ่มเคลือบซีเมนต์ชนิดซีเมนต์เช่นเดียวกับโปรรูทเอ็มทีเอ แต่ต่างกันตรงที่ เรโทรเอ็มทีเอจะไม่มีพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ องค์ประกอบทางเคมีของเรโทรเอ็มทีเอจะมีสารประกอบ ได้แก่ เคลือบคาร์บอนเนต ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และเคลือบเซอร์โคเนียเชิงซ้อน นอกจากนี้ ในเรโทรเอ็มทีเอ ไม่พบโลหะหนักเช่น โครเมียม อาร์เซนิก และนิกเกิล ซึ่งมีอยู่ในโปรรูทเอ็มทีเอ

ตามบริษัทผู้ผลิตเรโทรเอ็มทีเอ มีส่วนผสมสีขาว มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า โปรรูทเอ็มทีเอ ขนาดของอนุภาคเรโทรเอ็มทีเอ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.62 ไมโครเมตร ในขณะที่โปรรูทเอ็มทีเอเท่ากับ 6.9 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคที่เล็กเช่นนี้จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับส่วนน้ำมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและลดระยะเวลาก่อตัว ทำให้มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่ 3 นาที ในขณะที่โปรรูทเอ็มทีเอ จะมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่ 74 นาที

ในบริเวณที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยวัสดุกลุ่มเคลือบซีเมนต์ชนิดซีเมนต์โดยคำนึงถึงความสวยงาม เรโทรเอ็มทีเอ เป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากถึงแม้ว่าวัสดุมีการสัมผัสกับเลือดแล้ววัสดุก็จะไม่ทำให้ฟันมีการเปลี่ยนสีโดย Kang และคณะ(77) สังเกตการเปลี่ยนสีของวัสดุที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ โปรรูทเอ็มที เอเอ็มทีเอแองเจิล (MTA Angelus), เอ็นโดเซม (EndocemZr) และเรโทรเอ็มทีเอ พบว่าในเอ็นโดเซม และเรโทรเอ็มทีเอ มีการเปลี่ยนสีของฟันน้อยที่สุด ดังนั้นเรโทรเอ็มทีเอ จึงเหมาะสำหรับการบำบัดเพื่อคงความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในฟันและการซ่อมรอยทะลุบริเวณฟันหน้า นอกจากนี้การสัมผัสกับเลือดของเรโทรเอ็มทีเอก็ไม่ทำให้คุณสมบัติบางอย่างของวัสดุด้อยลง การศึกษาของ Song และคณะ(78) ศึกษาความแข็งผิวระดับจุลภาค (surface microhardness)

ของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ได้แก่โปรรูทเอ็มทีเอ ออโธเอ็มทีเอ(OrthoMTA) และเรโทรเอ็มทีเอ โดยเมื่อสัมผัสกับน้ำเกลือและเลือดแล้วพบว่า ออโธเอ็มทีเอ(OrthoMTA) และเรโทรเอ็มทีเอ ไม่ทำให้ความแข็งแรงระดับจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่นเดียวกัน Ustun และคณะ(79) ยังรายงานว่าเมื่อสัมผัสกับเลือด โปรรูทเอ็มทีเอและ เรโทรเอ็มทีเอ มีค่าความแข็งแรงพันธะที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับไบโอเดนทินซึ่งให้ค่าต่ำสุด ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้จึงสรุปว่า เรโทรเอ็มทีเอ เป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาใช้งานในทางคลินิกได้ดีโดยเฉพาะในบริเวณที่มีการสัมผัสกับเลือดเช่น ในงานศัลยกรรมปลายรากฟัน เป็นต้น

องค์ประกอบทางเคมีของเรโทรเอ็มทีเอ ซึ่งมีแคลเซียมเซอร์โคเนียเชิงซ้อนจะสามารถทำให้ได้ความทึบของภาพรังสีที่ดีซึ่งสามารถใช้ในทางคลินิกได้ถึงแม้ว่าในการศึกษาของ Souza คณะ(35) จะพบว่าโปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความทึบรังสีที่สูงกว่า เรโทรเอ็มทีเออย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเกิดปฏิกิริยาเรโทรเอ็มทีเอมีความเป็นเบสโดยค่าพีเอชเริ่มต้นจะเท่ากับ 12.5 และเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์ค่าพีเอชจะลดลงเท่ากับ 8.0 ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Souza และคณะ(35) พบว่าค่าพีเอชระหว่างเรโทรเอ็มทีเอ และโปรรูทเอ็มทีเอ มีค่าใกล้เคียงกันและพีเอชที่ลดลงจะไม่ลดลงจากเดิมเมื่อเวลาผ่านไป

ความสามารถในการผนึกขอบของเรโทรเอ็มทีเอ มีผลการศึกษาที่แตกต่างกันโดย Sinkar และคณะ(36) ประเมินความสามารถในการผนึกขอบของวัสดุที่นำมาซ่อมแซมบริเวณง่ามรากฟัน ด้วยวัสดุแตกต่างกันคือ โปรรูทเอ็มทีเอ เรโทรเอ็มทีเอ และไบโอเดนทิน ทำการทดสอบการรั่วซึมด้วยสีย้อมพบว่าเรโทรเอ็มทีเอ จะให้การรั่วซึมของสีย้อมมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ของ Ghorbanzadeh และคณะ(37) ศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกันออกไปด้วยการประเมินความแนบสนิทขอบ (marginal adaptation) ของวัสดุ โปรรูทเอ็มทีเอ ออโธเอ็มทีเอ(OrthoMTA) และเรโทรเอ็มทีเอ ซึ่งใช้เป็นวัสดุอุดย้อมปลายรากฟัน ภายหลังจากนำไปแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลิน เป็นระยะเวลา 1 อาทิตย์ ถึง 2 เดือน นำวัสดุมาประเมินช่องว่างระหว่างวัสดุกับเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่า ความแนบสนิทขอบของวัสดุทั้งสามชนิดไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นเรโทรเอ็มทีเอ เป็นวัสดุที่ให้ความแนบสนิทขอบได้เมื่อใช้เป็นวัสดุอุดย้อมปลายรากฟัน

เรโทรเอ็มทีเอยังมีคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุคือความไม่เป็นพิษกับเซลล์และความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ Chang และคณะ(33) ศึกษาวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตที่แตกต่างกัน 4 ชนิดในแง่ของการตอบสนองของเซลล์ การตอบสนองต่อการอักเสบและการสร้างหลอดเลือดใหม่ พบว่าเรโทรเอ็มทีเอ มีความสามารถดังกล่าวแต่ไม่โดดเด่นเท่ากับ โปรรูทเอ็มทีเอนอกจากนี้มีการศึกษาของ Lee

และคณะ(31) เปรียบเทียบการตอบสนองของเนื้อเยื่อในฟันของวัสดุ 3 ชนิดคือ เรโพรเอ็มทีเอ เรโพรเอ็มทีเอและเทอร์าคอล(theracal) ทำการศึกษาในฟันของสุนัขที่ได้รับการตัดเนื้อเยื่อในที่มีชีวิตบางส่วน พบว่าเรโพรเอ็มทีเอ ให้การตอบสนองที่ดีต่อเนื้อเยื่อในฟันสุนัขโดยมีคงความมีชีวิตของเซลล์สร้างเนื้อฟัน (odontoblast) และตอบสนองต่อการอักเสบน้อย การศึกษานี้สอดคล้องกับ Souza และคณะ(35) พบว่าเรโพรเอ็มทีเอมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อไม่ต่างจากโปรรูทเอ็มทีเอ โดยสรุปจากรายงานที่กล่าวมาวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิด เรโพรเอ็มทีเอ มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับวัสดุอุดย่นปลายรากฟันในอุดมคติอันได้แก่มีความแนบสนิทขอบที่ดี เข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี ตอบสนองต่อการอักเสบน้อย ไม่มีความเป็นพิษและมีความที่บร้งสีที่ดี แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติอื่น ๆ เช่นความเป็นชีวกัมมันต์คงต้องมีการศึกษาต่อไปรวมถึงในแง่ผลสำเร็จในการรักษาที่ใช้วัสดุเรโพรเอ็มทีเอ

#### 4. ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

การใช้งานทางคลินิกของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่มีการผสมอัตราส่วนน้ำต่อผงด้วยมือเช่น โปรรูทเอ็มทีเอ อาจพบว่าผู้ใช้งานผสมอัตราส่วนน้ำต่อผงได้หลากหลายอัตราส่วนในบางครั้งไม่แม่นยำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตดังเช่นวัสดุในทางทันตกรรมชนิดอื่นที่มีการผสมด้วยมือทั่วไปดังนั้นคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุย่อมจะเปลี่ยนแปลงไป(39) นอกจากนี้วัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์บางชนิดจะต้องหยดส่วนน้ำจากปิเปตชนิดพลาสติกที่บรรจุส่วนน้ำสำเร็จรูปมาแล้วเช่น เรโพรเอ็มทีเอ ทำให้ส่วนน้ำที่หยดลงไปมีได้หลากหลายปริมาตรในการหยดไม่ตรงตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเนื่องจากแรงที่ใช้ในการหยดมากเกินไปและในขณะที่หยดอาจจะมีฟองอากาศ(38)

การศึกษาแรกที่สนใจการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงส่งผลต่อคุณสมบัติของเอ็มทีเอคือFridland และ Rosado(43) ศึกษาในแง่ของความสามารถในการละลายตัวและความเป็นรูพรุนของวัสดุ โปรรูทเอ็มทีเอ โดยแบ่งอัตราส่วนน้ำต่อผงออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ 0.26, 0.28, 0.30 และ 0.33 โดยน้ำหนักซึ่งอัตราส่วนเหล่านี้ได้จากการศึกษานำร่อง อัตราส่วนเท่ากับ 0.33 เป็นอัตราส่วนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตซึ่งถ้ามากกว่านี้ส่วนผสมจะเหลวเกินไปและไม่สามารถนำมาใช้ศึกษาได้ อัตราส่วนเท่ากับ 0.26 เป็นอัตราส่วนต่ำสุดที่จะทำให้ส่วนผสมมีความข้นหนืดแบบนั้นได้สามารถนำมาใช้งานได้ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณน้ำยิ่งมากความสามารถในการละลายตัวและความเป็นรูพรุนจะสูงมากขึ้นโดยสอดคล้องกับ Cavenago และคณะ(44) พบว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณน้ำมากความสามารถในการละลายตัวเชิงปริมาตรจะยิ่งมาก เพิ่มการปลดปล่อยของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และมีค่า pH สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหาก



อัตราส่วนที่มีปริมาณน้ำน้อยลงจะทำให้ระยะเวลาก่อตัวของวัสดุนานมากขึ้นและความที่บรัสส์จะมีมากขึ้น

มีการศึกษาในแง่อื่น ๆ ตามมาซึ่งใช้อัตราส่วนเช่นเดียวกับ Fridland และ Rosado แต่มีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุและคุณสมบัติการสนใจศึกษาโดย Hawley และคณะ(42) ศึกษาการขยายตัวขณะก่อตัวของวัสดุเอ็มทีเอสทีเททา และเอ็มทีเอสทีชาว พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงไม่มีผลต่อการขยายตัวขณะก่อตัวของวัสดุมีเพียงแค่ชนิดของวัสดุเท่านั้นที่ส่งผลโดย เอ็มทีเอสทีเททา จะมีการขยายตัวขณะก่อตัวมากกว่าเอ็มทีเอสทีชาว

ความสามารถในการผนึกของของวัสดุเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง Oraie และคณะ(41) ทำการทดสอบการรั่วซึมของสีย้อมในการอุดชั้นปลายรากฟันพบว่าไม่ว่าอัตราส่วนจะมีปริมาณน้ำมากขึ้นหรือลดลงสามารถทำให้เกิดการรั่วซึมได้ โดยอีกปัจจัยที่จะช่วยลดการรั่วซึมคือเทคนิคการนำวัสดุเข้าสู่โพรงปลายรากฟัน หากอัตราส่วนมีปริมาณน้ำน้อยการใช้สำลีขึ้นในการกดอัดวัสดุจะช่วยลดการรั่วซึมได้ แต่หากอัตราส่วนมีปริมาณน้ำมากขึ้นการใช้เครื่องมือเอ็นโดดอนติกพลักเกอร์จะช่วยลดการรั่วซึมได้

ในส่วนการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อผง Basturk และคณะ(45) ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงทางแรงกด (compressive strength) ของวัสดุโปรรูท เอ็มทีเอ และ เอ็มทีเอแองเจิลส์ พบว่าเมื่อทำการทดสอบภายหลังจากการผสมวัสดุผ่านไป 4 วัน หากอัตราส่วนมีปริมาณน้ำมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงทางแรงกดของวัสดุจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นด้วยเช่นชนิดของวัสดุโดย โปรรูทเอ็มทีเอจะให้ค่าความแข็งแรงทางแรงกดสูงกว่าเอ็มทีเอแองเจิลส์อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงวิธีการผสมซึ่งหากมีการผสมวัสดุด้วยเครื่องปั่นแคปซูลจะให้ค่าความแข็งแรงทางแรงกดมากกว่าการผสมด้วยมือและการสั้นด้วยอัลตราโซนิคส์จะทำให้ได้ค่าดีขึ้น อีกการศึกษาคือ Turker และ Uzunoglu ทดสอบความแข็งแรงพันธะกดออก (push-out bond strength) ของ เอ็มทีเอแองเจิลส์พบว่าระยะเวลาการทดสอบที่วันที่ 4 และ 7 เมื่ออัตราส่วนมีปริมาณส่วนผงลดลงจะทำให้ค่าความแข็งแรงพันธะกดออกลดลง แต่เมื่อผ่านระยะเวลา 28 วันจะพบว่ามีค่าสูงขึ้นแต่ยังคงน้อยกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณส่วนผงมากกว่า(40)

โดยสรุปคืออัตราส่วนน้ำต่อผงของวัสดุส่วนใหญ่ที่นำมาศึกษาจะเป็นเอ็มทีเอ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดังกล่าวย่อมจะทำให้สมบัติทางเคมี ทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเปลี่ยนไปทั้งนี้อาจจะมีปัจจัยอื่นของวัสดุร่วมด้วยเช่น ลักษณะการใช้งานทางคลินิกที่ต้องการความชื้นหรือเหลวแตกต่างกัน

## 5. ความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์ของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

สารที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมและซิลิเกตที่สามารถสร้างผลึกอะพาไทต์และเหนียวนำไปให้มีการเกิดเนื้อเยื่อแข็งจึงมีความเป็นชีวกัมมันต์ (Bioactivity) คือมีความสามารถที่จะสร้างชั้นของผลึกอะพาไทต์ (apatite) เมื่อสัมผัสกับของเหลวที่จำลองสารภายในร่างกาย(23-26) ซึ่งเป็นคุณลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งของวัสดุอุดยึดอณูปลายรากฟัน วัสดุชีวภาพที่มีสารแคลเซียมซิลิเกตเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเช่น เอ็มทีเอสซีขาว, เอ็นโดซีเอ็มเอ็มทีเอ จะมีความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์(80)

กลไกในการเกิดชีวกัมมันต์ขั้นต้นแรกจะเป็นกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อส่วนผงที่เป็นอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ต่อมาการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดภายหลังกระบวนการไฮเดรชันของอนุภาคแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับการแลกเปลี่ยนอย่างรวดเร็วระหว่างแคลเซียมไอออนกับ  $H^+$  ซึ่งเป็นไอออนที่มาจากส่วนน้ำเพื่อที่จะก่อตัวเป็น solid-liquid interface ปฏิกิริยาของแคลเซียมไอออนกับไฮดรอกซิลไอออนที่มาจากส่วนน้ำจะกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ portlandite ซึ่งจะสร้างสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นให้มีความเป็นเบส แม้ว่าปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์แต่การปลดปล่อยแคลเซียมไอออนและ  $SiO_3^{2-}$  อย่างต่อเนื่องภายหลังจากการก่อตัวขั้นแรกร่วมกับการปลดปล่อยปริมาณน้อย ๆ ของอะลูมิเนียมไอออน เหล็กไอออน และซัลเฟตไอออน  $SO_4^{2-}$  โดยขึ้นกับชนิดของวัสดุจะก่อให้เกิดการสร้างเฟสของแร่ธาตุอนินทรีย์ ต่อมาจะเป็นขั้นตอนสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต การแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation) เพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลาย พื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมซิลิเกตจะถูกกระทบโดยไฮดรอกซิลไอออนจากสารละลายซึ่งก่อให้เกิดการไฮโดรไลซิสของกลุ่ม  $SiO_4^{4-}$  ในสิ่งแวดล้อมที่มีความเป็นเบสบริเวณนั้น ผลคือเกิดการสร้างเฟสของแคลเซียมซิลิเกตที่มีรูปแบบไม่แน่นอน (amorphous calcium silicate hydrate phase) นี้อยู่บนอนุภาคของวัสดุ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีรูพรุนเป็นชั้นเจลซิลิเกตอุ้มน้ำที่บรรจุกลุ่มซิลินอล (silinol; Si-OH) ซึ่งสร้างเฟสหลักสำหรับการยึดติดในเมทริกซ์ของซีเมนต์ที่ก่อตัวสมบูรณ์แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะมีการยึดติดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตกับแคลเซียมไอออน การเสียโปรตอนของกลุ่มซิลินอลในเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นเบสจะทำให้พื้นผิวของหมู่ฟังก์ชัน  $=SiO^-$  กลายเป็นประจุลบ

ประจุลบที่อยู่บนพื้นผิวดังกล่าวนี้จะดึงดูดความเป็นแคตไอออน (cation) ซึ่งปลดปล่อยออกมาในสารละลายเช่น แคลเซียมไอออน ผ่านทางปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic reaction) เพื่อที่จะลดพลังงานรวมของระบบซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแคตไอออนบนซีเมนต์ที่ก่อตัว

สมบูรณ์แล้วบริเวณนี้ซึ่งประกอบด้วยพื้นผิวที่มีประจุโดยมีจำนวนประจุเท่ากับในสารละลายแต่ในสารละลายจะมีประจุตรงข้ามกับที่พื้นผิว แสดงถึงชั้นของประจุที่เป็นสองชั้น ชั้นตอนต่อมาเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมฟอสเฟตรูปร่างไม่แน่นอนหรือเรียกว่า เอซีพี (Amorphous calcium phosphate; ACP) เมื่อแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่ก่อตัวสมบูรณ์แล้วได้รับการแช่ลงในสารละลายซึ่งมีองค์ประกอบของฟอสเฟตที่เป็น  $\text{HPO}_4^{2-}$  ที่ถูกไฮโดรไลซิสแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่าง  $\text{HPO}_4^{2-}$  กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซีเมนต์ที่ก่อตัวสมบูรณ์แล้วจะปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อย่างต่อเนื่องเข้ามาในสารละลายที่มีฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ทำให้ไฮดรอกไซด์ทั้งสองชนิดมีความอิ่มตัวสูงในสารละลายซึ่งจะเปลี่ยนเป็นการสร้างสารตั้งต้นของเอซีพีในสารละลายลักษณะเป็นกลุ่มเล็ก ๆ และจะเสถียรอยู่ในสารละลายนั้น กลุ่มเล็กดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางเพื่อให้เกิดการเกาะกลุ่มหนาแน่นขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะอยู่ใกล้กับพื้นผิวของวัสดุที่ก่อตัวแล้วสร้างเป็นเฟสที่อุดมไปด้วยแคลเซียมและฟอสฟอรัสกลุ่มเล็ก ๆ ที่หนาแน่นขึ้นจะเชื่อมต่อกันเกิดเป็น globular เอซีพี อยู่บนพื้นผิวของซีเมนต์ซึ่งจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปคือ  $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6\text{X}(\text{HPO}_4)_x(\text{OH})_x$  ในขั้นตอนที่สุดท้ายจะเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) หรือจุดศูนย์กลางของผลึกเพื่อเริ่มต้นกระบวนการการตกผลึก (crystallization) และการเปลี่ยนจากเอซีพีไปเป็น คาร์บอเนตอะพาไทต์ (carbonated apatite)(81)

มีหลายการศึกษาที่ผ่านมาศึกษาความเป็นชีวกัมมันต์ของเอ็มทีเอ Sarkar และคณะ(23) นำเอ็มทีเอ อุดภายในคลองรากฟันและนำไปแช่ลงในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน เป็นระยะเวลา 2 เดือน จากนั้นนำฟันมาตัดแบ่งเพื่อศึกษารอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าระหว่างรอยต่อดังกล่าวนั้นมีชั้นของสารประกอบที่ไม่ใช่เอ็มทีเอ และไม่ใช่เนื้อฟัน โดยมีลักษณะเป็นชั้นสีขาวเกิดขึ้น นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) พบว่าสารประกอบในชั้นสีขาวนั้นประกอบด้วยธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัสและออกซิเจนมีความคล้ายกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) การศึกษานี้ยังระบุว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์นี้สามารถปลดปล่อยแคลเซียมและฟอสฟอรัสออกมาได้อย่างต่อเนื่องซึ่งกระบวนการนี้มีความสำคัญต่อเมแทบอลิซึมของกระดูก นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความสามารถในการผนึกขอบระหว่างวัสดุเอ็มทีเอกับเนื้อฟันได้ การศึกษาของ Bozeman และคณะ(26) ยืนยันการค้นพบของ Sarkar โดยใช้วัสดุ เอ็มทีเอ ทั้งชนิด เอ็มทีเอสีเทาและเอ็มทีเอสีขาว พบว่าผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์เกิดขึ้นได้จริง โดยบนวัสดุชนิด เอ็มทีเอสีเทา มีผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์เกิดขึ้นมากกว่าบนวัสดุชนิดเอ็มทีเอสีขาว ในขณะที่ปริมาณธาตุแคลเซียมจะพบใน



เอ็มทีเอสซีขาว มากกว่าเอ็มทีเอสซีเทา และในเอ็มทีเอสซีเทา จะพบซิลิกาและฟอสฟอรัสได้น้อยกว่า นอกจากนี้ชั้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เกิดบนผิวของวัสดุจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างช่วยประสานระหว่างวัสดุและเนื้อฟันด้วยพันธะเคมีถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ Reyes-Carmona และคณะ(24) ทำการศึกษาเช่นเดียวกันโดยใช้ โปรรูทเอ็มทีเอ อุดในรากฟันที่ถูกแบ่งตามแนวยาว เมื่อนำตัวอย่างแช่ลงในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ซาลิน เป็นระยะเวลา 2 เดือนพบว่าเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะพบชั้นอินเตอร์เฟซ (interface layer) อยู่ระหว่างเนื้อฟันและวัสดุ โดยจะมีโครงสร้างคล้ายแท็ก (tag like structure) นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย เครื่องเอกซเรย์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน พบว่าใน ชั้นอินเตอร์เฟซ และเนื้อฟันมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกันซึ่งจะประกอบด้วยธาตุ แคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นหลัก แต่องค์ประกอบในชั้นอินเตอร์เฟซ จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากวัสดุซีเมนต์ การศึกษานี้ระบุว่าอะพาไทต์ที่เกิดเป็นคาร์บอนอะพาไทต์ซึ่งสามารถสร้างชั้นระหว่างรอยต่อของเนื้อฟันและวัสดุ มีโครงสร้างคล้ายแท็ก เข้าไปบริเวณรอยต่อนั้น

นอกจากนี้มีการศึกษาวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดอื่นเช่น ไบโอเดนทิน โดยการศึกษาของ Kim และคณะ(82) เปรียบเทียบความเป็นชีวกัมมันต์ระหว่างวัสดุ ไบโอเดนทินกับ โปรรูทเอ็มทีเอ ที่นำไปอุดในคลองรากฟันจากนั้นแช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย ระยะเวลา 4 สัปดาห์นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดร่วมกับ เครื่องเอกซเรย์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน พบว่าไบโอเดนทิน จะทำให้เกิดชั้นผลึกที่หนาน้อยกว่าใน โปรรูทเอ็มทีเอแต่เมื่อนำปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส พบว่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของทั้งสองวัสดุไม่มีความแตกต่างกัน

โดยสรุปวัสดุชนิดแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีความเป็นชีวกัมมันต์โดยที่สามารถสร้างผลึกอะพาไทต์ที่ปริมาณธาตุส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมและฟอสฟอรัสโดยผลึกที่เกิดขึ้นเป็นชั้นดังกล่าวจะช่วยเติมเต็มรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและวัสดุอุดในคลองรากฟันกระบวนการเชิงแร่ธาตุทางชีวภาพเช่นนี้จะช่วยความสามารถในการผนึกขอบของวัสดุ โดยการทดสอบความเป็นชีวกัมมันต์ของวัสดุจะทำโดยการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีด้วยเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM) เครื่องเอกซเรย์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน โดยเมื่อวิเคราะห์แล้วมีองค์ประกอบของวัสดุจะมีชนิดและปริมาณธาตุเช่นเดียวกับ ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ใช้พริกขี้หนูแห้งจำนวน 300 ซึ่งโดยกำหนดเกณฑ์ในการคัดเลือกได้แก่เป็นพริกขี้หนูแห้งที่ปราศจากโรคและไม่มีรอยร้าวบริเวณผิวพริกขี้หนูแห้ง พริกขี้หนูแห้งที่ได้รับการถนอมจะนำมาแช่ลงในสารละลายไทมอล (Thymol) เข้มข้นร้อยละ 0.1 เพื่อเป็นการทำลายเชื้อจนกว่าจะเริ่มการทดลอง พริกขี้หนูแห้งที่ถนอมเป็นพริกขี้หนูแห้งที่ได้รับการพิจารณาแล้วว่าเป็นไปตามข้อบ่งชี้ในการรักษา และพริกขี้หนูแห้งที่นำมาใช้วิจัยไม่ได้เป็นพริกขี้หนูแห้งที่แตกต่างจากพริกขี้หนูแห้งอื่นทั่วไป เมื่อพริกขี้หนูแห้งออกมาแล้วจะเก็บอยู่ในภาชนะบรรจุพริกขี้หนูแห้งที่สะอาด โดยไม่สามารถระบุตัวบุคคลได้ว่าเป็นใครซึ่งได้ผ่านคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมแล้ว

#### การเตรียมตัวอย่าง

เริ่มจากการขยายและอุดคลองรากพริก ขุดดินบริเวณคอพริกที่บริเวณรอยต่อเคลือบพริก และเคลือบพริกด้วยหัวกรรบอกความเร็วยุติด้วยน้ำ นำไฟล์ขนาดเบอร์ 10 ให้ผ่านรูเปิดปลายรากพริกเพื่อกำหนดความยาวการทำงานจริงของปลายราก 1 มิลลิเมตรจากความยาวรากพริก ทำการยืนยันความยาวการทำงานจริงอีกครั้งด้วยภาพรังสี เตรียมคลองรากพริกโดยเทคนิคการขยายคลองรากพริกแบบคราวน์ดาวน์ (crown-down technique) ด้วยไฟล์ชนิดนิกเกิลไทเทเนียม ระบบ ProtaperNEXT ในระหว่างการขยายคลองรากพริกด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 2.5 ทำการขยายจนถึงขนาดไฟล์ X3 เป็นขนาดเครื่องมือตัวสุดท้าย ก่อนอุดคลองรากพริกด้วยน้ำยาอุดคลองรากพริกครั้งสุดท้ายได้แก่ สารละลายกรดเอทิลไดเอมีนเตตระอะซิติก (Ethylenediaminetetraacetic acid) ความเข้มข้นร้อยละ 17 ตามด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 2.5 หลังจากนั้นคลองรากพริกทั้งหมดจะได้รับการอุดด้วยกัตตาเปอร์ซาร์ร่วมกับการใช้ซีลเลอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (zinc oxide eugenol) อุดคลองรากพริกโดยใช้เทคนิค วัลติคัลคอมแตคชั่น (warm vertical condensation) และยืนยันคุณภาพการอุดด้วยภาพรังสี โดยจะต้องไม่มีช่องว่าง วัสดุอุดได้แน่นเต็มสม่ำเสมอและสั้นจากปลายรากในภาพรังสีไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

เตรียมโพรงปลายรากพริกโดยการตัดส่วนปลายรากพริกที่ความยาว 3 มิลลิเมตรจากปลายราก และเตรียมโพรงปลายรากพริกให้มีความลึก 3 มิลลิเมตรด้วยหัวอัลตราโซนิคส์ ตรวจสอบความลึกด้วยเครื่องมือตรวจร่องลึกปริทันต์เพื่อยืนยันความลึกสำหรับใส่วัสดุอุดก่อนอุดปลายรากพริก

ด้วยวัสดุสองชนิดจะต้องทำเครื่องหมาย 4 ตำแหน่งดังที่ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 1 ด้วยมีดเบอร์ 12 เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงไว้สำหรับการประเมินค่าเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างวัสดุกับเนื้อพื้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

### การเตรียมวัสดุอุดย่นปลายรากฟันและการแบ่งกลุ่มการศึกษา

แบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็นสองกลุ่มด้วยวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตที่ต่างกันสองชนิด ออกเป็น 6 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 50 ตัวอย่างต่อไปนี้

กลุ่มที่1: อุดย่นปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อผงเป็น 0.28 โดยมวล (อัตราส่วนที่มีความชื้น)

กลุ่มที่2: อุดย่นปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อผงเป็น 0.33 โดยมวล (อัตราส่วนปกติ)

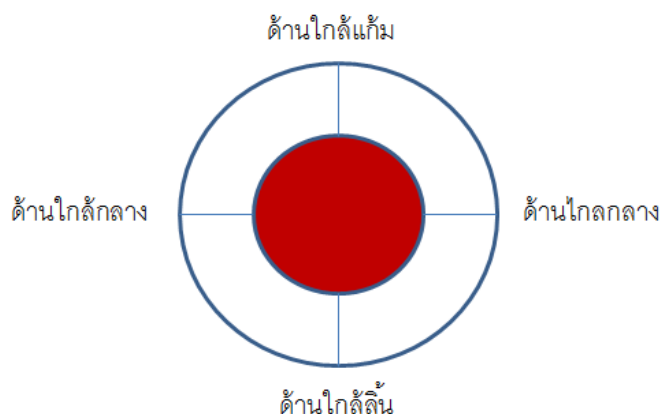
กลุ่มที่3: อุดย่นปลายรากฟันด้วยโปรรูทเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อผงเป็น 0.40 โดยมวล (อัตราส่วนที่มีความเหลว)

กลุ่มที่4: อุดย่นปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนผงเท่ากับ 0.3 กรัมต่อส่วนน้ำจำนวน 2 หยด (อัตราส่วนที่มีความชื้น)

กลุ่มที่5: อุดย่นปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนผงเท่ากับ 0.3 กรัมต่อส่วนน้ำจำนวน 3 หยด (อัตราส่วนปกติ)

กลุ่มที่6: อุดย่นปลายรากฟันด้วยเรโทรเอ็มทีเอที่ใช้อัตราส่วนผงเท่ากับ 0.3 กรัมต่อส่วนน้ำจำนวน 4 หยด (อัตราส่วนที่มีความเหลว)

การเตรียมในแต่ละอัตราส่วนเตรียมโดยผู้ปฏิบัติคนเดียวกันคนเดียวกันซึ่งบนตราระบบดิจิทัลซึ่งทศนิยมสี่ตำแหน่งผสมอัตราส่วนน้ำต่อผงบนแท่งแก้ว ตามกลุ่มที่ได้แบ่งไว้ นำใส่โพรงปลายรากฟันที่เตรียมไว้จนเต็มกดอัดด้วยปลั๊กเกอร์โดยก่อนเตรียมตัวอย่างต้องมีการจับฉลากโดยการสุ่มว่าจะทำกลุ่มการทดลองใด คุณภาพของการอุดย่นปลายรากตรวจสอบด้วยภาพรังสีโดยจะต้องแน่นเต็มไม่มีช่องว่าง หากคุณภาพไม่ตรงตามที่ระบุไว้ข้างต้นให้คัดออกแล้วทำใหม่จนครบจำนวนในแต่ละกลุ่ม



ภาพประกอบ 2 การกำหนดตำแหน่งอ้างอิง 4 จุดเพื่อใช้ในการประเมินค่าเฉลี่ยช่องว่าง  
ภาคตัดขวางของรากฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60

#### การเตรียมสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated body fluid, SBF)

สารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนใกล้เคียงกับพลาสมาของเลือดในร่างกายมนุษย์ สารละลายนี้แนะนำโดย Kokubo และคณะ(83) เพื่อที่จะนำมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของวัสดุที่มีความเป็นชีวกัมมันต์ สารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกายสามารถเตรียมได้โดยเริ่มใส่สารเคมีทีละตัวตามลำดับที่แสดงไว้ในตาราง 1 ลงในน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาตร 700 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชจนได้ 7.4 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เติมน้ำที่ปราศจากไอออนจนกระทั่งมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

ตาราง 1 ลำดับการเตรียมสารละลาย SBF โดยใส่สารทีละตัวตามลำดับจาก 1-10 (83)

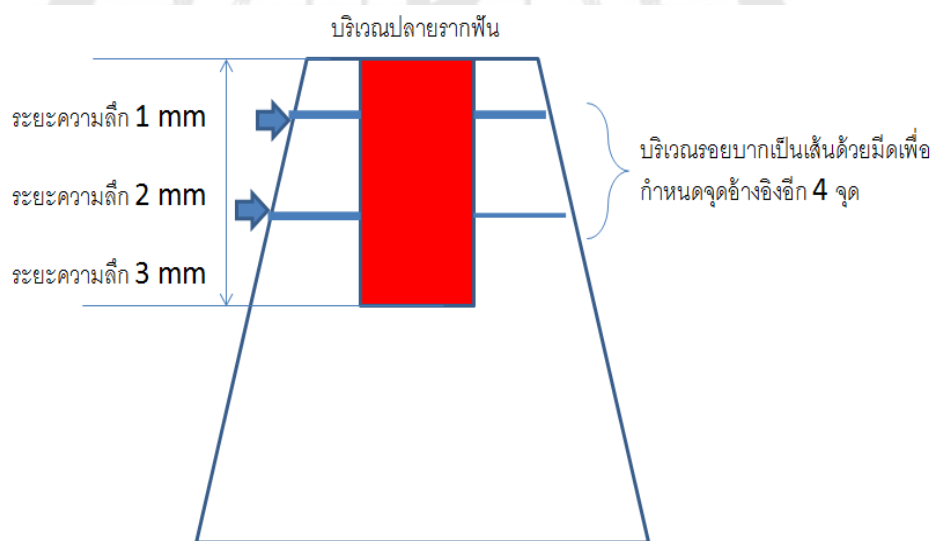
ลำดับ	สารละลาย	ปริมาณ
1	NaCl	7.996 กรัม
2	NaHCO <sub>3</sub>	0.350 กรัม
3	KCl	0.224 กรัม
4	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ▪ 3H <sub>2</sub> O	0.174 กรัม
5	MgCl <sub>2</sub> ▪ 6H <sub>2</sub> O	0.306 กรัม
6	HCl 1 โมลาร์	40 มิลลิลิตร
7	CaCl <sub>2</sub>	0.278 กรัม
8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.072 กรัม
9	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> CNH <sub>2</sub>	6.058 กรัม
10	HCl 1 โมลาร์	ตามเหมาะสมเพื่อปรับ pH=7.4

### การประเมินความแนบสนิของวัสดุอุดย่นปลายรากฟันทั้งสองชนิด

หลังจากเตรียมการอุดย่นปลายรากฟันในตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 300 ชิ้นเรียบร้อยแล้ว รอ 3 ชั่วโมงจากนั้นนำไปแช่ลงในสารละลาย SBF ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ทำการสุ่มตัวอย่างออกมากลุ่มละ 10 ชิ้นรวมทั้งสิ้น 60 ชิ้น เพื่อวัดความแนบสนิของวัสดุ กับผนังคลองรากฟันในแนวตามขวาง เตรียมชิ้นงานเพื่อเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) โดยนำตัวอย่างมายึดบนแท่นอะลูมิเนียม (Aluminum stab) เคลือบทองที่ผิวหน้าตัวอย่างด้วยเครื่องเคลือบทอง (Sputter coater) โดยทำให้เกิดการขาดน้ำของตัวอย่าง (dehydration) เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วส่งดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-6510LV) จะวัดระยะช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟันในหน่วยไมโครเมตรที่ตำแหน่งจุดอ้างอิง 4 จุดซึ่งได้บอกเอาไว้ด้วยมีดเบอร์ 12

ก่อนหน้านี้นี้ได้ภาพประกอบ 3 ระยะช่องว่างที่วัดได้จะนำมารวมและคำนวณออกมาเป็นค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่างของแต่ละตัวอย่างและบันทึกภาพลงในคอมพิวเตอร์ และทำวิธีการเดียวกันนี้ทุกวันที่ 2, 7, 30 และ 60

การประเมินความแนบสนิทของขอบตามแนวยาวกับแกนฟัน ณ วันที่ 60 ชั้นแรกจะทำการส้อมตัวอย่างออกมาด้วยกลุ่มการทดลองละ 10 ชิ้นรวมทั้งสิ้น 60 ชิ้นโดยกลุ่มที่ได้รับการส้อมออกมา จะทำการตัดแบ่งฟันตามแนว mesio-distal ออกเป็นสองส่วนด้วย diamond disc ครึ่งส่วนแรกจะนำไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของช่องว่าง ในขณะที่อีกครึ่งส่วนที่สองจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของผลึกที่เกิดขึ้นโดยจะกล่าวรายละเอียดในขั้นตอนต่อไป ตัวอย่างครึ่งส่วนแรกจะทำการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงอีกครั้ง 2 จุดคือที่ระยะต่ำกว่าปลายราก 1 มิลลิเมตรและ 2 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 2 จากนั้นนำตัวอย่างไปเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดวัดระยะช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟันที่ตำแหน่งจุดอ้างอิง 4 จุดดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 3 กำหนดตำแหน่งอ้างอิง 4 จุดภายหลังจากแบ่งครึ่งรากตามแนวยาวของรากฟัน ณ วันที่ 60 เพื่อใช้ในการประเมินค่าเฉลี่ยช่องว่างในครึ่งส่วนแรก

### การประเมินความสามารถในการสร้างผลึกอะพาไทต์

ณ วันที่ 60 ขึ้นตัวอย่างในแนวตั้งขวางจำนวน 60 ขึ้น นอกจากนำไปประเมินระยะช่องว่างดังที่กล่าวมาแล้ว ในวันนี้้นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดอะพาไทต์โดยนำตัวอย่างไปทำให้เกิดการขาดน้ำจากนั้นนำตัวอย่างยัดบนแท่นอะลูมิเนียม เคลือบทองที่ผิวหน้าตัวอย่างด้วยเครื่องเคลือบทอง จากนั้นวิเคราะห์บริเวณที่เกิดผลึกระหว่างเนื้อฟันกับวัสดุอุดที่ยอนปลายรากด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อสำรวจตำแหน่ง ลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟันร่วมกับใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุชนิดเอกซเรย์สเปคโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน เพื่อวิเคราะห์ทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งดังกล่าว ส่วนตัวอย่างที่ได้รับการตัดแบ่งไปแล้วก่อนหน้านี้นำอีกครั้งหนึ่งจำนวน 60 ขึ้นมาวิเคราะห์เช่นเดียวกัน

### การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตัวอย่างที่ถูกตัดตามขวางที่ได้รับการวัดค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่าง ชั้นแรกจะทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลโดยใช้สถิติชนิดโคโมโกรอฟ-สเมอร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) ต่อมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่างของวัสดุทั้งสองชนิดในแต่ละอัตราส่วนแตกต่างกัน 3 กลุ่ม ณ วันที่ 2, 7, 30 และ 60 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยวิธีทางสถิติการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (2-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ภายหลังจากการทดสอบด้วย ANOVA แล้วพบว่าพบค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันจะทำการทดสอบรายคู่ของกลุ่มการทดลองด้วยวิธีของทูกี้ (Tukey's Honestly Significance Difference) ส่วนตัวอย่างที่ถูกตัดตามขวางในครั้งแรกมีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกันยกเว้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะช่องว่างของวัสดุทั้งสองชนิดที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน 3 กลุ่ม โดยทดสอบด้วยวิธีทางสถิติการทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (1-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05



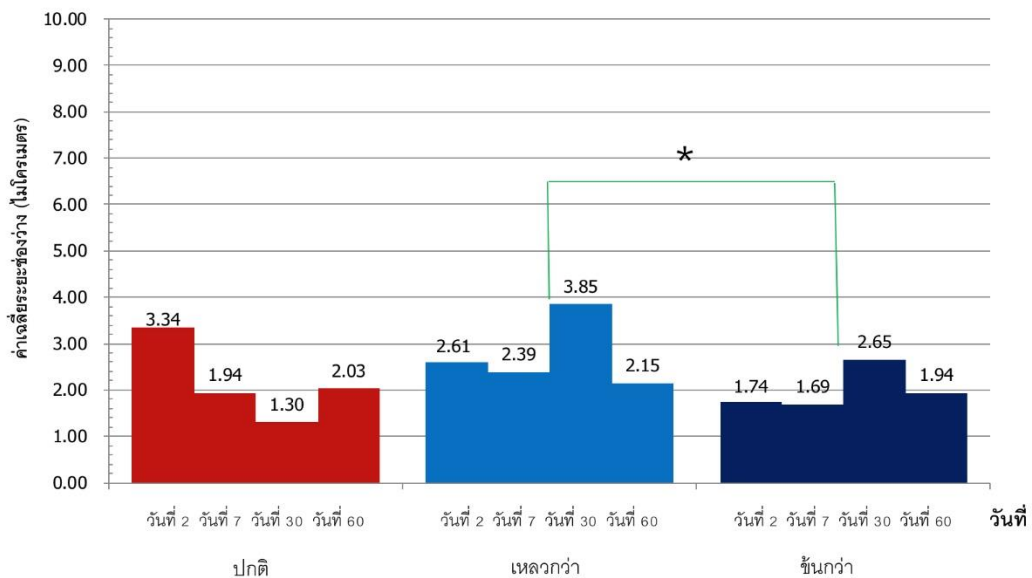
## บทที่ 4 ผลการศึกษา

การศึกษาที่ 1 ความเหมาะสมของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผง

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอตามแนวขวางของรากฟัน

ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนภายหลังการแช่ในสารละลายดังแสดงในตาราง 2 เมื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อความเหมาะสมของวัสดุโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของกลุ่มทดลองคือ อัตราส่วนน้ำต่อผงโดยพบว่ามีค่าแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของกลุ่มตัวอย่างระหว่างวันที่ 2, 7, 30 และ 60 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติดังภาพประกอบ 4 และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเป็นรายคู่ (Post Hoc test) ด้วยการทดสอบแบบทูกี้ (Tukey's Honestly Significance Difference test) กลุ่มทดลองที่เป็นอัตราส่วนเหลวจะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนข้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60



ภาพประกอบ 4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดโปรรูทเอ็มทีเอสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาต่างกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง (\*และ\*\*คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ)



ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60 ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวางของรากฟัน

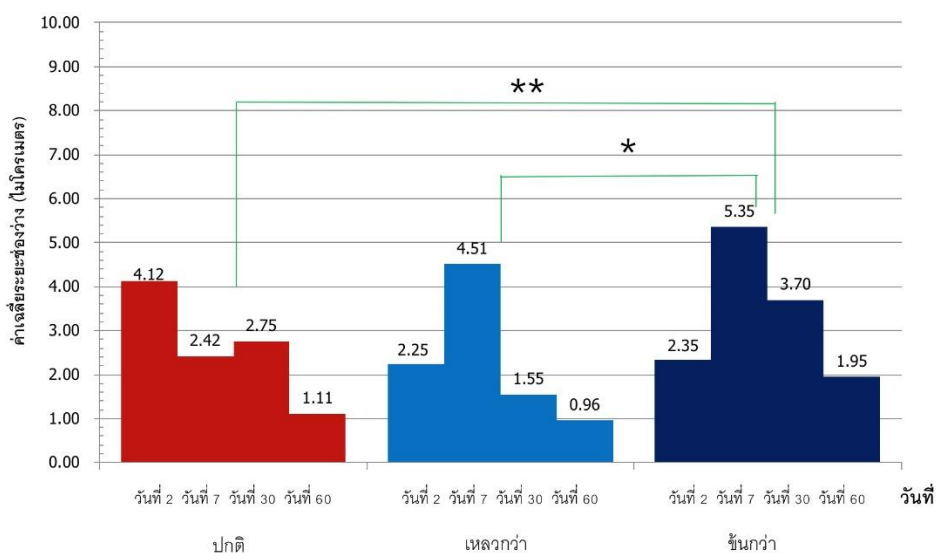
วันที่	อัตราส่วนน้ำต่อผง	ค่าเฉลี่ยระยะ	ค่าเฉลี่ยระยะ	ค่าเฉลี่ยระยะ
		ช่องว่าง ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (ไมโครเมตร)	ช่องว่าง ค่าสูงสุด (ไมโครเมตร)	ช่องว่าง ค่าต่ำสุด (ไมโครเมตร)
2	ปกติ	3.34±0.95	5.35	2.10
	เหลวกว่า	2.61±0.99	3.96	0
	ขึ้นกว่า	1.74±1.94	9.56	0
7	ปกติ	1.94±1.67	6.78	0
	เหลวกว่า	2.39±1.27	5.90	0
	ขึ้นกว่า	1.69±0.54	5.12	1.36
30	ปกติ	1.30±0.52	5.53	0
	เหลวกว่า	3.85±1.01	6.83	2.35
	ขึ้นกว่า	2.65±1.68	5.71	1.35
60	ปกติ	2.03±1.21	3.95	0
	เหลวกว่า	2.15±1.40	3.69	0
	ขึ้นกว่า	1.94±1.13	2.96	0

## การวิเคราะห์ระยะค่าเฉลี่ยช่องว่างของเรโทรเอ็มทีเอเอ็มทีเอตามแนวขวางของรากฟัน

ในกลุ่มเรโทรเอ็มทีเอพบค่าช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังเนื้อฟันทั้งสามอัตราส่วน ภายหลังจากแช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวร่างกายดังแสดงในตาราง 3 เมื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วยสถิติชนิดการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางพบว่า ทั้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงและระยะเวลาที่แช่ในสารละลาย ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยช่องว่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

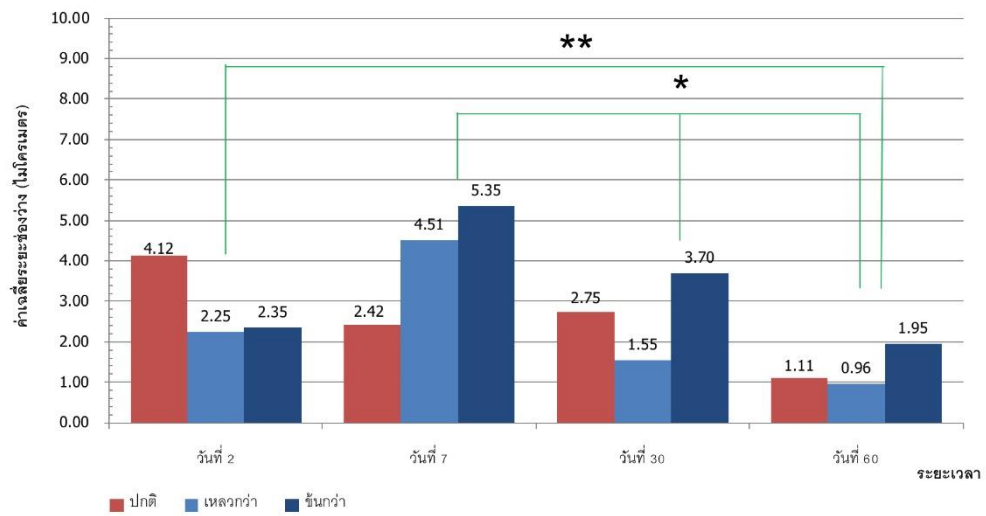
โดยเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเป็นรายคู่ด้วยการทดสอบแบบทูกี้พบ กลุ่มทดลองที่ใช้อัตราส่วนชั้นมีค่าเฉลี่ยช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนปกติและอัตราส่วนเหลว อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังภาพประกอบ 5 นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างในแต่ละช่วงเวลาการแช่ในสารละลายของกลุ่มทดลอง พบว่ากลุ่มทดลองในวันที่ 2 มีค่าเฉลี่ยช่องว่างสูงกว่าในวันที่ 60 อย่างมีนัยสำคัญ กลุ่มทดลองในวันที่ 7 มีค่าเฉลี่ยช่องว่างสูงกว่าในวันที่ 30 และ 60 อย่างมีนัยสำคัญ และกลุ่มทดลองในวันที่ 30 มีค่าเฉลี่ยช่องว่างสูงกว่าในวันที่ 60 อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบ 6

ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของเรโทรเอ็มทีเอสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60



ภาพประกอบ 5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดเรโทรเอ็มทีเอสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาต่างกันกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อแสดงความแตกต่างกันของอัตราส่วนอย่างมีนัยสำคัญ (\*และ\*\*คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ)

ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของเรโทรเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60



ภาพประกอบ 6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองวัสดุชนิดเรโทรเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ต่างกันกับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อความแตกต่างกันของช่วงเวลาการเข้าในสารละลายอย่างมีนัยสำคัญ (\*และ\*\*คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ)

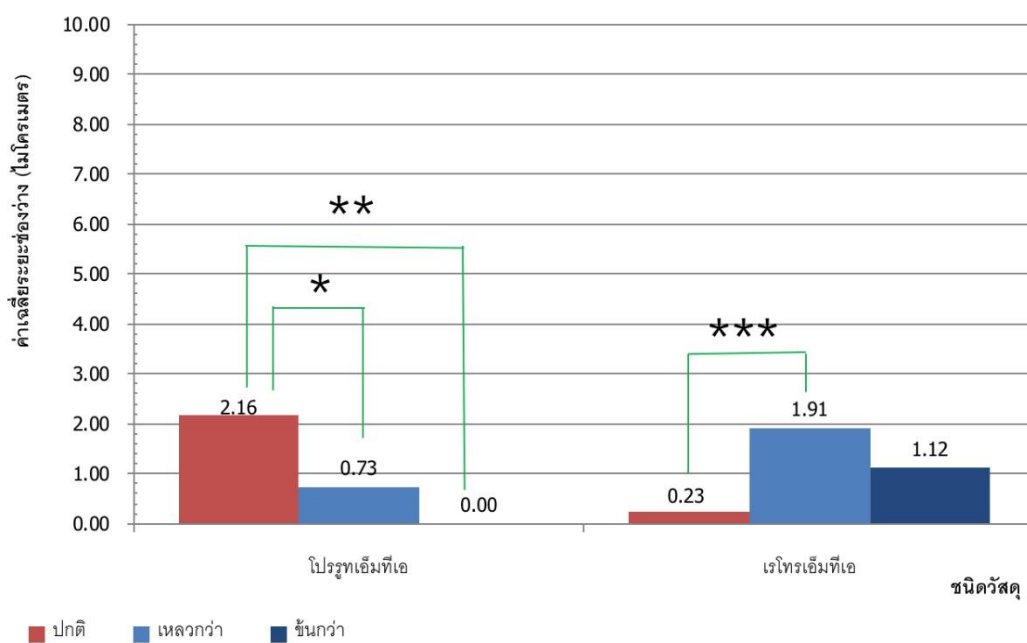
ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของเรโทรเอ็มทีเอสสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 2 ถึง 60  
ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวางของรากฟัน

วันที่	อัตราส่วนน้ำต่อผง	ค่าเฉลี่ยระยะ	ค่าเฉลี่ยระยะ	ค่าเฉลี่ยระยะ
		ช่องว่าง $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (ไมโครเมตร)	ช่องว่าง ค่าสูงสุด (ไมโครเมตร)	ช่องว่าง ค่าต่ำสุด (ไมโครเมตร)
2	ปกติ	4.12 $\pm$ 1.07	5.59	0
	เหลวกว่า	2.25 $\pm$ 1.24	4.91	1.23
	ข้นกว่า	2.35 $\pm$ 1.74	4.80	0
7	ปกติ	2.42 $\pm$ 1.48	6.40	0
	เหลวกว่า	4.51 $\pm$ 1.33	6.68	2.59
	ข้นกว่า	5.35 $\pm$ 1.46	6.50	0
30	ปกติ	2.75 $\pm$ 1.63	5.70	0
	เหลวกว่า	1.55 $\pm$ 0.30	1.97	0
	ข้นกว่า	3.70 $\pm$ 0.65	3.97	1.93
60	ปกติ	1.11 $\pm$ 0.68	3.12	0
	เหลวกว่า	0.96 $\pm$ 1.10	3.25	0
	ข้นกว่า	1.95 $\pm$ 1.38	5.67	0

### การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอตามแนวยาวของรากฟันที่วันที่ 60

เมื่อทำการวัดระยะช่องว่างภายหลังจากการตัดรากฟันในแนวใกล้กลางไกลกลางโดยค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างแสดงดังตาราง 4 จากนั้นวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างเพื่อความแนบสนิทขอพบด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ในกลุ่มวัสดุชนิดโปรรูทเอ็มทีเอพบว่ากลุ่มที่มีอัตราส่วนปกติจะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนขึ้นและอัตราส่วนเหลวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแตกต่างจากการวิเคราะห์ในวัสดุชนิดเรโทรเอ็มทีเอซึ่งพบว่ากลุ่มที่มีอัตราส่วนเหลวจะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังภาพประกอบ 7

ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลาวันที่ 60



ภาพประกอบ 7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มทดลองตามแนวยาวกับรากฟันของวัสดุทั้งสองชนิดในสามอัตราส่วน ณ วันที่ 60 กับค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง (\*, \*\* และ\*\*\* คือสัญลักษณ์แสดงระดับนัยสำคัญทางสถิติ)

ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างของโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอสามอัตราส่วนในวันที่ 60 ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวยาวของรากฟัน

ชนิดของวัสดุอุด	อัตราส่วนน้ำต่อผง	ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (ไมโครเมตร)	ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง ค่าสูงสุด (ไมโครเมตร)	ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่าง ค่าต่ำสุด (ไมโครเมตร)
โปรรูทเอ็มทีเอ	ปกติ	2.16±0.60	2.60	1.35
	เหลวกว่า	0.73±1.34	3.42	0
	ข้นกว่า	0±0.000	0	0
เรโทรเอ็มทีเอ	ปกติ	0.23±0.60	1.59	0
	เหลวกว่า	1.91±0.96	2.60	0
	ข้นกว่า	1.12±0.53	1.60	0

การศึกษาที่ 2 ความสามารถในการสร้างอะพาไทต์ของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อฟัน

#### ที่ระยะเวลา 2 วัน

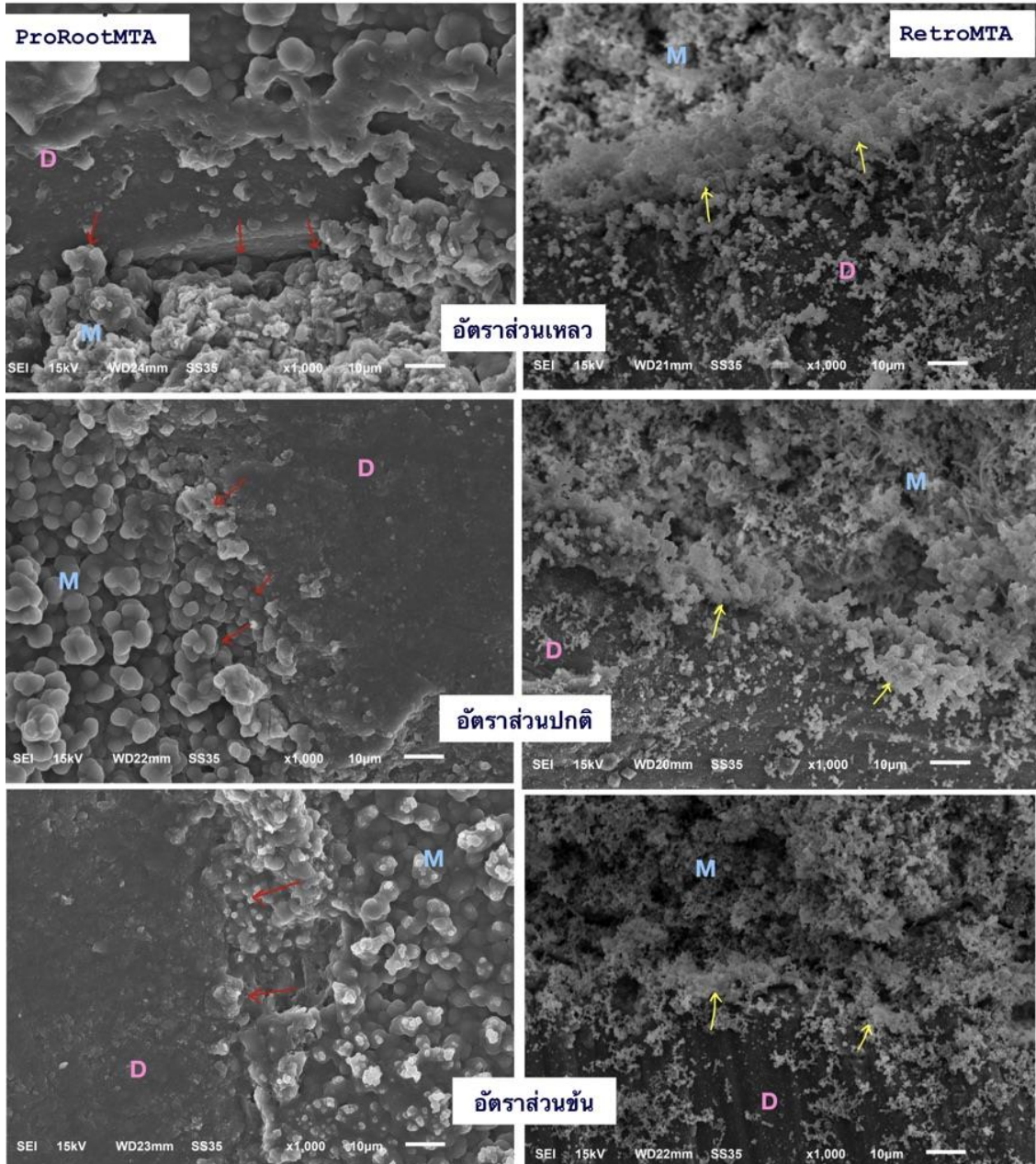
จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบผลึกทรงกลมปะปนกับผลึกรูปร่างไม่แน่นอนโดยผลึกของกลุ่มที่อุดด้วยโปรรูทเอ็มทีเอจะมีลักษณะทรงกลมที่ใหญ่กว่าเรโทรเอ็มทีเอโดยในกลุ่มเรโทรเอ็มทีเอจะมีผลึกขนาดเล็กกว่าอยู่รวมกันเป็นกลุ่มจำนวนมากจนมีลักษณะคล้ายกลุ่มของปุ๋ยเมฆ แสดงดังลูกศรสีแดงและเหลือง เมื่อพิจารณาถึงในแต่ละอัตราส่วนพบว่าลักษณะสัณฐานของผลึกที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วนทั้งโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอ (ภาพประกอบ 8)

#### ที่ระยะเวลา 7 วัน

พบผลึกทรงกลมปะปนกับผลึกรูปร่างไม่แน่นอนโดยผลึกของกลุ่มที่อุดด้วยโปรรูทเอ็มทีเอจะมีลักษณะทรงกลมที่ใหญ่กว่าเรโทรเอ็มทีเอไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากวันที่ โดยในกลุ่มเรโทรเอ็มทีเอจะมีผลึกขนาดเล็กกว่าอยู่รวมกันเป็นกลุ่มจำนวนมากจนมีลักษณะคล้ายกลุ่มของปุ๋ย

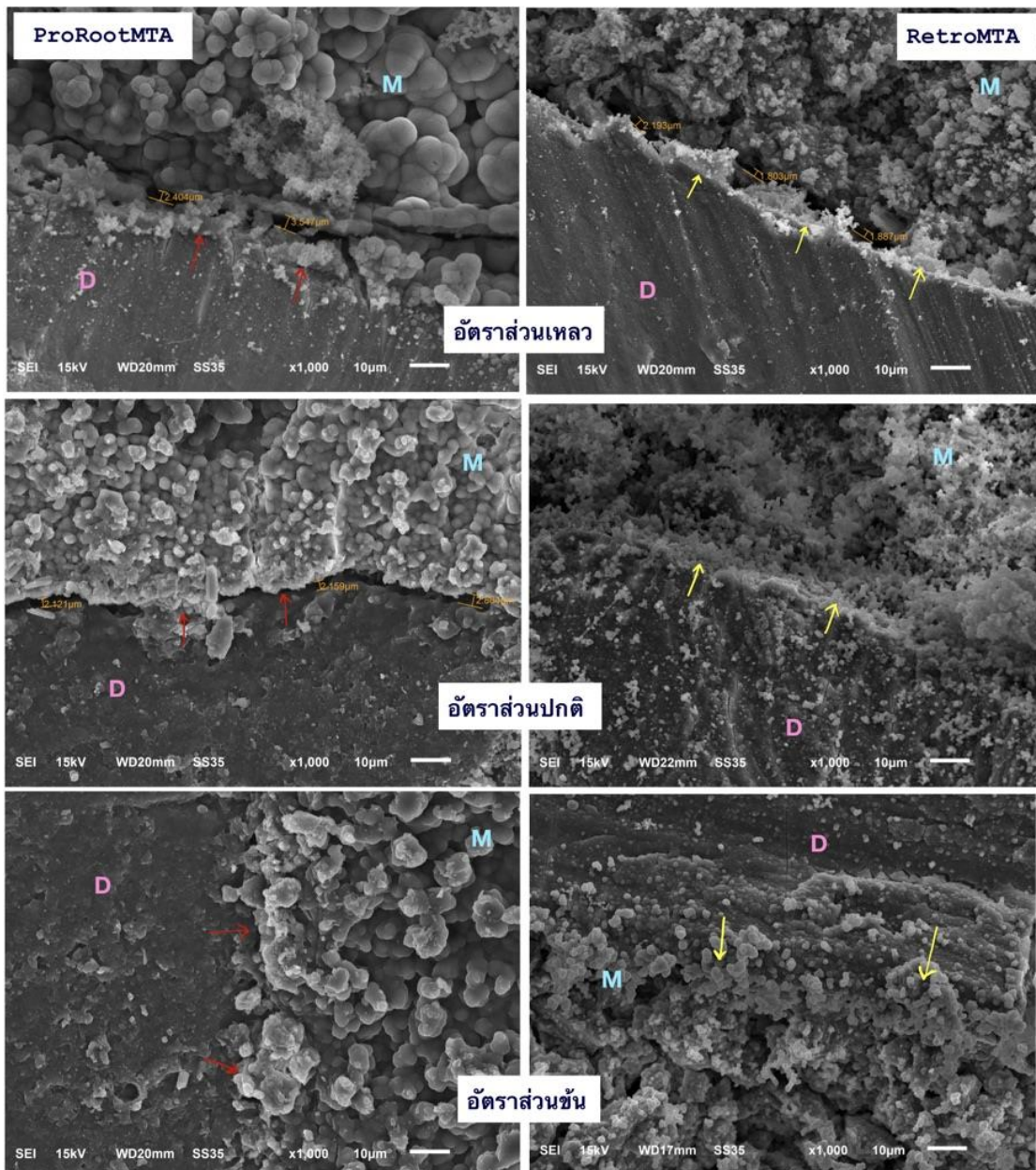


เมฆนอกจากนี้ในกลุ่มเรโตรีเอ็มทีเอสามารถพบผลึกทรงกลมขนาดเล็กโดยที่อยู่บนผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อพิจารณาถึงในแต่ละอัตราส่วนพบว่าลักษณะพื้นฐานของผลึกที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วนทั้งโปรรูทเอ็มทีเอและเรโตรีเอ็มทีเอ (ภาพประกอบ 9)



ภาพประกอบ 8 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 2 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย้อมปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน)

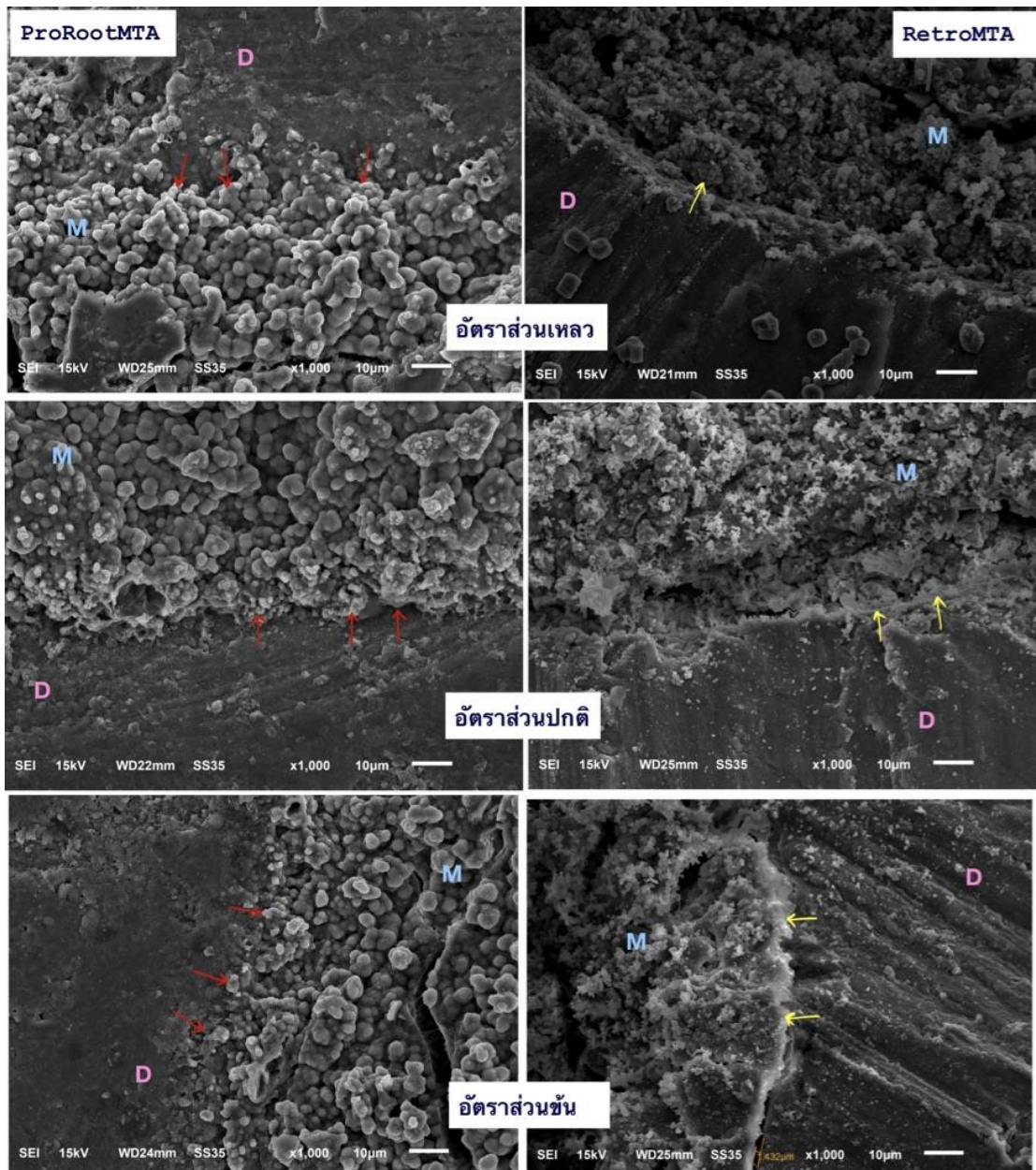




ภาพประกอบ 9 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลาย  
 จำลองคล้ายของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 7 (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดที่ยึดกับปลายราก  
 ฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน)

### ที่ระยะเวลา 30 วัน

ในกลุ่มตัวอย่างฟันที่ได้รับการอุดด้วยวัสดุทั้งสองจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า พิจารณาลักษณะของผลึกทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างจากวันที่ 7 แต่จำนวนของผลึกมีมากขึ้นและหนาแน่น (ภาพประกอบ 10)

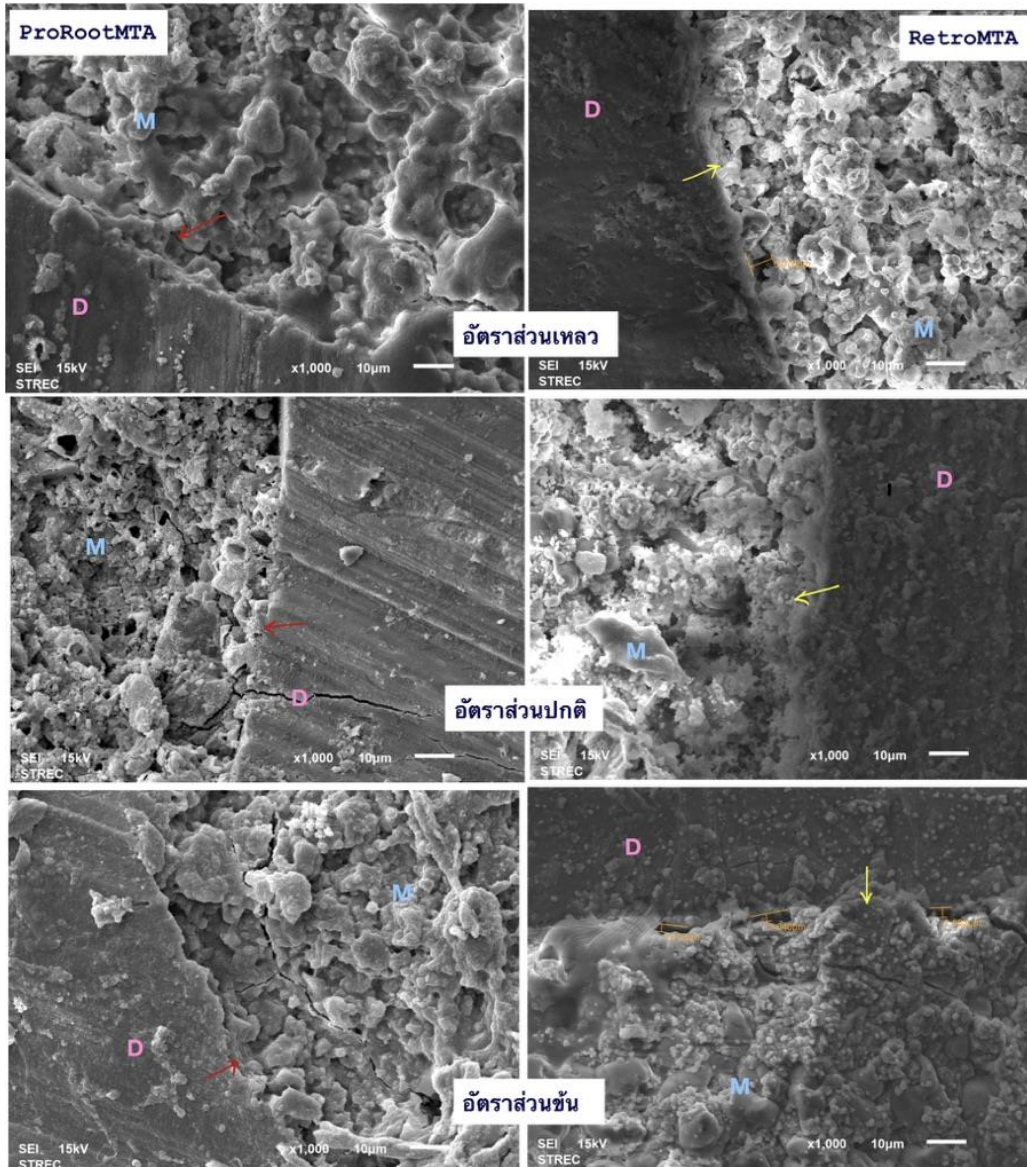


ภาพประกอบ 10 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางที่ภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลายจำลองค้ำยของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 30 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดยอนปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน)



### ที่ระยะเวลา 60 วัน (กลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง)

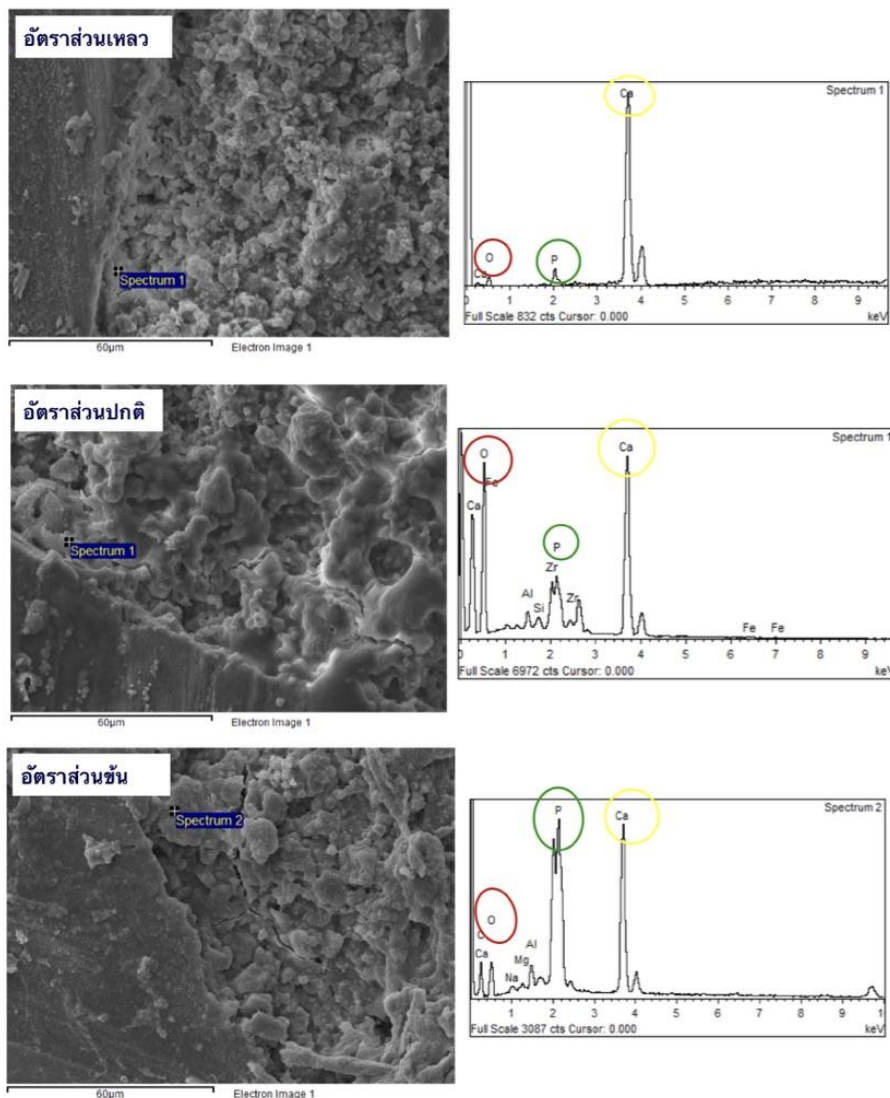
ในกลุ่มตัวอย่างฟันที่ได้รับการอุดย่นปลายรากฟันด้วยวัสดุทั้งสอง พบผลึกรูปร่างไม่แน่นอน ไม่พบผลึกทรงกลมผลึกรวมและทับถมกันหลายชั้นอย่างหนาแน่น และเมื่อพิจารณาถึงในแต่ละอัตราส่วนพบว่าลักษณะพื้นฐานของผลึกที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วน ไม่ว่าจะในวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอหรือเรโทรเอ็มทีเอ (ภาพประกอบ 11)



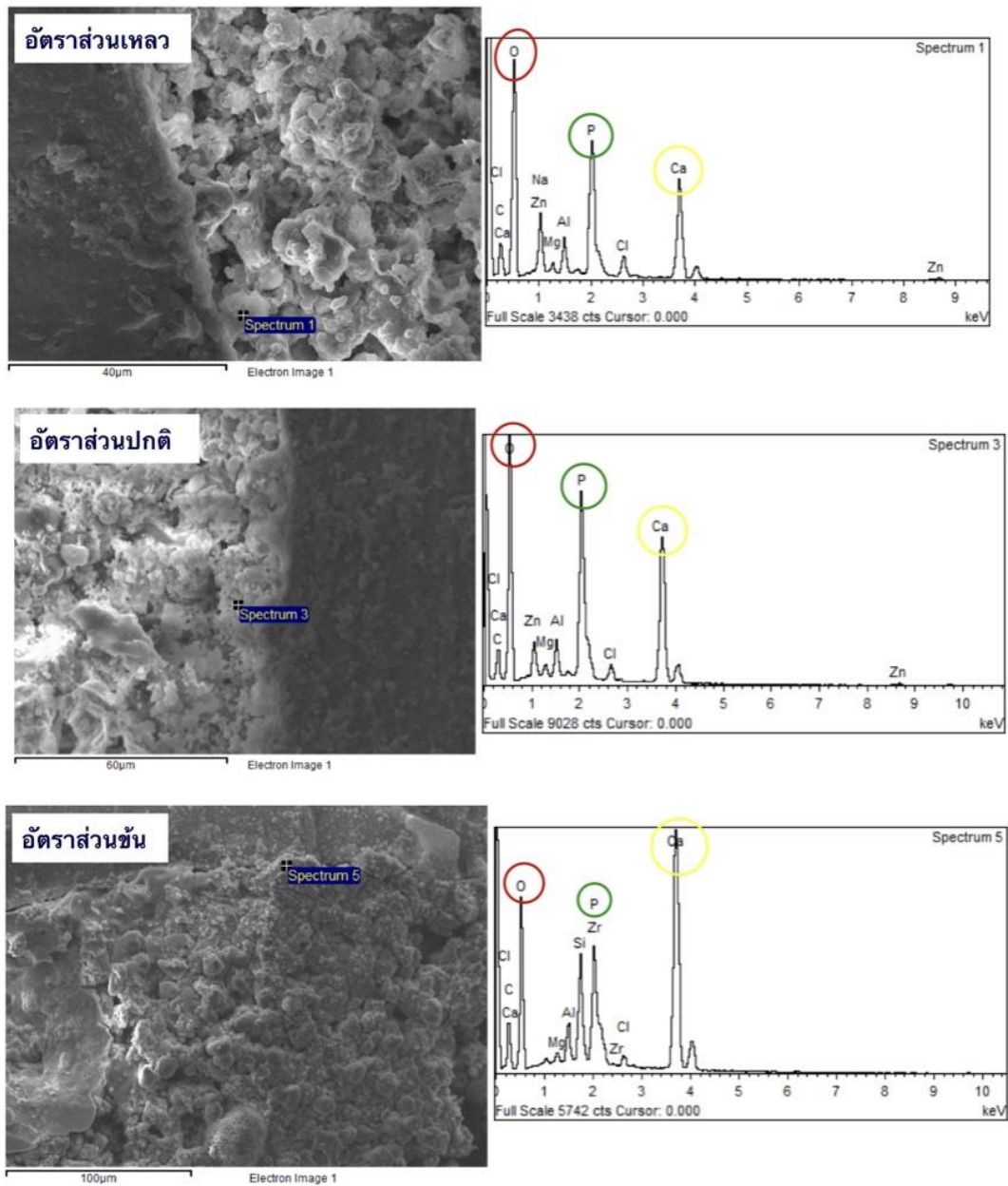
ภาพประกอบ 11 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวขวางที่ภายหลังจากที่แช่ลงในสารละลายจำลองค้ำยของเหลวในร่างกายเป็นระยะเวลา 60 วัน (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดย่นปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน)

### การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกที่ระยะเวลา 60 วัน (กลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง)

กลุ่มวัสดุชนิดโปรรูทเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วน ผลึกบริเวณที่พบว่ามีความหนาแน่นของขอบระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟัน เมื่อผลึกเหล่านั้นได้รับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ พบว่า อะตอมธาตุแคลเซียม, ฟอสฟอรัส และออกซิเจนในปริมาณมาก (ภาพประกอบ 12) ในส่วนในกลุ่มเรโทรเอ็มทีเอพบการมีอะตอมธาตุแคลเซียม, ฟอสฟอรัส และออกซิเจนในปริมาณมาก เช่นเดียวกับโปรรูทเอ็มทีเอแต่ เซอร์โคเนียจะพบได้ในกลุ่มที่เป็น เรโทรเอ็มทีเอเท่านั้น (ภาพประกอบ 13)



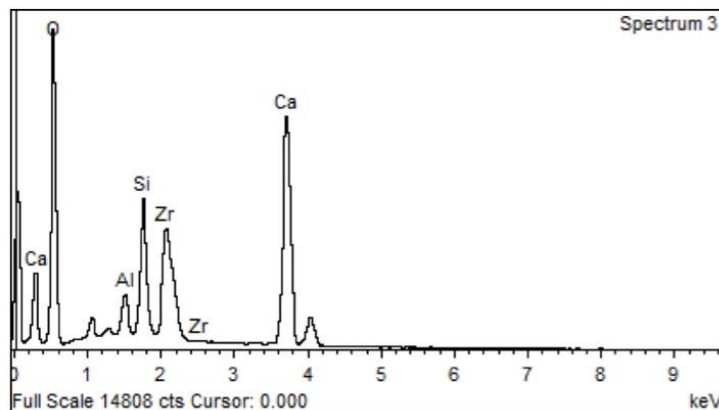
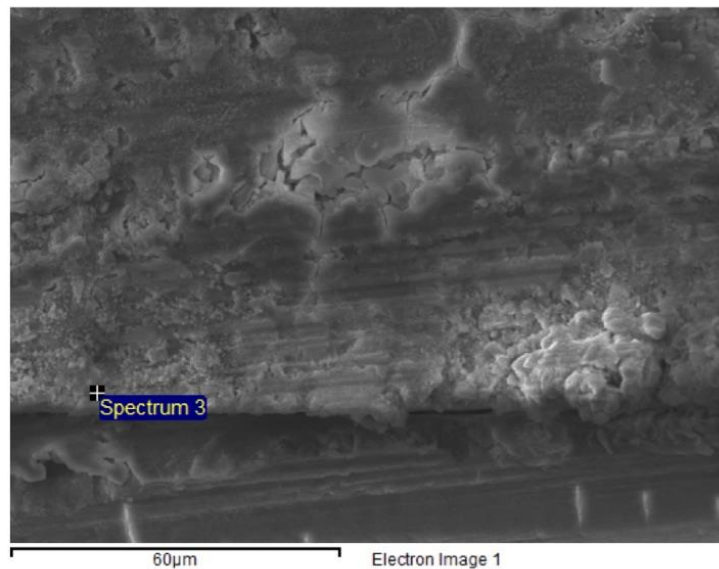
ภาพประกอบ 12 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวขวางที่ได้รับการอุดด้วยอนปลายรากด้วยวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอ



ภาพประกอบ 13 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวขวางที่ได้รับการอุดด้วยพลาสติกด้วยวัสดุเรซินที่เอ

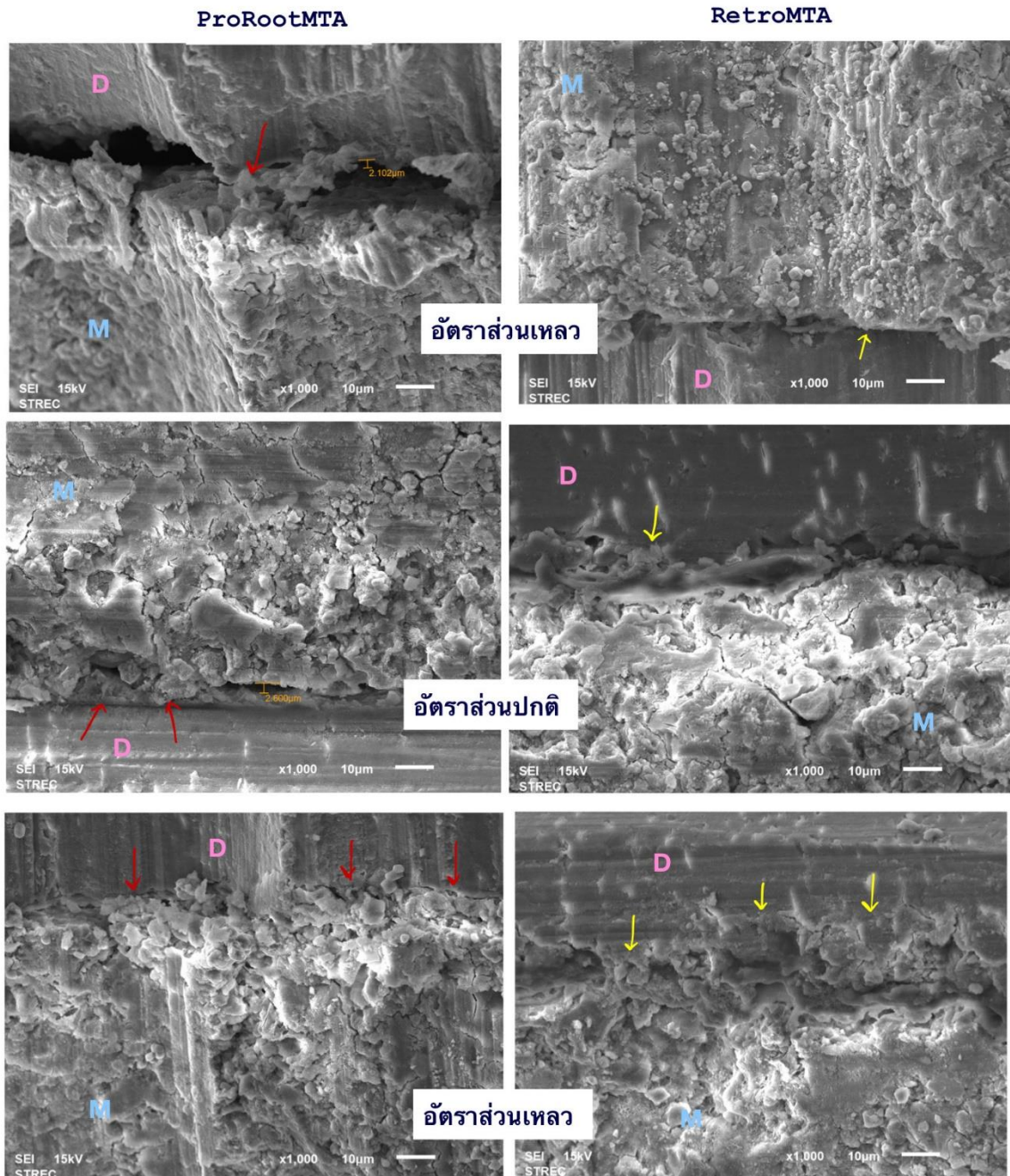
### ที่ระยะเวลา 60 วัน (กลุ่มตัวอย่างตามแนวยาว)

เมื่อนำตัวอย่างมาตัดตามแนวยาวของรากฟัน ไม่ว่าจะ เป็นกลุ่มอัตราส่วนใด ๆ ก็ตาม ที่ระดับความลึก 1 มิลลิเมตรผลึกมีการทับถมแน่นมีช่องว่าง เมื่อทำการวิเคราะห์หาธาตุที่ตำแหน่งดังกล่าวพบแคลเซียมเป็นปริมาณมากที่สุดรวมถึงธาตุชนิดอื่น ๆ เช่นเดียวกับที่พบบริเวณพื้นผิวของปลายรากฟันที่มีการอุ้ยอ้ายแต่บริเวณตามแนวยาวที่ระดับนี้จะไม่พบธาตุฟอสฟอรัสในส่วนที่ระดับความลึกฟัน 2 มิลลิเมตรผลึกมีการทับถมแน่นมากกว่าส่วนบนและมีช่องว่างน้อยกว่า ส่วนผลการวิเคราะห์เป็นไปในแบบเดียวกับที่ระดับความลึก 1 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 14 และ 15)



ภาพประกอบ 14 การวิเคราะห์ด้วย EDS ปลายรากฟันตามแนวยาวที่ไม่พบการสร้างอะพาไทต์





ภาพประกอบ 15 แสดงภาพถ่ายของปลายรากฟันตามแนวยาวที่ได้รับการอุดด้วยวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ทั้งสองชนิด (M คือ บริเวณพื้นผิวของวัสดุอุดปลายรากฟัน, D คือ บริเวณเนื้อฟัน)



## บทที่ 5

### อภิปรายผลการศึกษา

วัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ เป็นวัสดุกลุ่มใหม่ที่มีคุณสมบัติการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อ(17-20) ไม่ว่าในเรื่องการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง(19, 84, 85) หรือกระตุ้นการสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์(23-26, 80-82) โดยไม่มีพิษต่อเซลล์(86-91) โดยในการศึกษานี้เลือกวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอและเรโทรเอ็มทีเอมาศึกษา เนื่องจากโปรรูทเอ็มทีเอเป็นวัสดุแรกที่มีการพัฒนา มีการศึกษามากมายในหลายแง่มุม วัสดุดังกล่าวจึงจัดเป็นวัสดุมาตรฐาน ส่วนเรโทรเอ็มทีเอเป็นวัสดุใหม่ที่พัฒนามาแก้ไขข้อบกพร่องของโปรรูทเอ็มทีเอ มีการลดขนาดอนุภาคของส่วนผง ส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการก่อตัว นอกจากนี้วัสดุทั้งคู่มีการแยกส่วนผงและส่วนน้ำ ทำให้ผู้ใช้สามารถผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จึงเป็นที่น่าสนใจว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของส่วนผงต่อส่วนน้ำ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

การใช้งานทางคลินิกของวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดที่มีการผสมด้วยมือ ชนิดโปรรูทเอ็มทีเอใช้งานที่อัตราส่วนน้ำต่อผงเท่ากับ 0.33 โดยมวล อย่างไรก็ตามการใช้งานจริงในคลินิก การผสมอัตราส่วนของซีเมนต์ให้ได้ตามนั้นไม่เป็นที่นิยมทำกันในคลินิกเนื่องจากของบรรจุภัณฑ์มีปริมาณที่ใช้งานเพียงหนึ่งครั้งมากเกินไป ทำให้ผู้ใช้งานมักจะมีการแบ่งส่วนผงจากของนั้นใช้เพื่อผสมกับส่วนน้ำตามชนิดการใช้งานตามที่ตนถนัด และในเรโทรเอ็มทีเอส่วนผงเมื่อผสมกับน้ำจะมีระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุค่อนข้างเร็ว วัสดุมีความแข็งมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป โดยจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าใช้เวลาประมาณ 30 วินาที หากผู้ใช้ต้องการใช้วัสดุเพิ่มเติม จะใช้วิธีการเติมน้ำเพิ่มเพื่อให้มีความชื้นเหลวตามที่ต้องการใช้งาน หลายการศึกษาที่ผ่านมา การเปลี่ยนอัตราส่วนของวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุหลายอย่างเปลี่ยนแปลงไป(40-45)

ในการศึกษานี้เลือกการประเมินความแนบสนิทของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์จากการศึกษาที่ผ่านมาพบการประเมินความแนบสนิททำได้หลายวิธีที่นิยมมักใช้สิ่งทดสอบ (tracer) เช่นแบคทีเรีย สี ซึ่มผ่านช่องว่างระหว่างวัสดุและฟัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าว สังเกตและวัดผลได้จากการรั่วซึ่มของสารผ่านช่องว่างที่เกิดขึ้นเท่านั้นและวิธีดังกล่าวจะพบช่องว่างที่เกิดจากอากาศค้างอยู่ทำให้ขัดขวางการซึ่มผ่านของสีย้อมอ่านการรั่วซึ่มผิดพลาด(92-94)โดยอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือศึกษาความแนบสนิทของกายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีข้อดีทำให้พบบริเวณช่องว่างระหว่างวัสดุผนังคลองรากฟันจริงสามารถวัดระยะช่องว่างเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเชิงปริมาณเป็นระยะช่องว่างที่เกิดขึ้น Küçükkaya และ Parashos ทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบเพื่อ

ความเหมาะสมของของวัสดุชนิดเอ็มทีเอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าการประเมินด้วยวิธีนี้เอ็มทีเอมีความเหมาะสมขอขบที่ดีเป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาความสามารถในการผนึกขอขบวิธีอื่น(95)

ผลการศึกษาในครั้งนี้ความเหมาะสมขอขบในกลุ่มวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอ กลุ่มอัตราส่วนเหลว จะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างที่มากกว่าอัตราส่วนชั้นตั้งแต่ระยะเวลา 7 วันเป็นต้นไป เพราะอัตราส่วนที่เหลวกว่าจะมีปริมาณน้ำมากส่งผลความสามารถในการละลายตัวเชิงปริมาตรมากขึ้น(43, 44) รวมถึงน้ำส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะตกค้างอยู่บนเนื้อวัสดุกลายเป็นช่องว่างหรือรูพรุน(43) ในวันที่ 30 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเหลวหรือชั้นจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างมากกว่าอัตราส่วนปกติเนื่องจาก อัตราส่วนเหลวมีการละลายตัวสูงกว่าดังที่กล่าวมา ส่วนในกลุ่มอัตราส่วนชั้นจะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างที่มากกว่าเนื่องจากปริมาณน้ำที่น้อยกว่าตามที่บริษัทแนะนำอาจจะส่งผลให้อนุภาคส่วนผงกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และกระบวนการก่อตัวของวัสดุที่ไม่สมบูรณ์ โดยการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ใช้สาลีขึ้นวางบนวัสดุในครั้งสุดท้ายซึ่งการเพิ่มความชื้น ทำให้เกิดระยะช่องว่างและการรั่วซึมมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Oraie และคณะ(41) พบว่าอัตราส่วนชั้นของวัสดุจะมีการรั่วซึมของสี้อยมมากขึ้นเทียบกับอัตราส่วนปกติหากใช้พริกเกอร์กดอัดวัสดุเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้สาลีขึ้น

ความเหมาะสมขอขบของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอ กลุ่มอัตราส่วนเหลว ในช่วงวันที่ 2 จะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างต่ำกว่าปกติเกิดจากความสามารถในการไหลแผ่ได้ดีของวัสดุ แต่ปริมาณน้ำมีมากเกินไปบนวัสดุเกิดทำให้ช่องว่างหรือรูพรุนและความสามารถในการละลายตัวของวัสดุที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอ(43, 44) จึงทำให้ในช่วงวันที่ 7 กลุ่มวัสดุเรโพรเอ็มทีเอมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างมากขึ้น เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อผงของกลุ่มทดลองให้ชั้นมากขึ้น ในช่วงวันที่ 2 พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างกลุ่มอัตราส่วนชั้นต่ำกว่าอัตราส่วนปกติเนื่องจากความสามารถในการทำงานและการขึ้นรูปของวัสดุเพื่อที่จะนำไปใส่ในโพรงฟันทำได้ง่ายกว่า(43) ในขณะที่ทำการทดลองพบว่าสามารถใช้งานได้ทันทีที่ผสมเสร็จแตกต่างจากอัตราส่วนปกติที่จะต้องรอประมาณ 20 วินาทีวัสดุจะมีความชื้นเหน็ดหมาะสมที่จะใช้งานได้ ช่วงวันที่ 7 ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนปกติซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกลุ่มโปรรูทเอ็มทีเอดังนั้นลักษณะระยะช่องว่างที่กว้างขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดจากปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปเมื่อเทียบกับส่วนผงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ไม่สมบูรณ์ ทำให้ทำให้เกิดระยะช่องว่างและการรั่วซึมมากขึ้นดังผลการศึกษาที่กล่าวมา(41)

วัสดุเคลือบซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาที่คล้ายกันคือช่วงแรก 2-7 วันจะมีค่าเฉลี่ยช่องว่างที่มากขึ้น ต่อมาเมื่อวัสดุสัมผัสกับสารละลายจำลองคล้ายเหลวในร่างกายผ่านไปจนถึง 60 วันซึ่งไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนกลุ่มโมดของทั้งสองวัสดุ ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างไม่มีความแตกต่างกันคาดว่าเป็นผลเนื่องจาก มีการสร้างผลึกอะพาไทต์ขึ้นบนผิวของวัสดุซึ่งเคลือบไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่ละลายออกมาในช่วงแรกจะจับกับฟอสเฟตไอออนที่อยู่ในสารละลายในร่างกาย(64) ซึ่งในการศึกษานี้หลังจาก 60 วันมีการวิเคราะห์ผลึกบนวัสดุพบธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นสารประกอบที่มีแนวโน้มเป็นอะพาไทต์(24, 25, 81) นอกจากนี้อาจจะเป็นผลมาจากการขยายตัวในขณะที่มีการก่อตัวของวัสดุทั้งสองชนิด ส่งผลให้เกิดความแนบสนิทของบดขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงไม่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างที่ระยะเวลาในการศึกษาของ Hawley และคณะ เมื่อตัดแปลงความชื้นเหลวของวัสดุเอ็มทีเอไม่ส่งผลต่อการขยายตัวขณะก่อตัว แต่สิ่งที่ส่งผลจะเป็นชนิดของวัสดุ(42) โดยสารละลายที่มาสัมผัสกับวัสดุและชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันจะเป็นปัจจัยส่งผลต่อการขยายตัวขณะก่อตัวทำให้เกิดความสามารถในการผนึกขอบของวัสดุ(62, 96) ดังนั้นเป็นไปได้ว่า ในการศึกษานี้เมื่อการขยายตัวของวัสดุระหว่างโปรรูเอ็มทีเอและเรโพรเอ็มทีเอมีความแตกต่างกันความแนบสนิทของบดที่เกิดจากทั้งสองจึงแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อผง การขยายตัวในขณะที่มีการก่อตัวของวัสดุไม่มีความแตกต่างกัน

ความแนบสนิทของบดตามยาวกับรากฟันในกลุ่มเคลือบซีเมนต์ทั้งสองชนิด ในกลุ่มโปรรูเอ็มทีเออัตราส่วนปกติมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูงกว่าอัตราส่วนเหลวและชื้น เนื่องจากในอัตราส่วนเหลวมีความไหลแผ่เพื่อสัมผัสกับผนังคลองรากฟันในแนวตั้งได้ดีร่วมกับการใช้ปลั๊กเกอร์ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Oraie และคณะ(41) ที่อัตราส่วนเหลวกว่าร่วมกับการใช้ปลั๊กเกอร์จะช่วยลดการรั่วซึมของซีเมนต์ของแบบจำลองการอุดย้อนปลายรากฟัน ในการศึกษาครั้งนี้หรือให้มีการก่อตัวของวัสดุสมบูรณ์ก่อนแช่ลงในสารละลาย ปัจจัยในเรื่องของการละลายตัวเชิงปริมาตรสำหรับกลุ่มอัตราส่วนเหลวไม่น่าจะเกิดขึ้นที่ระดับความลึก 1 ถึง 2 มิลลิเมตรจากปลายรากฟัน โดยพบว่าเมื่อวิเคราะห์ธาตุในระดับนี้ไม่พบธาตุฟอสฟอรัสแสดงถึงการไม่มีสารละลายที่มีองค์ประกอบของฟอสเฟตซึมผ่านถึงตำแหน่งดังกล่าวได้ ในอัตราส่วนชื้น มีความสามารถทำงานกับวัสดุได้ง่ายกว่า เนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของวัสดุสั้นลง(44) ทำให้นำใส่ลงในโพรงของปลายรากฟันในขณะที่เตรียมชิ้นงานได้ง่ายกว่า และปริมาณส่วนผงมากขึ้นหรือการที่วัสดุมีความชื้นมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงพันธะคอดอกเพิ่มขึ้น(40) ทำให้วัสดุยึดติดกับผนังคลองรากฟันได้ดีขึ้น

และต้านทานต่อการที่วัสดุหลุดออกความแนบสนิทขอบตามยาวกับรากฟัน สำหรับในกลุ่มเรโพรเอ็มที่เอจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราส่วนเหลวของเรโพรเอ็มที่เอจะมีค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างสูง กว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากอัตราส่วนที่เหลวกว่าจะมีปริมาณน้ำมากส่งผลความสามารถในการละลาย ตัวเชิงปริมาตรมากขึ้นรวมถึงรูพรุนและช่องว่างที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน(43, 44)

รูปแบบของผลึกที่เกิดขึ้นช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกันในการศึกษาครั้งนี้ ในช่วงแรก 2-7 วัน วัสดุกลุ่มโปรรูทเอ็มที่เอไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนใด จะมีผลึกรูปร่างทรงกลมขนาดใหญ่ ในขณะที่ กลุ่มเรโพรเอ็มที่เอมีผลึกรูปร่างเล็กกว่าเกาะกลุ่มกันหนาแน่นทำให้มีลักษณะคล้ายปุยเมฆ ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก ชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันจะส่งผลให้รูปแบบของผลึกที่เกิดขึ้น แตกต่างกันได้(97)และเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคเริ่มต้นของโปรรูทเอ็มที่เอและเรโพรเอ็มที่เอ ซึ่งจากการศึกษาของ Komabayashi และ Spangberg(68) พบว่าโปรรูทเอ็มที่เอมีขนาดอนุภาค ประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเรโพรเอ็มที่เอที่บริษัทรายงานว่า มีขนาดเท่ากับ 2.62 ไมโครเมตร ต่อมาช่วงวันที่ 60 วัสดุทั้งสองชนิดมีรูปแบบของผลึกคล้ายกันคือมีลักษณะเป็น แผ่นรูปร่างไม่แน่นอนซ้อนทับกันหลายชั้นและเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในผลึกบริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อระหว่างวัสดุกับผนังคลองรากฟัน ผลึกที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัส โดยเริ่มต้นแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ที่ก่อตัวสมบูรณ์แล้วจะปลดปล่อยแคลเซียมไอออนอย่าง ต่อเนื่องเข้ามาในสารละลายที่มีฟอสเฟตไอออนทำให้ไอออนทั้งสองชนิดมีความเข้มข้นสูงใน สารละลายซึ่งจะเปลี่ยนเป็นการสร้างสารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตในสารละลายลักษณะเป็นกลุ่ม เล็ก ๆ กลุ่มเล็กดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางเพื่อให้เกิดการเกาะกลุ่มหนาแน่นขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่ง จะอยู่ใกล้กับพื้นผิวของวัสดุที่ก่อตัวแล้วสร้างเป็นเฟสบริเวณกว้างขึ้นที่อุดมไปด้วยแคลเซียมและ ฟอสฟอรัสกลุ่มเล็กๆ ที่หนาแน่นมากขึ้นจะเชื่อมต่อกัน(81) ดังนั้นในการศึกษานี้เมื่อผ่านระยะ เวลานานขึ้นรูปแบบของผลึกจะมีลักษณะเป็นรูปร่างไม่แน่นอนซ้อนทับกันหลายชั้น และการที่แช่ ในสารละลายนานขึ้นรูปแบบสุดท้ายที่เกิดจะเป็นผลึกที่มีองค์ประกอบที่มีแนวโน้มเป็นผลึกอะพา ไทต์(81) ซึ่งมีความสำคัญคือทำให้ระยะช่องว่างของวัสดุลดลงเพิ่มความสามารถในการผนึกขอบ ระหว่างวัสดุกับเนื้อฟันได้(23, 24, 81, 82)

ในการศึกษาครั้งนี้รอให้วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการก่อตัวอย่างสมบูรณ์โดยไม่นำวัสดุลงไป แช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวร่างกายทันที ทำให้วัสดุมีการเติมเต็มและผนึกขอบจาก วิธีการเตรียมตัวอย่างมาแล้วดังนั้นจากภาพถ่ายจึงพบผลึกที่มีองค์ประกอบแบบอะพาไทต์จะอยู่ บริเวณส่วนผิวหน้าตัดของรากฟันเท่านั้นเพราะเมื่อทำการตัดตามแนวยาวของแกนของรากฟันไม่

พบองค์ประกอบของธาตุฟอสฟอรัสอยู่เนื่องจากเกิดการผืนึกชอบส่วนบนมาก่อนสารละลายไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในระดับลึกได้

วัสดุโปรรูทเอ็มทีเอมีการศึกษาผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนอัตราส่วนหลายประเด็น รวมถึงการศึกษาครั้งนี้ผลที่เกิดขึ้นในกลุ่มวัสดุชนิดนี้สามารถอธิบายได้ชัดเจน แต่ในกลุ่มเรโทเรเอ็มทีเอพบว่าไม่มีผลที่ไม่มีความสอดคล้องกับวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอหลายประเด็นซึ่งน่าจะสามารถใช้เป็นการศึกษาในครั้งต่อไป



## บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อผงในวัสดุเคลือบซีเมนต์ชนิดโปรรูทเอ็มส่งผลความแนบสนิทขอบไม่แตกต่างกัน ส่วนชนิดเรโพรทเอ็มที่เอแนะนำให้ใช้ อัตราส่วนปกติที่บริษัทกำหนดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนส่งผลต่อความแนบสนิทขอบที่แตกต่างไปจากอัตราส่วนปกติ





## บรรณานุกรม

1. Friedman S, Stabholz A. Endodontic retreatment--case selection and technique. Part 1: Criteria for case selection. *J Endod.* 1986;12(1):28-33.
2. Nair PN, Sjogren U, Figdor D, Sundqvist G. Persistent periapical radiolucencies of root-filled human teeth, failed endodontic treatments, and periapical scars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1999;87(5):617-27.
3. Wesson CM, Gale TM. Molar apicectomy with amalgam root-end filling: results of a prospective study in two district general hospitals. *Br Dent J.* 2003;195(12):707-14; discussion 698.
4. Tsesis I, Rosen E, Schwartz-Arad D, Fuss Z. Retrospective evaluation of surgical endodontic treatment: traditional versus modern technique. *J Endod.* 2006;32(5):412-6.
5. Taschieri S, Del Fabbro M, Weinstein T, Rosen E, Tsesis I. Magnification in modern endodontic practice. *Refuat Hapeh Vehashinayim (1993).* 2010;27(3):18-22, 61.
6. Rahbaran S, Gilthorpe MS, Harrison SD, Gulabivala K. Comparison of clinical outcome of periapical surgery in endodontic and oral surgery units of a teaching dental hospital: a retrospective study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2001;91(6):700-9.
7. Halse A, Molven O, Grung B. Follow-up after periapical surgery: the value of the one-year control. *Endod Dent Traumatol.* 1991;7(6):246-50.
8. Taschieri S, Del Fabbro M, Testori T, Weinstein RL. Endodontic reoperation using an endoscope and microsurgical instruments: One year follow-up. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2007;45(7):582-5.
9. Rubinstein RA, Kim S. Long-term follow-up of cases considered healed one year after apical microsurgery. *J Endod.* 2002;28(5):378-83.
10. Christiansen R, Kirkevang LL, Horsted-Bindslev P, Wenzel A. Randomized clinical trial of root-end resection followed by root-end filling with mineral trioxide aggregate or smoothing of the orthograde gutta-percha root filling--1-year follow-up. *Int Endod J.* 2009;42(2):105-14.



11. Chong BS, Pitt Ford TR, Hudson MB. A prospective clinical study of Mineral Trioxide Aggregate and IRM when used as root-end filling materials in endodontic surgery. *Int Endod J.* 2003;36(8):520-6.
12. Tsesis I, Rosen E, Taschieri S, Telishevsky Strauss Y, Ceresoli V, Del Fabbro M. Outcomes of surgical endodontic treatment performed by a modern technique: an updated meta-analysis of the literature. *J Endod.* 2013;39(3):332-9.
13. Taschieri S, Del Fabbro M, Testori T, Weinstein R. Microscope versus endoscope in root-end management: a randomized controlled study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2008;37(11):1022-6.
14. Song M, Shin SJ, Kim E. Outcomes of endodontic micro-resurgery: a prospective clinical study. *J Endod.* 2011;37(3):316-20.
15. Saunders WP. A prospective clinical study of periradicular surgery using mineral trioxide aggregate as a root-end filling. *J Endod.* 2008;34(6):660-5.
16. Kim S, Song M, Shin SJ, Kim E. A Randomized Controlled Study of Mineral Trioxide Aggregate and Super Ethoxybenzoic Acid as Root-end Filling Materials in Endodontic Microsurgery: Long-term Outcomes. *J Endod.* 2016;42(7):997-1002.
17. 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.
18. 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.
19. Baek SH, Plenk H, Jr., Kim S. Periapical tissue responses and cementum regeneration with amalgam, SuperEBA, and MTA as root-end filling materials. *J Endod.* 2005;31(6):444-9.
20. Saidon J, He J, Zhu Q, Safavi K, Spangberg LS. Cell and tissue reactions to mineral trioxide aggregate and Portland cement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003;95(4):483-9.
21. Torabinejad M, Rastegar AF, Kettering JD, Pitt Ford TR. Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod.* 1995;21(3):109-12.

22. Fischer EJ, Arens DE, Miller CH. Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as compared with zinc-free amalgam, intermediate restorative material, and Super-EBA as a root-end filling material. *J Endod.* 1998;24(3):176-9.
23. Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005;31(2):97-100.
24. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomineralization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. *J Endod.* 2009;35(5):731-6.
25. Gandolfi MG, Taddei P, Tinti A, Prati C. Apatite-forming ability (bioactivity) of ProRoot MTA. *Int Endod J.* 2010;43(10):917-29.
26. Bozeman TB, Lemon RR, Eleazer PD. Elemental analysis of crystal precipitate from gray and white MTA. *J Endod.* 2006;32(5):425-8.
27. Saghiri MA, Lotfi M, Saghiri AM, Vosoughhosseini S, Fatemi A, Shiezadeh V, et al. Effect of pH on sealing ability of white mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod.* 2008;34(10):1226-9.
28. Namazikhah MS, Nekoofar MH, Sheykhrezae MS, Salariyeh S, Hayes SJ, Bryant ST, et al. The effect of pH on surface hardness and microstructure of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2008;41(2):108-16.
29. Mooney GC, North S. The current opinions and use of MTA for apical barrier formation of non-vital immature permanent incisors by consultants in paediatric dentistry in the UK. *Dent Traumatol.* 2008;24(1):65-9.
30. Bortoluzzi EA, Broon NJ, Bramante CM, Felipe WT, Tanomaru Filho M, Esberard RM. The influence of calcium chloride on the setting time, solubility, disintegration, and pH of mineral trioxide aggregate and white Portland cement with a radiopacifier. *J Endod.* 2009;35(4):550-4.
31. Lee H, Shin Y, Kim SO, Lee HS, Choi HJ, Song JS. Comparative Study of Pulpal Responses to Pulpotomy with ProRoot MTA, RetroMTA, and TheraCal in Dogs' Teeth. *J Endod.* 2015;41(8):1317-24.
32. Dammaschke T, Nowicka A, Lipski M, Ricucci D. Histological evaluation of hard

tissue formation after direct pulp capping with a fast-setting mineral trioxide aggregate (RetroMTA) in humans. *Clin Oral Investig*. 2019.

33. Chang SW, Bae WJ, Yi JK, Lee S, Lee DW, Kum KY, et al. Odontoblastic Differentiation, Inflammatory Response, and Angiogenic Potential of 4 Calcium Silicate-based Cements: Micromega MTA, ProRoot MTA, RetroMTA, and Experimental Calcium Silicate Cement. *J Endod*. 2015;41(9):1524-9.
34. Bakhtiar H, Aminishakib P, Ellini MR, Mosavi F, Abedi F, Esmailian S, et al. Dental Pulp Response to RetroMTA after Partial Pulpotomy in Permanent Human Teeth. *J Endod*. 2018;44(11):1692-6.
35. 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.
36. 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.
37. Ghorbanzadeh A, Shokouhinejad N, Fathi B, Raoof M, Khoshkhounejad M. An In Vitro Comparison of Marginal Adaptation of MTA and MTA-Like Materials in the Presence of PBS at One-Week and Two-Month Intervals. *J Dent (Tehran)*. 2014;11(5):560-8.
38. Fleming GJ, Shelton RM, Landini G, Marquis PM. The influence of mixing ratio on the toughening mechanisms of a hand-mixed zinc phosphate dental cement. *Dent Mater*. 2001;17(1):14-20.
39. Billington RW, Williams JA, Pearson GJ. Variation in powder/liquid ratio of a restorative glass-ionomer cement used in dental practice. *Br Dent J*. 1990;169(6):164-7.
40. Turker SA, Uzunoglu E. Effect of powder-to-water ratio on the push-out bond strength of white mineral trioxide aggregate. *Dent Traumatol*. 2016;32(2):153-5.
41. Oraie E, Ghassemi AR, Eliasifar G, Sadeghi M, Shahravan A. Apical Sealing Ability of MTA in Different Liquid to Powder Ratios and Packing Methods. *Iran Endod J*. 2012;7(1):5-9.
42. Hawley M, Webb TD, Goodell GG. Effect of varying water-to-powder ratios on the setting expansion of white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod*. 2010;36(8):1377-

- 9.
43. Fridland M, Rosado R. Mineral trioxide aggregate (MTA) solubility and porosity with different water-to-powder ratios. *J Endod.* 2003;29(12):814-7.
44. Cavenago BC, Pereira TC, Duarte MA, Ordinola-Zapata R, Marciano MA, Bramante CM, et al. Influence of powder-to-water ratio on radiopacity, setting time, pH, calcium ion release and a micro-CT volumetric solubility of white mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2014;47(2):120-6.
45. Basturk FB, Nekoofar MH, Gunday M, Dummer PM. Effect of varying water-to-powder ratios and ultrasonic placement on the compressive strength of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2015;41(4):531-4.
46. Gartner AH, Dorn SO. Advances in endodontic surgery. *Dent Clin North Am.* 1992;36(2):357-78.
47. Harty FJ, Parkins BJ, Wengraf AM. The success rate of apicectomy. A retrospective study of 1,016 cases. *Br Dent J.* 1970;129(9):407-13.
48. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Brink F. Chemical differences between white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005;31(2):101-3.
49. Li Q, Coleman NJ. The hydration chemistry of ProRoot MTA. *Dent Mater J.* 2015;34(4):458-65.
50. Camilleri J. Hydration mechanisms of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2007;40(6):462-70.
51. Chang SW. Chemical characteristics of mineral trioxide aggregate and its hydration reaction. *Restor Dent Endod.* 2012;37(4):188-93.
52. Camilleri J. Characterization of hydration products of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2008;41(5):408-17.
53. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Stowe S, Brink F. A qualitative X-ray analysis of white and grey mineral trioxide aggregate using compositional imaging. *J Mater Sci Mater Med.* 2006;17(2):187-91.
54. 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.

55. Islam I, Chng HK, Yap AU. Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement. *J Endod.* 2006;32(3):193-7.
56. Chng HK, Islam I, Yap AU, Tong YW, Koh ET. Properties of a new root-end filling material. *J Endod.* 2005;31(9):665-8.
57. Dammaschke T, Gerth HU, Zuchner H, Schafer E. Chemical and physical surface and bulk material characterization of white ProRoot MTA and two Portland cements. *Dent Mater.* 2005;21(8):731-8.
58. Nandini S, Ballal S, Kandaswamy D. Influence of glass-ionomer cement on the interface and setting reaction of mineral trioxide aggregate when used as a furcal repair material using laser Raman spectroscopic analysis. *J Endod.* 2007;33(2):167-72.
59. Budig CG, Eleazer PD. In vitro comparison of the setting of dry ProRoot MTA by moisture absorbed through the root. *J Endod.* 2008;34(6):712-4.
60. Chogle S, Mickel AK, Chan DM, Huffaker K, Jones JJ. Intracanal assessment of mineral trioxide aggregate setting and sealing properties. *Gen Dent.* 2007;55(4):306-11.
61. Walker MP, Diliberto A, Lee C. Effect of setting conditions on mineral trioxide aggregate flexural strength. *J Endod.* 2006;32(4):334-6.
62. Storm B, Eichmiller FC, Tordik PA, Goodell GG. Setting expansion of gray and white mineral trioxide aggregate and Portland cement. *J Endod.* 2008;34(1):80-2.
63. Danesh G, Dammaschke T, Gerth HU, Zandbiglari T, Schafer E. A comparative study of selected properties of ProRoot mineral trioxide aggregate and two Portland cements. *Int Endod J.* 2006;39(3):213-9.
64. Shie MY, Huang TH, Kao CT, Huang CH, Ding SJ. The effect of a physiologic solution pH on properties of white mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2009;35(1):98-101.
65. Antunes Bortoluzzi E, Juarez Broon N, Antonio Hungaro Duarte M, de Oliveira Demarchi AC, Monteiro Bramante C. The use of a setting accelerator and its effect on pH and calcium ion release of mineral trioxide aggregate and white Portland cement. *J Endod.* 2006;32(12):1194-7.
66. Torabinejad M, Chivian N. Clinical applications of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 1999;25(3):197-205.

67. Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Ford TR. The constitution of mineral trioxide aggregate. *Dent Mater.* 2005;21(4):297-303.
68. Komabayashi T, Spangberg LS. Comparative analysis of the particle size and shape of commercially available mineral trioxide aggregates and Portland cement: a study with a flow particle image analyzer. *J Endod.* 2008;34(1):94-8.
69. Lee YL, Lin FH, Wang WH, Ritchie HH, Lan WH, Lin CP. Effects of EDTA on the hydration mechanism of mineral trioxide aggregate. *J Dent Res.* 2007;86(6):534-8.
70. Wang Z, Ma J, Shen Y, Haapasalo M. Acidic pH weakens the microhardness and microstructure of three tricalcium silicate materials. *Int Endod J.* 2015;48(4):323-32.
71. Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. *J Endod.* 1993;19(12):591-5.
72. Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford TR. Dye leakage of four root end filling materials: effects of blood contamination. *J Endod.* 1994;20(4):159-63.
73. Bates CF, Carnes DL, del Rio CE. Longitudinal sealing ability of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod.* 1996;22(11):575-8.
74. Torabinejad M, Smith PW, Kettering JD, Pitt Ford TR. Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. *J Endod.* 1995;21(6):295-9.
75. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Antibacterial effects of some root end filling materials. *J Endod.* 1995;21(8):403-6.
76. Mohammadi Z, Modaresi J, Yazdizadeh M. Evaluation of the antifungal effects of mineral trioxide aggregate materials. *Aust Endod J.* 2006;32(3):120-2.
77. 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.
78. Song M, Yue W, Kim S, Kim W, Kim Y, Kim JW, et al. The effect of human blood on the setting and surface micro-hardness of calcium silicate cements. *Clin Oral Investig.* 2016;20(8):1997-2005.
79. Ustun Y, Topcuoglu HS, Akpek F, Aslan T. The effect of blood contamination on



- dislocation resistance of different endodontic reparative materials. *J Oral Sci.* 2015;57(3):185-90.
80. Gandolfi MG, Taddei P, Modena E, Siboni F, Prati C. Biointeractivity-related versus chemi/physisorption-related apatite precursor-forming ability of current root end filling materials. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2013;101(7):1107-23.
81. Niu LN, Jiao K, Wang TD, Zhang W, Camilleri J, Bergeron BE, et al. A review of the bioactivity of hydraulic calcium silicate cements. *J Dent.* 2014;42(5):517-33.
82. Kim JR, Nosrat A, Fouad AF. Interfacial characteristics of Biodentine and MTA with dentine in simulated body fluid. *J Dent.* 2015;43(2):241-7.
83. Kokubo T, Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials.* 2006;27(15):2907-15.
84. Maeda H, Nakano T, Tomokiyo A, Fujii S, Wada N, Monnouchi S, et al. Mineral trioxide aggregate induces bone morphogenetic protein-2 expression and calcification in human periodontal ligament cells. *J Endod.* 2010;36(4):647-52.
85. Badr AE. Marginal adaptation and cytotoxicity of bone cement compared with amalgam and mineral trioxide aggregate as root-end filling materials. *J Endod.* 2010;36(6):1056-60.
86. Sepet E, Pinar A, Ilhan B, Ulukapi I, Bilir A, Tuna S. Cytotoxic effects of calcium hydroxide and mineral trioxide aggregate on 3T3 fibroblast cell line in vitro. *Quintessence Int.* 2009;40(8):e55-61.
87. Jaberiansari Z, Naderi S, Tabatabaei FS. Cytotoxic effects of various mineral trioxide aggregate formulations, calcium-enriched mixture and a new cement on human pulp stem cells. *Iran Endod J.* 2014;9(4):271-6.
88. Ghoddusi J, Tavakkol Afshari J, Donyavi Z, Brook A, Disfani R, Esmaeelzadeh M. Cytotoxic effect of a new endodontic cement and mineral trioxide aggregate on L929 line culture. *Iran Endod J.* 2008;3(2):17-23.
89. E AS, Farhadmollashahi N, Ghotbi F, Karkeabadi H, Havaei R. Cytotoxic effects of mineral trioxide aggregate, calcium enriched mixture cement, Biodentine and octacalcium phosphate on human gingival fibroblasts. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.*



2016;10(2):75-80.

90. de Souza Costa CA, Duarte PT, de Souza PP, Giro EM, Hebling J. Cytotoxic effects and pulpal response caused by a mineral trioxide aggregate formulation and calcium hydroxide. *Am J Dent.* 2008;21(4):255-61.
91. Batur YB, Acar G, Yalcin Y, Dindar S, Sancakli H, Erdemir U. The cytotoxic evaluation of mineral trioxide aggregate and bioaggregate in the subcutaneous connective tissue of rats. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2013;18(4):e745-51.
92. Wimonchit S, Timpawat S, Vongsavan N. A comparison of techniques for assessment of coronal dye leakage. *J Endod.* 2002;28(1):1-4.
93. Spangberg LS, Acierno TG, Yongbum Cha B. Influence of entrapped air on the accuracy of leakage studies using dye penetration methods. *J Endod.* 1989;15(11):548-51.
94. Oliver CM, Abbott PV. Entrapped air and its effects on dye penetration of voids. *Endod Dent Traumatol.* 1991;7(3):135-8.
95. Kucukkaya Eren S, Parashos P. Adaptation of mineral trioxide aggregate to dentine walls compared with other root-end filling materials: A systematic review. *Aust Endod J.* 2018.
96. Torabinejad M, Parirokh M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--part II: leakage and biocompatibility investigations. *J Endod.* 2010;36(2):190-202.
97. Han L, Okiji T. Bioactivity evaluation of three calcium silicate-based endodontic materials. *Int Endod J.* 2013;46(9):808-14.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก 1 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย Two way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 2-60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	52.477 <sup>a</sup>	11	4.771	2.976	.002
Intercept	571.402	1	571.402	356.480	.000
Ratio	11.339	2	5.670	3.537	.033
days	8.213	3	2.738	1.708	.171
Ratio * days	32.925	6	5.487	3.423	.004
Error	153.878	96	1.603		
Total	777.757	108			
Corrected Total	206.355	107			

a. R Squared = .254 (Adjusted R Squared = .169)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	-.6070417	.29841244	.110	-1.3174443	.1033609
	less	.1392983	.29841244	.887	-.5711043	.8497009
much	normal	.6070417	.29841244	.110	-.1033609	1.3174443
	less	.7463400*	.29841244	.037	.0359374	1.4567426
less	normal	-.1392983	.29841244	.887	-.8497009	.5711043
	much	-.7463400*	.29841244	.037	-1.4567426	-.0359374

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.603.

\*. The mean difference is significant at the

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) days	(J) days	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2d	7d	.5554778	.34457701	.377	-.3454556	1.4564111
	30	-.0204630	.34457701	1.000	-.9213963	.8804704
	60d	.5259422	.34457701	.426	-.3749911	1.4268756
7d	2d	-.5554778	.34457701	.377	-1.4564111	.3454556
	30	-.5759407	.34457701	.344	-1.4768741	.3249926
	60d	-.0295356	.34457701	1.000	-.9304689	.8713978
30	2d	.0204630	.34457701	1.000	-.8804704	.9213963
	7d	.5759407	.34457701	.344	-.3249926	1.4768741
	60d	.5464052	.34457701	.392	-.3545282	1.4473386
60d	2d	-.5259422	.34457701	.426	-1.4268756	.3749911
	7d	.0295356	.34457701	1.000	-.8713978	.9304689
	30	-.5464052	.34457701	.392	-1.4473386	.3545282

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.603.

ภาคผนวก 2 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 30 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	30.168 <sup>a</sup>	2	15.084	10.955	.000
Intercept	180.541	1	180.541	131.117	.000
Ratio	30.168	2	15.084	10.955	.000
Error	33.047	24	1.377		
Total	243.756	27			
Corrected Total	63.215	26			

a. R Squared = .477 (Adjusted R Squared = .434)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	-2.5867222*	.55316215	.000	-3.9681269	-1.2053175
	less	-1.3915444*	.55316215	.048	-2.7729492	-.0101397
much	normal	2.5867222*	.55316215	.000	1.2053175	3.9681269
	less	1.1951778	.55316215	.099	-.1862269	2.5765825
less	normal	1.3915444*	.55316215	.048	.0101397	2.7729492
	much	-1.1951778	.55316215	.099	-2.5765825	.1862269

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.377.

\*. The mean difference is significant at the



ภาคผนวก 3 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย Two way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 2-60 วันซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	190.190 <sup>a</sup>	11	17.290	11.179	.000
Intercept	817.656	1	817.656	528.675	.000
Ratio	19.822	2	9.911	6.408	.002
days	103.381	3	34.460	22.281	.000
Ratio * days	66.988	6	11.165	7.219	.000
Error	148.475	96	1.547		
Total	1156.321	108			
Corrected Total	338.665	107			

a. R Squared = .562 (Adjusted R Squared = .511)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	.2793495	.29312621	.608	-.4184686	.9771677
	less	-.7363256*	.29312621	.036	-1.4341438	-.0385074
much	normal	-.2793495	.29312621	.608	-.9771677	.4184686
	less	-1.0156751*	.29312621	.002	-1.7134933	-.3178569
less	normal	.7363256*	.29312621	.036	.0385074	1.4341438
	much	1.0156751*	.29312621	.002	.3178569	1.7134933

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.547.

\*. The mean difference is significant at the

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) days	(J) days	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2d	7d	-1.1811508*	.33847299	.004	-2.0661245	-.2961770
	30	.2460937	.33847299	.886	-.6388800	1.1310675
	60d	1.5732309*	.33847299	.000	.6882572	2.4582047
7d	2d	1.1811508*	.33847299	.004	.2961770	2.0661245
	30	1.4272445*	.33847299	.000	.5422708	2.3122183
	60d	2.7543817*	.33847299	.000	1.8694079	3.6393555
30	2d	-.2460937	.33847299	.886	-1.1310675	.6388800
	7d	-1.4272445*	.33847299	.000	-2.3122183	-.5422708
	60d	1.3271372*	.33847299	.001	.4421634	2.2121110
60d	2d	-1.5732309*	.33847299	.000	-2.4582047	-.6882572
	7d	-2.7543817*	.33847299	.000	-3.6393555	-1.8694079
	30	-1.3271372*	.33847299	.001	-2.2121110	-.4421634

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.547.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 4 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 2 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	19.834 <sup>a</sup>	2	9.917	5.200	.013
Intercept	228.807	1	228.807	119.978	.000
Ratio	19.834	2	9.917	5.200	.013
Error	45.770	24	1.907		
Total	294.410	27			
Corrected Total	65.604	26			

a. R Squared = .302 (Adjusted R Squared = .244)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	1.8622439*	.65099547	.023	.2365213	3.4879665
	less	1.7705739*	.65099547	.031	.1448513	3.3962965
much	normal	-1.8622439*	.65099547	.023	-3.4879665	-.2365213
	less	-.0916700	.65099547	.989	-1.7173926	1.5340526
less	normal	-1.7705739*	.65099547	.031	-3.3962965	-.1448513
	much	.0916700	.65099547	.989	-1.5340526	1.7173926

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.907.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 5 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 7 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41.108 <sup>a</sup>	2	20.554	10.089	.001
Intercept	452.149	1	452.149	221.935	.000
Ratio	41.108	2	20.554	10.089	.001
Error	48.895	24	2.037		
Total	542.152	27			
Corrected Total	90.003	26			

a. R Squared = .457 (Adjusted R Squared = .411)



## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	-2.0969240*	.67285458	.013	-3.7772351	-.4166129
	less	-2.9335322*	.67285458	.001	-4.6138433	-1.2532212
much	normal	2.0969240*	.67285458	.013	.4166129	3.7772351
	less	-.8366082	.67285458	.440	-2.5169193	.8437028
less	normal	2.9335322*	.67285458	.001	1.2532212	4.6138433
	much	.8366082	.67285458	.440	-.8437028	2.5169193

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 2.037.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 6 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 30 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	20.702 <sup>a</sup>	2	10.351	9.794	.001
Intercept	191.756	1	191.756	181.439	.000
Ratio	20.702	2	10.351	9.794	.001
Error	25.365	24	1.057		
Total	237.823	27			
Corrected Total	46.066	26			

a. R Squared = .449 (Adjusted R Squared = .404)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	1.1993227	.48462164	.052	-.0109167	2.4095621
	less	-.9403107	.48462164	.149	-2.1505501	.2699287
much	normal	-1.1993227	.48462164	.052	-2.4095621	.0109167
	less	-2.1396333*	.48462164	.001	-3.3498727	-.9293939
less	normal	.9403107	.48462164	.149	-.2699287	2.1505501
	much	2.1396333*	.48462164	.001	.9293939	3.3498727

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.057.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 7 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5.166 <sup>a</sup>	2	2.583	2.179	.135
Intercept	48.325	1	48.325	40.773	.000
Ratio	5.166	2	2.583	2.179	.135
Error	28.445	24	1.185		
Total	81.936	27			
Corrected Total	33.611	26			

a. R Squared = .154 (Adjusted R Squared = .083)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	.1527556	.51320665	.952	-1.1288688	1.4343799
	less	-.8420333	.51320665	.248	-2.1236577	.4395910
much	normal	-.1527556	.51320665	.952	-1.4343799	1.1288688
	less	-.9947889	.51320665	.150	-2.2764132	.2868355
less	normal	.8420333	.51320665	.248	-.4395910	2.1236577
	much	.9947889	.51320665	.150	-.2868355	2.2764132

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.185.



ภาคผนวก 8 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอในอัตราส่วนปกติ ที่ระยะเวลา 2-60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41.394 <sup>a</sup>	3	13.798	8.512	.000
Intercept	243.210	1	243.210	150.044	.000
days	41.394	3	13.798	8.512	.000
Error	51.870	32	1.621		
Total	336.474	36			
Corrected Total	93.264	35			

a. R Squared = .444 (Adjusted R Squared = .392)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) days	(J) days	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2d	7d	1.7066072*	.60017214	.037	.0805238	3.3326906
	30	1.3706957	.60017214	.123	-.2553877	2.9967790
	60d	3.0139294*	.60017214	.000	1.3878461	4.6400128
7d	2d	-1.7066072*	.60017214	.037	-3.3326906	-.0805238
	30	-.3359116	.60017214	.943	-1.9619949	1.2901718
	60d	1.3073222	.60017214	.151	-.3187612	2.9334056
30	2d	-1.3706957	.60017214	.123	-2.9967790	.2553877
	7d	.3359116	.60017214	.943	-1.2901718	1.9619949
	60d	1.6432338*	.60017214	.047	.0171504	3.2693172
60d	2d	-3.0139294*	.60017214	.000	-4.6400128	-1.3878461
	7d	-1.3073222	.60017214	.151	-2.9334056	.3187612
	30	-1.6432338*	.60017214	.047	-3.2693172	-.0171504

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.621.

\*. The mean difference is significant at the



ภาคผนวก 9 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอในอัตราส่วนชั้นที่ระยะเวลา 2-60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	63.616 <sup>a</sup>	3	21.205	11.343	.000
Intercept	400.526	1	400.526	214.256	.000
days	63.616	3	21.205	11.343	.000
Error	59.820	32	1.869		
Total	523.962	36			
Corrected Total	123.436	35			

a. R Squared = .515 (Adjusted R Squared = .470)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) days	(J) days	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2d	7d	-2.9974989*	.64452875	.000	-4.7437604	-1.2512374
	30	-1.3401889	.64452875	.182	-3.0864504	.4060726
	60d	.4013222	.64452875	.924	-1.3449393	2.1475837
7d	2d	2.9974989*	.64452875	.000	1.2512374	4.7437604
	30	1.6573100	.64452875	.068	-.0889515	3.4035715
	60d	3.3988211*	.64452875	.000	1.6525596	5.1450826
30	2d	1.3401889	.64452875	.182	-.4060726	3.0864504
	7d	-1.6573100	.64452875	.068	-3.4035715	.0889515
	60d	1.7415111	.64452875	.051	-.0047504	3.4877726
60d	2d	-.4013222	.64452875	.924	-2.1475837	1.3449393
	7d	-3.3988211*	.64452875	.000	-5.1450826	-1.6525596
	30	-1.7415111	.64452875	.051	-3.4877726	.0047504

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.869.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 10 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอในอัตราส่วนเหลว ที่ระยะเวลา 2-60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวขวาง

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	63.616 <sup>a</sup>	3	21.205	11.343	.000
Intercept	400.526	1	400.526	214.256	.000
days	63.616	3	21.205	11.343	.000
Error	59.820	32	1.869		
Total	523.962	36			
Corrected Total	123.436	35			

a. R Squared = .515 (Adjusted R Squared = .470)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) days	(J) days	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2d	7d	-2.9974989*	.64452875	.000	-4.7437604	-1.2512374
	30	-1.3401889	.64452875	.182	-3.0864504	.4060726
	60d	.4013222	.64452875	.924	-1.3449393	2.1475837
7d	2d	2.9974989*	.64452875	.000	1.2512374	4.7437604
	30	1.6573100	.64452875	.068	-.0889515	3.4035715
	60d	3.3988211*	.64452875	.000	1.6525596	5.1450826
30	2d	1.3401889	.64452875	.182	-.4060726	3.0864504
	7d	-1.6573100	.64452875	.068	-3.4035715	.0889515
	60d	1.7415111	.64452875	.051	-.0047504	3.4877726
60d	2d	-.4013222	.64452875	.924	-2.1475837	1.3449393
	7d	-3.3988211*	.64452875	.000	-5.1450826	-1.6525596
	30	-1.7415111	.64452875	.051	-3.4877726	.0047504

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.869.

\*. The mean difference is significant at the 0

ภาคผนวก 11 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุโปรรูทเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวยาว

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	16.982 <sup>a</sup>	2	8.491	11.830	.001
Intercept	19.528	1	19.528	27.207	.000
Ratio	16.982	2	8.491	11.830	.001
Error	12.920	18	.718		
Total	49.430	21			
Corrected Total	29.902	20			

a. R Squared = .568 (Adjusted R Squared = .520)

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	1.4361000*	.45285300	.014	.2803452	2.5918548
	less	2.1645286*	.45285300	.000	1.0087738	3.3202833
much	normal	-1.4361000*	.45285300	.014	-2.5918548	-.2803452
	less	.7284286	.45285300	.268	-.4273262	1.8841833
less	normal	-2.1645286*	.45285300	.000	-3.3202833	-1.0087738
	much	-.7284286	.45285300	.268	-1.8841833	.4273262

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = .718.

\*. The mean difference is significant at the

ภาคผนวก 12 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะช่องว่างด้วย one way ANOVA และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายคู่ของวัสดุเรโพรเอ็มทีเอทั้งสามอัตราส่วนที่ระยะเวลา 60 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างตามแนวยาว

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: gap

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9.932 <sup>a</sup>	2	4.966	9.545	.001
Intercept	24.780	1	24.780	47.630	.000
Ratio	9.932	2	4.966	9.545	.001
Error	9.365	18	.520		
Total	44.077	21			
Corrected Total	19.297	20			

a. R Squared = .515 (Adjusted R Squared = .461)



## Multiple Comparisons

Dependent Variable: gap

Tukey HSD

(I) Ratio	(J) Ratio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
normal	much	-1.6834286*	.38554897	.001	-2.6674125	-.6994447
	less	-.8952857	.38554897	.078	-1.8792696	.0886982
much	normal	1.6834286*	.38554897	.001	.6994447	2.6674125
	less	.7881429	.38554897	.130	-.1958410	1.7721267
less	normal	.8952857	.38554897	.078	-.0886982	1.8792696
	much	-.7881429	.38554897	.130	-1.7721267	.1958410

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = .520.

\*. The mean difference is significant at the

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พลรบ โพธิ์กำเนิด
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	ลพบุรี
วุฒิการศึกษา	หลักสูตรมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีทุ่งสง หลักสูตรทันตแพทยศาสตรบัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 95 หมู่ที่ 9 ตำบลห้วยโป่ง อำเภอ โคกสำโรง จังหวัด ลพบุรี

