



การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์

โดยใช้แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

THE BIOMIMETIC REMINERALIZATION OF HUMAN DENTINE
BY CALCIUM-SILICATE CEMENT : IN VITRO STUDY

พิมพ์กานดา มณีรัตน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การเปลี่ยนแปลงกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์

โดยการใช้แคลเซียมซิติเลทซีเมนต์ : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ



พิมพ์กานดา มณีรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE BIOMIMETIC REMINERALIZATION OF HUMAN DENTINE
BY CALCIUM-SILICATE CEMENT : IN VITRO STUDY



PIMKANDA MANEERAT

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

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์

โดยการใช้แคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ของ

พิมพ์กานดา มณีรัตน์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวិทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ เจียรพุมิ)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ เรือเอกหญิง ดร.รังสิมา
สกุลณะมรรคา)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ เหล่าศรีสิน)

ชื่อเรื่อง	การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์
	โดยการใช้แคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ
ผู้วิจัย	พิมพ์กานดา มณีรัตน์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ เจียรพุมิ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์และกลาสไอโอโนเมอร์ในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ (Biomimetic remineralization) ของเนื้อฟันของมนุษย์ โดยใช้แผ่นเนื้อฟันทั้งสิ้น 20 แผ่น ทำการละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟัน 15 แผ่นด้วย 17% EDTA จากนั้นคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับแผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม เนื้อฟันที่สัมผัสกับกลาสไอโอโนเมอร์ชนิดฟูจิไนน์ (n=5) เนื้อฟันสัมผัสกับแคลเซียมซิติเกตชนิดไบโอเดนทิน (n=5) และกลุ่มควบคุมเนื้อฟันที่ไม่มีการสัมผัสกับวัสดุ (n=5) นำวัสดุทั้ง 3 กลุ่มแช่สารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ แผ่นเนื้อฟันที่เหลือ 5 แผ่นจัดให้เป็นกลุ่มเนื้อฟันปกติ นำชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มมาหาค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน และศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์สาร ผลการศึกษาพบว่าค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันปกติมีค่ามากที่สุดตามด้วยกลุ่มแคลเซียมซิติเกต กลาสไอโอโนเมอร์ และกลุ่มควบคุมตามลำดับ โดยกลุ่มควบคุมและกลาสไอโอโนเมอร์มีค่าไม่แตกต่างกัน ลักษณะพื้นผิวพบว่ากลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์พบผลึกแร่ธาตุสะสมอย่างหนาแน่นปกคลุมทั่วพื้นผิวมากกว่ากลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ ในขณะที่กลุ่มควบคุมจะไม่พบผลึกใด ๆ ที่พื้นผิว ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุตรวจพบแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเนื้อฟันกลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ในปริมาณสูงกว่ากลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ แต่กลุ่มควบคุมไม่พบแร่ธาตุดังกล่าว ผลการศึกษารูปได้ว่าแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

คำสำคัญ : การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ, แคลเซียมซิติเกตซีเมนต์

Title	THE BIOMIMETIC REMINERALIZATION OF HUMAN DENTINE BY CALCIUM-SILICATE CEMENT : IN VITRO STUDY
Author	PIMKANDA MANEERAT
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sirichan Chiaraputt

The objective of this study is to evaluate the effects of calcium silicate based-material and glass ionomer cement on the biomimetic remineralization of demineralized human dentine. Twenty dentine discs were prepared and fifteen discs were demineralized with 17% EDTA. Ten discs were placed in close contact with the material discs of Biodentine (n=5) or Fuji IX (n=5) and then immersed in a remineralized solution for eight weeks. The five demineralized dentine without a material disc were treated as the control group. In addition, a group of normal dentine (n=5) from sound dentine as a normal group. The nanoindentation test was performed in all dentine specimens and two specimens of each group were investigated using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and scanning electron microscope (SEM). The highest elastic modulus value were observed in the normal group, followed by calcium silicate, glass ionomer, and control. There were no significant differences between the glass ionomer and the control group. In terms of SEM analysis, the calcium silicate group significantly showed the apatite crystals in the intertubular and intratubular area, while the glass ionomer found few crystals and none crystal in control group. In the EDX study, the peak of calcium and phosphorus ion of calcium silicate group were higher than glass ionomer and control group. The results of this study showed that the calcium silicate material had a higher remineralizing effect on demineralized dentine compared with glass ionomer cement.

Keyword : Biomimetic remineralization, Calcium silicate cement

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ได้ หากปราศจากคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จากอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทันตแพทย์หญิง ดร.ศิริจันทร์ เจียรพุดมิ ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ตลอดจนคณะกรรมการสอบเค้าโครงร่างปริญญานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ทุกท่าน ประกอบกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้หน่วยงาน สังกัดคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทางผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณดังกล่าวมา ณ ที่นี้

หนึ่งในขั้นตอนการทดลองนั้นได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทดสอบจากผู้เกี่ยวข้องหลายท่าน อันได้แก่ ดร.กิตติสัมพันธ์ มงคลสุทธิรัตน์ สถาบันมาตรวัดวิทยาแห่งชาติ และ ดร.ปิยนันท์ พันบุรี บริษัท เฮลมุท ฟิสเซอร์ (ไทยแลนด์) จำกัด ผู้ให้คำแนะนำเรื่องการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวระดับนาโน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญญู อยู่นิสัย ผู้ให้คำปรึกษาสถิติที่ใช้ในการวิจัย พร้อมทั้งได้รับการอำนวยความสะดวกจาก นางกนกพร สุขยานันท์ เจ้าหน้าที่คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒในการอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องขัดชิ้นงานจนสามารถทำให้งานเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ตามที่วางแผนไว้ จึงขอกล่าวแสดงความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์นี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกล่าวขอบพระคุณบิดานายประยูร มณีรัตน์ และมารดานางกานดา มณีรัตน์ ผู้ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พิมพ์กานดา มณีรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
1. ประชากรที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
3. ตัวแปรที่ศึกษา.....	4
กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	5
สมมุติฐานในการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. การใช้กลาสไฮอินเมอร์ซีเมนต์.....	6
2. แร่ธาตุในโครงสร้างพื้น	9
2.1 สมดุลการรักษาแร่ธาตุในโครงสร้างพื้น	10
2.2 ความสัมพันธ์ของเนื้อพื้นที่สูญเสียแร่ธาตุและงานทันตกรรมบูรณะ.....	11

3. การคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน.....	12
3.1 สารที่ใช้ในการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน	12
4. วัสดุเคลือบซีเมนต์ซีเมนต์ 14	
4.1 คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ	15
5. แนวคิดในการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน	20
5.1 Classical ion-based crystallization concept	20
5.2 Non classical ion-based crystallization concept	21
5.3 การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ (Biomimetic remineralization)	22
6. การประเมินผลของการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน	25
6.1 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ (Morphology) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ภายในเนื้อฟัน.....	25
6.2 คุณสมบัติความแข็งแรงของเนื้อฟัน	27
6.3. การทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงในระดับนาโน	28
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	33
วัสดุและอุปกรณ์.....	33
การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง	34
ประชากร	34
การเลือกกลุ่มตัวอย่าง	34
การเตรียมชิ้นงาน ขั้นตอนการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล	35
การเตรียมชิ้นงาน.....	35
ขั้นตอนการทดลอง	40
การเก็บรวบรวมข้อมูล	43
1. การเก็บข้อมูลจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงระดับนาโน	44

2.การเก็บข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการใช้เครื่อง	
วิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ.....	44
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	46
1.ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน	47
2.คุณสมบัติด้านลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ	48
3.การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล	54
1.สรุปผลการวิจัย.....	54
2.อภิปรายผลการวิจัย	55
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 การแบ่งระดับและแนวทางการจัดการรอยโรครอยโรคพื้นผิวนครคอปัน	7
ตาราง 2 แสดงองค์ประกอบของไบโอเดนต์	16
ตาราง 3 แสดงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	40
ตาราง 4 แสดงองค์ประกอบของสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ	42
ตาราง 5 แสดงค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของแผ่นเนื้อฟันที่ทำการทดสอบ	47



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะโครงสร้างของคอลลาเจนเมทริกซ์และบริเวณที่มีการสะสมแร่ธาตุ	10
ภาพประกอบ 2 แสดงบรรจุภัณฑ์ของ ไบโอเดนทิน	16
ภาพประกอบ 3 แสดงขั้นตอนการผสมไบโอเดนทิน	17
ภาพประกอบ 4 สมการแสดงปฏิกิริยาระหว่าง Tri-calcium silicate กับน้ำ	18
ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างลักษณะคล้ายแท่งยื่นลงไปในพื้นที่เนื้อฟันของ ไบโอเดนทิน	19
ภาพประกอบ 6 แสดงขั้นตอนการเหนียวทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุในบริเวณคอลลาเจนเมทริกซ์ในชั้นเนื้อฟัน	23
ภาพประกอบ 7 แสดงค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นก่อนและหลังการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน	28
ภาพประกอบ 8 ลักษณะกราฟพี-เอช (P-h graph)	31
ภาพประกอบ 9 แสดงแผ่นเนื้อฟันขนาด 6x6x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร	35
ภาพประกอบ 10 แสดงแบบหล่ออะคริลิกไซขนาด 3x3x1 ลูกบาศก์เซนติเมตร	36
ภาพประกอบ 11 แสดงการยึดแผ่นเนื้อฟันลงแบบหล่ออะคริลิกใสด้วยอะคริลิก	36
ภาพประกอบ 12 แสดงแบบหล่ออะคริลิกใสสำหรับขึ้นรูปแผ่นวัสดุ	38
ภาพประกอบ 13 แสดงสไลด์แก้วเพื่อกำจัดฟองอากาศขณะขึ้นรูปแผ่นวัสดุ	39
ภาพประกอบ 14 แสดงการวางแผ่นเนื้อฟันให้สัมผัสกับแผ่นวัสดุทั้งหมด	41
ภาพประกอบ 15 แสดงกล่องเก็บสารที่มีขนาดพอดีกับแบบหล่ออะคริลิกใสเพื่อกองตำแหน่ง	41
ภาพประกอบ 16 แสดงขั้นตอนการทดลองทั้งหมด	43
ภาพประกอบ 17 แสดงค่าเฉลี่ยมอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันทั้ง 4 กลุ่ม	48
ภาพประกอบ 18 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน กลุ่ม Normal และกลุ่ม Control	49

ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน กลุ่ม Fuji IX และ กลุ่ม Biodentine.....	50
ภาพประกอบ 20 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Normal.....	51
ภาพประกอบ 21 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Control.....	51
ภาพประกอบ 22 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Fuji IX.....	52
ภาพประกอบ 23 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Biodentine	53
ภาพประกอบ 24 แสดงภาพชิ้นงานภายใต้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	59



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่แนะนำให้ใช้บูรณะรอยโรคฟันผุบริเวณรากฟันในกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุ⁽¹⁾ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์สามารถส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ (Remineralization) ได้และมีความแนบสนิทกับโพรงฟันอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ยังพบข้อด้อยบางประการเช่นมีการรื้อซึมบริเวณขอบรอยต่อของวัสดุ การติดตามผลการรักษาทางคลินิกของการบูรณะบริเวณคอฟันด้วยวัสดุประเภทเรซิน คอมโพสิตและกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์พบว่าเมื่อผ่านการใช้งานจริงในช่องปากกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ยังมีข้อด้อยในเรื่องของการคงอยู่ของวัสดุในช่องปาก (Retention) การเปลี่ยนสีบริเวณขอบของวัสดุ (Marginal discoloration) และความแนบสนิทบริเวณขอบของวัสดุ (Marginal adaption)⁽²⁾ การศึกษาการรื้อซึมของวัสดุและเนื้อฟันด้วยการแทรกซึมของซิลเวอร์ไนเตรตท เปรียบเทียบวัสดุ 2 ชนิดคือ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ (Calcium silicate cement) อันได้แก่ไบโอเดนทีน (Biodentine™) และกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟูจิทูแอลซี (Fuji II LC, GC, Tokyo, Japan) พบว่าการรื้อซึมบริเวณผนังด้านเหงือก (Gingival wall) ในโพรงฟันชนิดคลาสทู (Class II) กลุ่มที่อุดด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีระดับการรื้อซึมน้อยกว่ากลุ่มที่อุดด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์⁽³⁾ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีความแนบสนิทกับเนื้อฟันได้เป็นอย่างดีทั้งที่ไม่ได้มีการเพิ่มขั้นตอนการทำงานแต่อย่างใด รวมถึงไม่ต้องการการกรอแต่งโพรงฟันในลักษณะพิเศษ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้อธิบายความเป็นไปได้ว่าเป็นเพราะวัสดุไตรแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถกระตุ้นการสร้างผลึกอะพาไทต์⁽⁴⁾ (Apatite crystal) ได้ ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้วัสดุถูกทำลายจากสภาวะแวดล้อม จึงเป็นผลให้ไบโอเดนทีนมีความแนบสนิทที่ดีกับเนื้อฟันได้ดีกว่าฟูจิทูแอลซี

ในระยะหลังวัสดุเรซินคอมโพสิตแข็งได้รับความนิยมในการอุดรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันมากยิ่งขึ้น แต่วัสดุเรซินคอมโพสิตยังเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกระตุ้นให้เนื้อฟันเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาวัดวัสดุที่เป็นทางเลือกในการบูรณะรอยโรคบริเวณคอฟันในผู้สูงอายุได้เป็นอย่างดีไม่ด้อยไปกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

กระบวนการละลายแร่ธาตุ (Demineralization) และการคืนกลับแร่ธาตุเกิดในเนื้อเยื่อแข็งที่มีการสะสมแร่ธาตุทั้งในส่วนโครงสร้างฟันและกระดูก เมื่อเนื้อฟันสัมผัสกรดไม่ว่าจะเป็นกรดที่มาจากการหมักของแบคทีเรียหรือกรดที่มาจากการปรับสภาพผิวฟันก่อนบูรณะด้วยวัสดุเรซิน

กรดจะเข้าไปทำลายส่วนที่เป็นอินทรีย์สาร (Inorganic component) ในเนื้อฟัน โดยจะละลายแร่ธาตุที่อยู่ในโครงสร้างเนื้อฟันออกก่อน จากนั้นชั้นคอลลาเจนเมทริกซ์ (Collagen matrix) ที่เหลือจะถูกทำลายตามมา เมื่อการดำเนินโรคมาถึงขั้นนี้จะทำให้เนื้อฟันถูกทำลายอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างฟันบริเวณที่โดนกรดอ่อนแอลง⁽⁵⁾ การมีเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุ (Demineralized dentine) มีความเกี่ยวข้องต่องานทันตกรรมบูรณะบางประการดังนี้ ในขั้นตอนของการใช้สารยึดติดทำให้ชั้นไฮบริด (Hybrid layers) ที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์จากการที่มอนอเมอร์ของเรซินไม่สามารถแทรกซึมลงไปตลอดความลึกของเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุส่งผลให้ความคงทนของระบบสารยึดติด (Bond durability) แย่ลง⁽⁶⁾ ในขั้นตอนของการกำจัดรอยผุที่สามารถเหลือชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries-affected dentine) ไว้ได้เนื้อฟันบริเวณนี้จะมีปริมาณแร่ธาตุเหลืออยู่บางส่วนอย่างกระจายกระจาย ส่งผลให้การยึดติดของสารยึดติดกับเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุมีประสิทธิภาพแย่กว่าเนื้อฟันที่ปกติ⁽⁷⁾ ดังนั้นการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุให้กับเนื้อฟันมีประโยชน์หลายประการ ประการแรกคือช่วยลดการลุกลามของฟันผุ และประการที่สองจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดติดทั้งในแง่เพิ่มความคงทนของระบบสารยึดติดและเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุได้อีกด้วย

ในปัจจุบันในการคืนกลับแร่ธาตุของชั้นเนื้อฟันมีความซับซ้อนและยังไม่เป็นข้อสรุปได้ชัดเจนมากนัก โดยพบว่ามีหลายแนวคิดในการพิจารณาเช่น แนวคิดเชื่อว่าการคืนกลับแร่ธาตุจะเกิดขึ้นด้วยการสร้างผลึกอะพาไทต์ ล้อมรอบผลึกแร่ธาตุที่มีอยู่เดิมเรียก “Classical ion-based crystallization concept” กระบวนการนี้จะเกิดเมื่อเนื้อฟันถูกละลายแร่ธาตุออกเพียงบางส่วน (Partially-demineralized dentine) และแนวคิด Non classical ion-based crystallization concept เชื่อว่าการคืนกลับแร่ธาตุไม่ได้ใช้หลักการของการตกตะกอนคืนแร่ธาตुरอบ ๆ ผลึกของแร่ธาตุเดิม แต่จะอาศัยบทบาทการทำงานของสารที่สังเคราะห์ขึ้นแทนโปรตีนที่อยู่ในเนื้อฟัน ในระยะหลังได้มีการค้นพบอีกแนวคิดที่น่าสนใจคือการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ (Biomimetic remineralization) เป็นวิธีที่สามารถทำให้เนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด (Completely-demineralized dentine) เกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ นอกจากนี้แร่ธาตุที่เกิดขึ้นมีระดับการคืนกลับแร่ธาตุดีกว่าวิธีอื่น⁽⁸⁾

สารที่ได้รับความนิยมในการศึกษาการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ คือการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติกระตุ้นให้เนื้อเยื่อมีการตอบสนองทางชีวภาพ (Bioactive) ดังเช่นวัสดุประเภทแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ วัสดุประเภทนี้เมื่อเกิดปฏิกิริยาก่อตัวจะมีการปล่อยไอออนของ Ca^{2+} และ OH^- ซึ่งเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีส่วนประกอบของฟอสเฟตจะเกิดการสร้างผลึกอะ

พาไทต์ขึ้นที่เนื้อฟันบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสกับวัสดุ⁽⁹⁾ ผลึกอะพาไทต์ใหม่นี้มีประโยชน์ในการช่วยลดรอยร้าวซึมของวัสดุและเนื้อฟัน สามารถป้องกันการถูกย่อยสลายจากเอนไซม์ภายในเซลล์ได้

ไบโอเดนทีนจัดเป็นวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ถูกจำหน่ายในท้องตลาดในปี ค.ศ. 2011 มีข้อดีคือใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นกว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ๆ โดยทางบริษัทระบุว่า ใช้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพียง 12 นาที นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาให้ไบโอเดนทีนมีความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้น ทำให้สามารถนำมางานใช้ได้หลากหลายมากกว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ๆ

การคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาตินั้น ไม่สามารถใช้ได้กับสารที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุประเภทใช้เฉพาะที่⁽¹⁰⁾ เนื่องด้วยข้อจำกัดบางประการ ในระยะหลังนักวิจัยจึงเชื่อว่าวิธีที่จะสามารถนำความรู้เรื่องการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันด้วยแนวคิดนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์และใกล้เคียงกับสถานการณ์ทางคลินิกมากที่สุดคือการนำมาใช้ในรูปแบบของการเป็นวัสดุบูรณะโพรงฟันหรือสารยึดติดทาที่ผิวฟันโดยตรง⁽⁶⁾

แม้ว่าวิธีการศึกษาประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันในปัจจุบันที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการประเมินปริมาณแร่ธาตุโดยรวมที่อยู่ในโครงสร้างฟันด้วยเทคนิคต่าง ๆ ⁽¹¹⁾ Bertassoni LE. และคณะในปี ค.ศ. 2009 กลับพบว่าการศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุที่มีประสิทธิภาพนั้น ควรจะต้องศึกษาคุณสมบัติทางกลของเนื้อฟัน (Mechanical properties) เนื่องจากการคืนกลับแร่ธาตุให้โครงสร้างฟันมุ่งหวังเพื่อให้เนื้อฟันส่วนนั้นกลับมามีคุณภาพดี (Quality of dentine) มีความแข็งแรงสามารถทำหน้ารองรับแรงบดเคี้ยวได้⁽⁵⁾ นอกจากนี้ยังพบว่าการศึกษาคุณสมบัติทางกลเป็นวิธีที่ให้ข้อมูลเสมือนเป็นการประมวลผลรวมของทุกปัจจัย ทั้งในแง่สัดส่วนและปริมาณองค์ประกอบแร่ธาตุที่อยู่ในคอลลาเจนเมทริกซ์ รวมไปถึงคุณภาพในการการจัดเรียงตัวของแร่ธาตุเหล่านั้นหากปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาอยู่ในเกณฑ์ดีก็จะทำให้เนื้อฟันมีความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นตามไปด้วย⁽¹²⁾ เพื่อให้การวิจัยครั้งนี้ได้ข้อมูลครบถ้วนมากยิ่งขึ้นจะยังคงมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปภายในเนื้อฟันด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) และมีการศึกษาลักษณะพื้นผิวเนื้อฟันด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์และกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันของมนุษย์ที่มีการจำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด พิจารณาจากคุณสมบัติ 3 ประการดังนี้ คุณสมบัติ

ทางกลของเนื้อฟันซึ่งหมายถึงค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น คุณสมบัติด้านลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน และองค์ประกอบของแร่ธาตุบนผิวเนื้อฟัน

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาแนวคิดการนำวัสดุในกลุ่มวัสดุเคลือบซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับโพรงประสาทฟันและมีการใช้งานในด้านทันตกรรมเอนโดดอนต์อย่างต่อเนื่อง มาใช้เป็นวัสดุบูรณะในผู้ป่วยกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูงในการเกิดรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟัน เช่นกลุ่มผู้สูงอายุที่มีรอยโรคฟันผุเกิดขึ้นได้ง่าย โดยสนใจศึกษาความสามารถส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุของวัสดุเคลือบซีเมนต์ต่อเนื้อฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุโดยใช้หลักการคืนกลับแร่ธาตุแบบวิธีลอกเลียนการคืนแร่ธาตุในฟันธรรมชาติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการเลือกวัสดุบูรณะรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันของผู้ป่วยสูงอายุ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ประชากรที่ใช้ในการวิจัย

ใช้ฟันซี่กรามแท้ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ที่ไม่มีรอยผุ รอยสึก และไม่มีการบูรณะใด ๆ

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

แบ่งการทดลองออกเป็น กลุ่มทดลอง และกลุ่มข้อมูลอ้างอิง

2.1 กลุ่มทดลอง กำหนดให้ทดสอบจากแผ่นเนื้อฟัน (dentine disc) ที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ ทั้งหมด 3 กลุ่ม

2.1.1. แผ่นเนื้อฟันที่สัมผัสกับกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ 1 ชนิด คือ เรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูจิไนน์ Fuji IX GP EXTRA® CAPSULE (GC, Tokyo, Japan)

2.1.2. แผ่นเนื้อฟันที่สัมผัสกับเคลือบซีเมนต์ 1 ชนิด คือ ไบโอเดนทีน (Septodont, Saint-Maur-des-Fosses, France)

2.1.3. แผ่นเนื้อฟัน ที่ไม่มีการสัมผัสกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ

2.2 กลุ่มข้อมูลอ้างอิง ทดสอบจากแผ่นเนื้อฟัน ที่ไม่ผ่านการใช้สารเคมีใด ๆ ซึ่งเป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะทั่วไปของเนื้อฟันมนุษย์

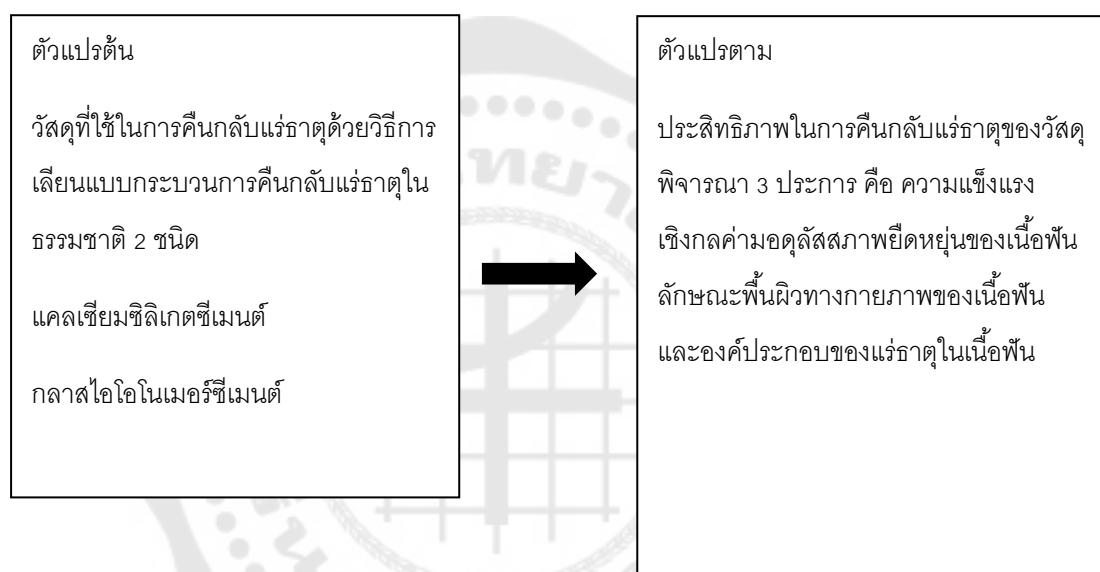
3. ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ ได้แก่ วัสดุที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ 2 ชนิด

2. ตัวแปรตาม ได้แก่ คุณสมบัติ 3 ด้านของเนื้อพื้ที่เปลี่ยนแปลง

3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ ความหนาของชิ้นงาน ปริมาณของวัสดุที่ใช้ น้ำหนักของแผ่นวัสดุ การสัมผัสเพื่อนขณะทดสอบ ความเรียบและขนานของชิ้นงาน สารละลายอิมมัลชันที่ใช้ในการทดลอง

กรอบแนวคิดในงานวิจัย



สมมุติฐานในการวิจัย

แคลเซียมซิติเลทซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อพื้ของมนุษย์ที่จำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

H_0 ; แคลเซียมซิติเลทซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อพื้ของมนุษย์ที่จำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดได้ไม่แตกต่างจากกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

H_1 ; แคลเซียมซิติเลทซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อพื้ของมนุษย์ที่จำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การใช้กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์
2. แร่ธาตุในโครงสร้างฟัน
3. การคืนกลับแร่ธาตุในโครงสร้างฟัน
4. แนวคิดในการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน
5. วัสดุเคลือบซีลิลิเกตซีเมนต์
6. การประเมินผลของการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

1. การใช้กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

หลักการบูรณะรอยโรคฟันผุบริเวณรากฟันในผู้สูงอายุมีความยุ่งยากบางประการเนื่องจากผู้สูงอายุมีความเสี่ยงในการเกิดรอยผุซ้ำได้วัสดุบูรณะเดิมได้มากกว่าการเกิดรอยผุที่เกิดขึ้นใหม่⁽¹⁾ รอยโรคส่วนมากมีทั้งส่วนที่อยู่เหนือเหงือกและส่วนที่อยู่ใต้เหงือก ประกอบกับรอยโรคอยู่ในบริเวณที่ยากแก่การเข้าทำงานไม่สามารถกันน้ำลายได้จึงส่งผลต่อการเลือกใช้วัสดุบูรณะ Billings RT. และคณะในปี ค.ศ. 1985 ได้แบ่งรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันเป็น 5 ระดับดังรายละเอียดต่อไปนี้ตาราง 1⁽²⁾

ตาราง 1 การแบ่งระดับและแนวทางการจัดการรอยโรคพื้นผิวบริเวณคอฟัน

ลักษณะรอยโรค	แนวทางการจัดการ
สีขาวหรือน้ำตาลอ่อน พื้นผิวฟันเรียบ	ฟลูออไรด์เฉพาะที่ร่วมกับสาร ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ
สีน้ำตาลอ่อน ที่ระดับความลึก 0.5-1 mm.	กรอ แต่ง ขอบ ข ของ รอย โรค , ฟลูออไรด์
น้ำตาลเข้ม ที่ระดับความลึกมากกว่า 1 mm	บูรณะด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์
น้ำตาลดำ ที่ระดับความลึกทะลุโพรงประสาท ฟัน	รักษารากฟัน ถอนฟัน

ที่ ม า : Billings RJ BL, Kaster AG. Contemporary treatment strategies for root surface dental caries. Gerodontology. 1985; 1(1): 20-7.

จะเห็นได้ว่าในอดีตกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่แนะนำให้ใช้บูรณะรอยโรคพื้นผิวบริเวณรากฟันทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีคือ มีความสามารถในการยึดติดกับโครงสร้างฟันทำให้ไม่จำเป็นต้องกรอโพรงฟันให้มีขนาดใหญ่ วัสดุสามารถส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุได้ เทคนิคในการใช้งานมีความซับซ้อนน้อยกว่าวัสดุประเภทเรซินคอมโพสิต ในช่วงระยะการติดตามผลการรักษามักจะมีการแนะนำให้ใช้สารป้องกันฟันผุหลายประเภทเช่น ฟลูออไรด์ทั้งในรูปแบบยาสีฟันและน้ำยาบ้วนปาก, สารประเภทประเภทเคซีนฟอสโฟเปปไทด์ อะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟต (Casein phosphopeptide amorphous calcium phosphate, CPP- ACP)

โดยแล้วสรุปแนวทางการจัดการรอยโรคพื้นผิวในผู้สูงอายุคือการพยายามทำให้ระดับแร่ธาตุในโครงสร้างฟันอยู่ในภาวะที่ไม่เกิดพยาธิสภาพ ด้วยการใช้น้ำยาที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุทั้งในแง่ของการเลือกวัสดุบูรณะ และการดูแลติดตามผลการรักษา

อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Namgung CR และคณะในปี ค.ศ.2013 ติดตามผลการรักษาทางคลินิกของการบูรณะบริเวณคอฟันด้วยวัสดุประเภทเรซินคอมโพสิตและกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นระยะเวลา 1 เดือน ถึง 22 ปี พบว่าสาเหตุที่ทำให้ผลการรักษาล้มเหลวคือ 82.2 เปอร์เซ็นต์มาจากวัสดุหลุดออกจากโพรงฟัน และ 17.8 เปอร์เซ็นต์มาจากการเกิดรอยผุซ้ำได้ วัสดุนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อผ่านการใช้งานจริงในช่องปากเรซินคอมโพสิตให้ผลทางคลินิกดีกว่า

กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ในหลายแง่มุม ทั้งด้านการคงอยู่ของวัสดุในช่องปาก การเปลี่ยนสีบริเวณขอบของวัสดุ และความแนบสนิทบริเวณขอบของวัสดุ⁽²⁾

การรั่วซึมบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุบูรณะและเนื้อฟันมีบทบาทสำคัญ 2 ประการ ประการแรกคือการเกิดอาการเสียวฟันหลังการบูรณะ ประการต่อมาคือการเกิดรอยผุซ้ำได้วัสดุ ซึ่งล้วนส่งผลให้เกิดความล้มเหลวของวัสดุบูรณะได้ทั้งสิ้น ดังนั้นความแนบสนิทของวัสดุและโพรงฟันจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาไม่ว่าจะใช้วัสดุบูรณะชนิดใด⁽¹³⁾ มีการศึกษาความแนบสนิทของวัสดุและเนื้อฟันด้วยการแทรกซึมของซิลเวอร์ไนเตรตท เปรียบเทียบวัสดุ 2 ชนิดคือ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทิน และกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออโรแอลซี ในการบูรณะโพรงฟันชนิดคลาสสิก การทดลองนี้กำหนดให้ขอบด้านประชิดอยู่ต่ำกว่าบริเวณรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน ซึ่งถือเป็นบริเวณที่มีเฉพาะเนื้อฟันในส่วนรากฟันทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่า การรั่วซึมบริเวณผนังด้านเหงือก ในโพรงฟันชนิดคลาสสิก กลุ่มที่อุดด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีระดับการรั่วซึมน้อยกว่ากลุ่มที่อุดด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์พบว่า มีชิ้นงานที่ไม่พบการซึมผ่านของซิลเวอร์ไนเตรตท จำนวน 3 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 30 ในขณะที่กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ มีการรั่วซึมเกิดขึ้นในชิ้นงานทุกชิ้นคิดเป็นร้อยละ 100⁽³⁾ อีกทั้งในการทดลองนี้ยังได้มีการศึกษาวิธีการปรับสภาพโพรงฟันก่อนอุดแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ด้วยสารยัดติดชนิดเซล์ฟเอท (Self etch) และชนิดโทเทิลเอท (Total etch) พบว่าการใช้สารยัดติดร่วมด้วยไม่ได้ส่งผลต่อระดับการรั่วซึมของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ จากการทดลองนี้จึงสรุปว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความแนบสนิทกับโพรงฟันได้ดี ไม่ด้อยไปกว่าวัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีความแนบสนิทกับเนื้อฟันได้เป็นอย่างดีแม้ว่าจะไม่ได้มีการเพิ่มขั้นตอนการทำงานแต่อย่างใด ทั้งในด้านปรับสภาพเนื้อฟัน การกรอแต่งโพรงฟัน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้อธิบายความเป็นไปได้ว่าเป็นเพราะวัสดุไตรแคลเซียมซีเมนต์ สามารถกระตุ้นการสร้างผลึกอะพาไทต์ได้เมื่อนำวัสดุมาแช่ในน้ำลายสังเคราะห์⁽⁴⁾ ซึ่งการสร้างชั้นผลึกอะพาไทต์ขึ้นใหม่นี้จะเป็นการป้องกันไม่ให้วัสดุถูกทำลายจากสภาวะแวดล้อมจึงเป็นผลให้แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีความแนบสนิทที่ดีกับเนื้อฟัน

กล่าวโดยสรุปในอดีตแนวทางการจัดการรอยโรคฟันผุบริเวณรากฟันในผู้สูงอายุคือการพยายามทำให้ระดับแร่ธาตุในโครงสร้างฟันอยู่ในภาวะที่ไม่เกิดพยาธิสภาพ ด้วยการใช้กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุบูรณะ แต่การบูรณะรอยโรคบริเวณรากฟันด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ยังเป็นที่ถกเถียงกันในเรื่องการยึดอยู่ของวัสดุและเรื่องของความแนบสนิทระหว่างกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และโพรงฟัน และแม้ว่าในปัจจุบันมีการแนะนำให้ใช้เรซินคอมโพสิตในการอุดฟันผุบริเวณ

คอฟันมากขึ้น แต่เรซินคอมโพสิตก็ยังเป็นวัสดุที่ไม่มีความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุให้กับโครงสร้างฟันได้

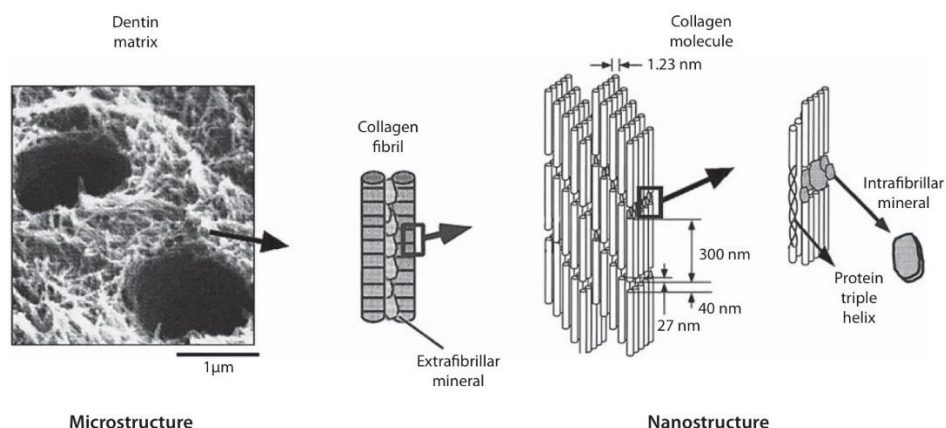
2. แร่ธาตุในโครงสร้างฟัน

เคลือบฟัน (Enamel) จัดเป็นโครงสร้างที่มีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบหลัก ประกอบด้วย ส่วนแร่ธาตุต่าง ๆ มากถึง 96 เปอร์เซ็นต์และส่วนอินทรีย์สาร (Organic matrix) และน้ำเพียง 4 เปอร์เซ็นต์ แร่ธาตุหลักที่พบในชั้นเคลือบฟันคือแคลเซียม (Ca) คิดเป็น 36.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฟอสฟอรัส (P) คิดเป็น 17.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีธาตุอื่นเช่น คาร์บอน (C) คิดเป็น 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โซเดียม (Na) คิดเป็น 0.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคลอไรด์ (Cl) คิดเป็น 0.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก^{(14),(15)} โดยชั้นเคลือบฟันเป็นเนื้อเยื่อที่มีแร่ธาตุแคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) สะสมมากที่สุดในร่างกายมนุษย์ รองลงมาคือส่วนของเนื้อฟันและกระดูกตามลำดับ

เนื้อฟัน (Dentine) เป็นเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างซับซ้อน ภายในประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนแร่ธาตุคิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยชนิดแร่ธาตุหลักคล้ายกับในชั้นเคลือบฟันคือแคลเซียมคิดเป็น 26.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฟอสฟอรัสคิดเป็น 13.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ออร์แกนิกเมทริกซ์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบส่วนมากคือคอลลาเจนชนิดที่ 1 (Collagen type I) โปรตีนชนิดต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คอลลาเจน (Non-collagenous protein) ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายให้ผลึกอะพาไทต์มาเกาะ และน้ำคิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

แร่ธาตุทั้งในส่วนเคลือบฟันและเนื้อฟันจะอยู่ในโครงรูปผลึกเรียกว่า อะพาไทต์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ในปี ค.ศ. 1960 มีการค้นพบผลึกแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมและฟอสเฟตอยู่ในรูปของแข็งไม่สามารถระบุรูปร่างการเรียงตัวได้ชัดเจนเรียกว่า Amorphous Calcium Phosphate (ACP)⁽¹⁶⁾ นอกจากนี้ในโครงสร้างเนื้อเยื่อที่มีการสะสมแร่ธาตุยังพบผลึกชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมและฟอสเฟตเช่นกันแต่มีรูปทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal) มีรูปแบบการจัดเรียงอะตอมชัดเจน เรียก ไฮดรอกซีแอพาทิต (Hydroxyapatite) มีสูตรทางเคมี $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ⁽¹⁴⁾

ผลึกอะพาไทต์ ในเนื้อฟันพบได้ 2 บริเวณคือ แร่ธาตุที่สะสมอยู่ด้านนอกเส้นใยคอลลาเจน (Extracellular mineral)⁽¹⁷⁾ และแร่ธาตุที่สะสมบริเวณด้านในเส้นใยคอลลาเจน (Intrafibrillar mineral) ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะโครงสร้างของคอลลาเจนเมทริกซ์และบริเวณที่มีการสะสมแร่ธาตุ

ที่มา : Bertassoni LE, Habelitz S, Kinney JH, Marshall SJ, Marshall Jr GW. Biomechanical Perspective on the Remineralization of Dentin. Caries Research. 2009;43(1):70-7.⁽⁵⁾

พบว่าแร่ธาตุบริเวณภายในเส้นใยคอลลาเจน มีบทบาทต่อการสร้างอะพาไทต์มากกว่า โดยพบว่าภายหลังการทำให้เนื้อฟันมีการละลายแร่ธาตุออกบางส่วน แร่ธาตุส่วนที่เหลืออยู่ภายในเส้นใยคอลลาเจน อาจจะเป็นแหล่งแกนกลางนิวเคลียสที่มีการสะสมแร่ธาตุและเป็นบริเวณเริ่มต้นให้สามารถเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ดี⁽¹⁸⁾

2.1 สมดุลการรักษาแร่ธาตุในโครงสร้างฟัน

กระบวนการละลายแร่ธาตุและการคืนกลับแร่ธาตุ เกิดในเนื้อเยื่อแข็งที่มีการสะสมแร่ธาตุทั้งในส่วนโครงสร้างฟันและกระดูกของมนุษย์ กระบวนการนี้สามารถผันแปรได้ตลอดเวลา เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างกระบวนการทั้งสอง โดยหากกระบวนการละลายแร่ธาตุมีมากกว่า การคืนกลับแร่ธาตุ จะเกิดพยาธิสภาพขึ้น ในการเกิดฟันผุระยะแรกเริ่มแบคทีเรียเมื่อได้รับอาหารประเภทน้ำตาลจะมีการผลิตกรดออกมา⁽⁵⁾ กรดจะแทรกซึมเข้าสู่ชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟันตามลำดับ เมื่อเนื้อฟันสัมผัสกรดไม่ว่าจะเป็นกรดที่มาจากการหมักของแบคทีเรียหรือกรดจากสภาวะแวดล้อม ความเป็นกรดในช่องปากจะสูงขึ้นเมื่อ pH มีค่าลดลงถึงค่าวิกฤต pH 5.5 กรดจะเข้าไปทำลายส่วนที่เป็นอินทรีย์สาร โดยจะละลายแร่ธาตุ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ออกจากโครงสร้างฟันออกก่อนและเหลือส่วนที่เป็นอินทรีย์สารคอลลาเจนเมทริกซ์ไว้ จากนั้นชั้นคอลลาเจนเมทริกซ์ที่เหลือจะถูกทำลายตามมา เมื่อการดำเนินโรคมาถึงขั้นนี้จะทำให้เนื้อฟันถูกทำลายอย่างรวดเร็วส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างฟันบริเวณที่โดนกรดอ่อนแอลง⁽⁵⁾ และเมื่อเวลาผ่านไปน้ำลายซึ่งทำหน้าที่ปรับความเป็นกรดต่างในช่องปากจะปรับให้ pH กลับขึ้นมามาอยู่

ในภาวะมากกว่าค่าวิกฤตจะเกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุขึ้นโดยแคลเซียมไอออน, ฟอสฟอรัสไอออน, ฟลูออไรด์ไอออน (F⁻) จากน้ำลายจะมาสะสมบนฟันเกิดเป็นผลึกอะพาไทต์ขึ้น การเกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุนี้เมื่อนำมาจำลองการทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องทำให้เนื้อฟันถูกล้อมด้วยสารละลายที่อิ่มตัวด้วยไอออนที่เป็นองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งหมายถึงแคลเซียมและฟอสฟอรัส การคืนกลับแร่ธาตุจึงเกิดขึ้นได้

2.2 ความสัมพันธ์ของเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุและงานทันตกรรมบูรณะ

เมื่อเนื้อฟันสัมผัสกรดจะทำให้เนื้อฟันส่วนนั้นมีการละลายแร่ธาตุออกทำให้เนื้อฟันส่วนนั้นสูญเสียแร่ธาตุไป การมีเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุในบริเวณต่าง ๆ จะส่งผลกระทบต่องานทันตกรรมบูรณะดังต่อไปนี้

2.2.1 เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุบริเวณใต้ชั้นสารยึดติด

การบูรณะฟันด้วยวัสดุประเภทเรซินร่วมกับการใช้สารยึดติด อาศัยการยึดติดเชิงกลเป็นหลักซึ่งได้จากการมีแท่งเรซินแทรกซึมระหว่างเส้นใยคอลลาเจนภายในเนื้อฟัน ขั้นตอนแรกในการปรับสภาพเนื้อฟันจึงมีการใช้กรดกัดผิวฟันทำให้แร่ธาตุในเนื้อฟันละลายออก โดยระดับความลึกในการละลายขึ้นกับระบบสารยึดติด ปัจจุบันการแทรกซึมของแท่งเรซินลงไป在线ใยของคอลลาเจนยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ เรซินไม่สามารถแทรกซึมในทุกบริเวณที่มีคอลลาเจนเผยแผ่ได้ โดยพบว่าระยะห่างระหว่างคอลลาเจนโมเลกุลมีค่าเพียง 1.26 – 1.33 นาโนเมตร ในขณะที่ขนาดของเรซินมอนอเมอร์โมเลกุลมีขนาด 2 นาโนเมตรซึ่งใหญ่กว่าระยะห่างระหว่างคอลลาเจนโมเลกุล⁽¹⁹⁾ ทำให้โมเลกุลของมอนอเมอร์ไม่สามารถแทรกซึมลงไปได้ในทุกบริเวณส่งผลให้ชั้นไฮบริดที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์มีส่วนคอลลาเจนที่เผยแผ่รวมอยู่ด้วย ซึ่งคอลลาเจนส่วนที่ไม่ได้ถูกเรซินมอนอเมอร์แทรกซึมเมื่อสัมผัสกับเอนไซม์จะถูกย่อยสลายได้ส่งผลให้ความคงทนของระบบสารยึดติดแย่ง การคืนกลับแร่ธาตุในคอลลาเจนบริเวณนั้นจะช่วยเพิ่มความคงทนของชั้นสารยึดติดได้⁽²⁰⁾ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีแร่ธาตุภายในโมเลกุลคอลลาเจน ช่วยป้องกันไม่ให้คอลลาเจนถูกทำลายจากสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ ทั้งอุณหภูมิ, เอนไซม์ที่อยู่ภายในเซลล์ (Endogenous enzyme), กรดที่เกิดจากการหมักอาหารประเภทน้ำตาลของแบคทีเรียและกรดที่ได้รับจากภายนอก⁽⁶⁾

2.2.2 เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุในบริเวณรอยโรคฟันผุ

Fusayama T ในปี ค.ศ. 1972 แบ่งรอยผุในชั้นเนื้อฟันออกเป็น 2 ส่วน ชั้นนอกของรอยผุ (Caries-infected dentine) เป็นชั้นที่มีการลุกลามของแบคทีเรียโครงสร้างเนื้อฟันทั้งหมดเสียสภาพซึ่งก่อนการบูรณะจำเป็นต้องกำจัดเนื้อฟันในชั้นนี้ออกทั้งหมด ถัดมาชั้นในของรอยผุคือชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries-affected dentine)⁽²¹⁾ เป็นชั้นที่ไม่

จำเป็นต้องกำจัดออกทั้งหมดก่อนการบูรณะ สามารถเหลือไว้ได้โดยเนื้อฟันบริเวณนี้จะมีปริมาณแร่ธาตุเหลืออยู่บางส่วนอย่างกระจาย มีการศึกษาพบแร่ธาตุได้ชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ ภายหลังการจำกัดรอยผุแล้ว แร่ธาตุดังกล่าวฝังอยู่ที่ระดับความลึก 100 ไมโครเมตร การยึดติดของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ มีประสิทธิภาพที่แย่กว่าเนื้อฟันที่ปกติ ทั้งนี้เป็นเพราะมีแร่ธาตุที่ไม่สามารถชะออกด้วยกรดอุดตันภายในท่อเนื้อฟัน (Dentinal tubule) มากกว่าปกติ ทำให้มีคอลลาเจนเมทริกซ์ที่โครงสร้างไม่สมบูรณ์ต่อเนื่อง⁽⁶⁾ โดยสรุปแนวคิดทันตกรรมอนุรักษ์ในปัจจุบันมีความจำเป็นต้องใช้สารยึดติดกับเนื้อฟันบริเวณรอยผุที่มีการสูญเสียแร่ธาตุไปบางส่วน (Partially-demineralized carious dentine) ดังนั้นการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุให้กับเนื้อฟันนอกจากจะช่วยลดการลุกลามของฟันผุแล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยึดติดทั้งในแง่เพิ่มความคงทนของการยึดติด และเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุได้อีกด้วย

3. การคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

3.1 สารที่ใช้ในการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน

สารที่ใช้ในการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุทั้งในชั้นเคลือบฟัน และชั้นเนื้อฟัน มีหลายชนิด โดยสารแต่ละชนิดมีกลไกในการคืนกลับแร่ธาตุที่แตกต่างกันได้แก่

3.1.1 การใช้สารฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์เป็นสารที่ได้รับการยอมรับใช้อย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันการเกิดฟันผุและส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุสู่บริเวณชั้นเคลือบฟัน กลไกการทำงานของฟลูออไรด์คือ ฟลูออไรด์ไอออนจะเข้าไปแทนที่แคลเซียมไอออนในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เกิดเป็นผลึกฟลูออโรอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) ในชั้นเคลือบฟัน ซึ่งผลึกนี้มีความคงทนต่อการกร่อนได้มากกว่าผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ทำให้ชั้นเคลือบฟันมีการสูญเสียแร่ธาตุได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟลูออไรด์ไอออนจะจับกับแคลเซียมไอออนจากโครงสร้างฟันเกิดเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) สะสมบนคราบแผ่นแบคทีเรียที่อยู่บนผิวเคลือบฟัน โดยชั้นแคลเซียมฟลูออไรด์นี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมฟลูออไรด์ โดยจะมีการปล่อยฟลูออไรด์ออกสู่น้ำลายเมื่ออยู่ในภาวะที่มีความเป็นกรด⁽²²⁾ ดังนั้นจึงเป็นการส่งเสริมให้ในน้ำลายอิมมัลชันไปด้วยสารละลายฟลูออไรด์ ช่วยส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ

3.1.2 การใช้สารประเภทเคซีนฟอสโฟเปปไทด์ อะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟต (CCP-ACP)

สารประเภทเคซีนฟอสโฟเปปไทด์ อะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟตมีกลไกการออกฤทธิ์คือเคซีนฟอสโฟเปปไทด์ อะมอร์ฟัสแคลเซียม จะทำหน้าที่เป็นแหล่งปล่อยแคลเซียมไอออน และฟอสเฟตไอออน โดยจะปล่อยไอออนทำให้ของเหลวที่อยู่ในคราบแบคทีเรียอิมมัตัวด้วยแร่ธาตุและอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางลดการละลายแร่ธาตุออกจากผิวฟัน และการมีไอออนที่มากนี้จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุในที่สุด⁽²³⁾ นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมที่สูงตลอดเวลาจะมีผลลดการเกาะตัวของแบคทีเรีย (Colonization) ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถเกาะตัวบนเยื่อเมือกน้ำลาย (Saliva pellicle) และทำให้เชื้อแบคทีเรียเกิดการตายได้⁽²⁴⁾

3.1.3 การใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

วัสดุที่มีคุณสมบัติออกฤทธิ์ทางชีวภาพหมายถึงวัสดุที่สามารถเหนี่ยวนำให้เนื้อเยื่อมีการตอบสนองทางชีวภาพเมื่อสัมผัสกับวัสดุนั้น ดังเช่นวัสดุประเภทกลาสไอโอโนเมอร์หรือ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ เมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปสัมผัสกับโครงสร้างฟันจะเกิดปฏิกิริยาบางอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างเนื้อฟันและวัสดุ ในกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เมื่อผสมและนำไปสัมผัสกับเนื้อฟันที่มีลักษณะชุ่มเล็กน้อยจะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างกัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ส่วนผงซึ่งประกอบด้วยแก้วฟลูออโรอะลูมิโนซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับส่วนเหลวซึ่งเป็นกรดโพลีอะคริลิกจะไปกระตุ้นให้ผลึกแก้วในส่วนผงมีการปล่อยไอออนหลายชนิด เช่นอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ,ฟลูออไรด์ (F^-) , แคลเซียม (Ca^{2+}) และสตรอนเทียม (Sr^{2+}) ในส่วนของเนื้อฟันจะมีการปล่อย แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) อันเนื่องมาจากกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์มีความสามารถในการกัดกร่อนผิวด้วยตนเอง (Self etching effect) ระยะนี้ระหว่างสองพื้นผิวจะมีการสร้างชั้นไอออนที่มาจากทั้งสองพื้นผิวแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งกันและกัน⁽²⁵⁾ พบว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์จะมีการปล่อยฟลูออไรด์มากที่สุด ใน 2 - 3 วันแรก และลดระดับลงอย่างรวดเร็วภายในสัปดาห์แรก หลังจากนั้นจะคงความสามารถในการปล่อยฟลูออไรด์ในปริมาณต่ำ ๆ ต่อไปได้อีกหลายสัปดาห์⁽²⁶⁾ อย่างไรก็ตาม กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์มีความสามารถเก็บสะสมฟลูออไรด์ใหม่ และปลดปล่อยฟลูออไรด์ปริมาณสูงในระยะเวลาสั้น ๆ (Burst effect) ได้อีกครั้ง⁽²⁶⁾ การปล่อยฟลูออไรด์ไอออน แคลเซียมไอออน และ สตรอนเทียม ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์จึงจัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติกระตุ้นการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันในบริเวณที่มีการสูญเสียแร่ธาตุได้

แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีความสามารถในการเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติออกฤทธิ์ทางชีวภาพเช่นกัน คือเมื่อวัสดุเกิดปฏิกิริยาก่อตัวจะมีการปล่อยไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งเมื่อสัมผัสกับสารละลายฟอสเฟตเช่น Phosphate buffered saline (PBS)

หรือฟอสเฟตในน้ำลายจะเกิดการสร้างผลึกอะพาไทต์ขึ้นที่บริเวณพื้นผิวเมื่อสัมผัสกับวัสดุ⁽⁹⁾ การเกิดผลึกนี้ในแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีประโยชน์ช่วยลดการเกิดรอยร้าวของวัสดุและเนื้อฟัน โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กระหว่างสองพื้นผิว และสามารถเกิดผลึกในส่วนของภายในเส้นใยคอลลาเจนของเนื้อฟันได้อีกด้วย นอกจากนี้ Gandolfi MG. และคณะในปี ค.ศ. 2011 ยังพบว่าการใช้แร่ธาตุแคลเซียม-ซิลิเกต (Calcium-silicate mineral) ในแบบรูปผงขนาดนาโนผสมลงในเรซินคอมโพสิตจะสามารถทำให้เรซินคอมโพสิตนั้นมีความสามารถกระตุ้นให้เนื้อฟันที่ผ่านการทำให้สูญเสียแร่ธาตุสามารถสร้างผลึกอะพาไทต์ขึ้นมาสะสมใหม่ได้อีกครั้งซึ่งเป็นการสนับสนุนความสามารถในการมีคุณสมบัติการคืนกลับแร่ธาตุทางชีวภาพของสารประกอบประเภทแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์⁽⁸⁾

4. วัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

ผลิตภัณฑ์ตัวแรกในกลุ่ม แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ที่ถูกจำหน่ายในท้องตลาดคือมินเอร์ล ไตรออกไซด์แอกริเกต (Mineral Trioxide Aggregate, MTA) ในปี ค.ศ. 1995 เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาใช้เนื่องจากคุณสมบัติที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ จึงใช้ในงานทันตกรรมเอนโดดอนต์เป็นหลัก เช่น อุดปิดปลายรากฟัน, ซ่อมแซมคลองรากฟันกรณีมีรอยทะลุบริเวณรากฟัน (Perforation), การอุดปิดปลายรากฟัน (Apexification) เป็นต้น นอกจากมินเอร์ล ไตรออกไซด์แอกริเกตแล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ๆ อีก ได้แก่ Endo CPM Sealer, MTA Angelus⁽²⁷⁾ อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้ใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างนานประมาณ 165 นาที ใน Grey MTA และ White MTA ใช้เวลาก่อตัว 70 นาที⁽²⁸⁾ ทำให้ไม่สามารถทำงานให้เสร็จได้ภายใน 1 ครั้ง ต่อมาในปี 2011 ไบโอเดนติน ถูกพัฒนาโดยคณะผู้วิจัยของบริษัท Septodont นำออกมาจำหน่ายในท้องตลาด ไบโอเดนติน มีองค์ประกอบพื้นฐานหลักคือแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ มีข้อดีคือใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นกว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ๆ วัสดุนี้มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่รวดเร็วคือประมาณ 12 นาที ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ไบโอเดนตินมีผลึกขนาดเล็ก ทำให้อาณานิคมมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้น และยังมีการใส่แคลเซียมคลอไรด์ในส่วนของน้ำเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการก่อตัว นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรงมากขึ้น เมื่อผสมก่อนการใช้งานไบโอเดนตินจะมีลักษณะจับตัวเป็นก้อนกึ่งเหนียวนำเข้าสู่โพรงฟันได้ง่าย ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ในกลุ่ม แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

ในอดีตวัสดุประเภท แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ถูกใช้ในงานทันตกรรมเอนโดดอนต์เป็นหลัก แต่เนื่องจากในปัจจุบันวัสดุประเภทนี้มีการนำมาใช้ในงานทันตกรรมบูรณะมากขึ้น เช่น การ

ทำ Direct pulp capping⁽²⁷⁾ มีการใช้มีเนอรัลไดรอกไซด์แอคทีเวตในการทำ Vital pulp therapy และใช้ ไบโอเดนทีน บำรุงทดแทนในส่วนเนื้อฟัน โดยทดแทนได้ทั้งเนื้อฟันบริเวณตัวฟัน (Coronal dentine) และเนื้อฟันบริเวณรากฟัน (Root dentine)

ทั้งนี้ทางบริษัทผู้ผลิตได้ระบุข้อบ่งชี้ในการใช้งานของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ไบโอเดนทีนไว้หลากหลายหลาย ดังนี้

กรณีใช้ในบริเวณตัวฟัน

1. ใช้ทดแทนเนื้อฟันได้อย่างถาวรเมื่อทำการบูรณะถาวรด้วยวัสดุประเภทคอมโพสิต หรือ อินเลย์/ออนเลย์

2. ใช้ในการบูรณะฟันชั่วคราวทดแทนในส่วนเนื้อฟันและเคลือบฟัน

3. ใช้บูรณะรอยผุขนาดใหญ่ หรือรอยผุลึก ในกรณีที่บูรณะด้วย Sandwich technique

4. ใช้บูรณะรอยโรคบริเวณรากฟัน

5. Pulp capping

6. Pulpotomy

กรณีใช้ในบริเวณรากฟัน

1. ซ่อมแซมรอยทะลุของรากฟัน (Root perforation)

2. ซ่อมแซมรอยทะลุบริเวณง่ามรากฟัน (Furcation perforation)

3. ซ่อมแซมรอยทะลุจากการละลายของรากฟัน (Root resorption)

4. อุดย้อนปลายรากฟัน (Retrograde filling)

5. อุดปิดปลายรากฟัน (Apexification)

คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของไบโอเดนทีนมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ส่วนประกอบของไบโอเดนทีน

ไบโอเดนทีนบรรจุในรูปแบบแคปซูลดังภาพประกอบ 2 ภายในประกอบด้วยส่วนผสมผงสีเหลืองอ่อน และส่วนเหลวแยกออกมาบรรจุในหลอดพลาสติกโดยมีองค์ประกอบดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงองค์ประกอบของไบโอเดนติน

ส่วนผง	บทบาทการทำงาน
Tri-calcium silicate : $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	Main core material
Di-calcium silicate : $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	Second core material
Calcium carbonate : CaCO_3	Filler
Zirconium dioxide : ZrO_2	Radio-opacifier
Iron oxide	Shade
ส่วนเหลว	บทบาทการทำงาน
Calcium chloride : CaCl_2	Accelerator
Hydrosoluble polymer	Water reducing agent
Water	

ที่ ม ๑ : Koubi S, Elmerini H, Koubi G, Tassery H, Camps J. Quantitative Evaluation by Glucose Diffusion of Microleakage in Aged Calcium Silicate-Based Open-Sandwich Restorations. International Journal of Dentistry. 2012⁽²⁹⁾



ภาพประกอบ 2 แสดงบรรจุภัณฑ์ของ ไบโอเดนติน

ขั้นตอนการใช้งาน คือ บีบส่วนเหลวจำนวน 5 หยด ลงในส่วนผงซึ่งอยู่ในแคปซูล จากนั้นนำแคปซูลเข้าปั่นในเครื่องผสมอมัลกัมใช้ความเร็วในการปั่น 4,000 – 4,200 รอบ/นาทีเป็นระยะเวลา 30 วินาทีดังภาพประกอบ 3

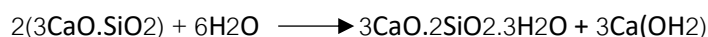


ภาพประกอบ 3 แสดงขั้นตอนการผสมไบโอเดนติน

จากนั้นจึงนำวัสดุเข้าสู่บริเวณที่ต้องการ ทางบริษัทได้ใช้นวัตกรรม The Active Biosilicate Technology ซึ่งเป็นการทำให้ไบโอเดนตินมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น กล่าวคือมีส่วนอื่นเจือปนน้อยลงซึ่งแตกต่างแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ที่จะมีส่วนประกอบของโลหะผสมอยู่ด้วย ทั้ง สารหนู ปะปน โคโรเนียม อะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามมีรายงานระบุว่า ในไบโอเดนตินก็พบโลหะเหล่านี้เช่นกัน แต่ไม่พบอะลูมิเนียม เมื่อเปรียบเทียบกับมินิออร์โธไดรอกไซด์แอคทีฟเกต พบว่ามีมินิออร์โธไดรอกไซด์แอคทีฟเกตมีการใส่สารบิสแมสออกไซด์ (Bismuth oxide) เพื่อให้วัสดุมีความทึบแสง ในขณะที่ไบโอเดนตินมีการใช้เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium oxide) แทนซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า⁽³⁰⁾

4.1.2 ปฏิกริยาก่อนตัวของไบโอเดนติน

ซีเมนต์ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับส่วนเหลวจะเกิดการก่อตัวที่คล้ายคลึงกันโดยจะเกิดปฏิกิริยา Hydration คือมีการเติมโมเลกุลของน้ำเข้าไปในโมเลกุลของสารประกอบที่ไม่อิ่มตัว น้ำจะแตกตัวเป็น H^+ กับ OH^- เข้าไปทำปฏิกิริยากับ $C=C$ ให้กลายเป็น $H-C-C-OH$ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium silicate hydrated gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ตามสมการที่แสดงภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 สมการแสดงปฏิกิริยาระหว่าง Tri-calcium silicate กับน้ำ

ที่ ม ๑ : Parirokh M, Torabinejad M. Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review—Part I: Chemical, Physical, and Antibacterial Properties. Journal of Endodontics. 2010;36(1):16-27⁽²⁷⁾

ในขณะที่มีการก่อตัววัสดุจะเกิดการละลายที่ผิวโดยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินจะตกตะกอนที่ผิวของวัสดุ และตกตะกอนบริเวณรูพรุนของวัสดุในส่วนผง ส่วนของไตรแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซึ่งชั้นนี้ไม่ยอมให้น้ำผ่าน ทำให้น้ำไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนไตรแคลเซียมซิลิเกตที่เหลือได้อีก ปฏิกิริยาการก่อตัวจึงเกิดขึ้นได้ช้าลง นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างผลึกของซีเมนต์ได้อีกด้วย

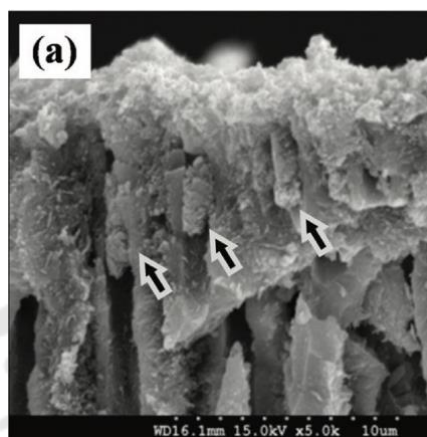
4.1.3 ระยะเวลาในการก่อตัว ของ ไบโอเดนติน

จากการทดสอบโดยใช้กิลล์มอร์นีดเดิลส์ (Gilmore needle) เป็นเข็มขนาดเล็กที่ออกแรงกดบนวัสดุ โดยเวลาในการก่อตัวจะถูกบันทึกเมื่อปลายเข็มไม่สามารถกดขึ้นงานให้เป็นรอยได้ จากการศึกษาพบว่าไบโอเดนติน มีระยะเวลาการก่อตัวเพียง 9-12 นาที.

4.1.4 รอยต่อระหว่าง ไบโอเดนติน และเนื้อฟัน Material-dentine interface

Atmeh และคณะในปี ค.ศ.2012 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษารอยต่อระหว่างเนื้อฟัน และวัสดุที่ถูกแนะนำให้ใช้ทดแทนเนื้อฟัน 2 ชนิดคือ ไบโอเดนติน, กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิมฟูจิโนน ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันบางประการ คือ ไบโอเดนตินหลังเกิดการก่อตัวจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นส่วนที่ทำให้ไบโอเดนตินมีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์หลังเกิดปฏิกิริยาก่อตัว จะเกิดการสร้างเกลือของโพลีอัลคิโนเอท (Polyalkenoate) และมีกรดทาทาริก (Tartaric acid) ซึ่งจะมีฤทธิ์เป็นกรด ผลการทดลองพบว่าเมื่อดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าไบโอเดนตินจะพบโครงสร้างลักษณะคล้ายแท่งวัสดุ (Tag - like structures) ยื่นลงไปในท่อเนื้อฟันอธิบายได้ว่าเกิดจากไบโอเดนตินที่มีความเหลวสามารถไหลลงไปในท่อเนื้อฟันได้และแข็งตัวในเวลาต่อมา จึงเกิด

โครงสร้างผลึกที่ยื่นลงไปในพื้นที่เนื้อฟันดังภาพประกอบ 5 โดยไบโอเดนตินจะเห็นโครงสร้างลักษณะคล้ายแท่งวัสดุได้ชัดเจนกว่าฟูลิน⁽³¹⁾



ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างลักษณะคล้ายแท่งยื่นลงไปในพื้นที่เนื้อฟันของ ไบโอเดนติน

ที่มา : Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement Interfacial Interaction: Calcium Silicates and Polyalkenoates. Journal of Dental Research. 2012;91(5):454-9.⁽³¹⁾

นอกจากนี้ระหว่างรอยต่อของไบโอเดนตินและเนื้อฟัน ยังพบการสร้างชั้นที่เรียกว่า “mineral infiltration zone” คือชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุภายในเนื้อฟัน เมื่อทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence-mode CLSM) ร่วมการย้อมด้วย Rhodamine-B พบว่าเนื้อฟันบริเวณรอยต่อกับวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ หรือมีการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุบางประการ จึงเป็นสาเหตุทำให้มีการสะท้อนของสีย้อมที่แตกต่างไปจากเดิม⁽³²⁾ การเปลี่ยนแปลงในชั้นนี้คล้ายกับการเกิดขึ้น Inter-diffusion zone ของสารยึดติด (Adhesive) และคล้ายคลึงกับชั้นที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange layer) ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยมีความแตกต่างกันในรายละเอียดบางประการ

Mineral infiltration zone ของไบโอเดนตินเกิดจากการที่ไบโอเดนติน มีฤทธิ์เป็นด่างจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มี pH 13 ความเป็นด่างนี้จะไปทำลายพันธะระหว่างเส้นใยของคอลลาเจน ทำให้คอลลาเจนสามารถดูดน้ำได้มากขึ้นและบวมน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำลายพันธะไอออน ระหว่างโมเลกุลของโปรตีนภายในคอลลาเจน

รวมถึงสามารถทำลายโครงสร้างตติยภูมิในโปรตีนได้⁽³²⁾ จึงอาจจะสรุปได้ว่าความเป็นต่างของไบโอเดนตินทำให้คอลลาเจนเสื่อมสภาพจึงเรียกว่ามีคุณสมบัติสามารถกัดคอลลาเจนได้ (Caustic etching) เมื่อคอลลาเจนถูกทำลายจะมีการสะสมแร่ธาตุลงมาแทนที่ซึ่งเกิดเป็นชั้น Mineral infiltration zone ชั้นนี้จะเกิดได้ดีในส่วนที่มีคอลลาเจนหรือส่วนอินทรีย์ของเนื้อฟัน จึงไม่พบชั้นนี้ในเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟัน (Peritubular dentin) เนื่องจากบริเวณนั้นมีสัดส่วนของคอลลาเจนในปริมาณที่น้อย

ในกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์แสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของสีเช่นเดียวกันแต่เกิดจากการละลายแร่ธาตุของส่วนอินทรีย์ในเนื้อฟันเมื่อสัมผัสกับความชื้นกรดของกรดโพลีอัลคาโนอิก และกรดทาทำริก ทำให้สีสามารถซึมผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุได้เช่นกัน แต่การแทรกซึมของสีย้อมในเนื้อฟันจะแทรกซึมผ่านบริเวณที่มีแร่ธาตุสะสมมากในชั้นเนื้อฟันรอบท่อเนื้อฟัน ซึ่งตรงกันข้ามกับไบโอเดนติน⁽³¹⁾

ผลึกอะพาไทต์ในเนื้อฟันพบได้ 2 บริเวณคือ แร่ธาตุที่สะสมอยู่ด้านนอกเส้นใยคอลลาเจน⁽¹⁷⁾ และแร่ธาตุที่สะสมบริเวณด้านในเส้นใยคอลลาเจน ซึ่งแร่ธาตุบริเวณภายในเส้นใยคอลลาเจนมีบทบาทต่อการสร้างอะพาไทต์มากกว่า โดยพบว่าภายหลังการทำให้เนื้อฟันมีการละลายแร่ธาตุออกบางส่วน แร่ธาตุส่วนที่เหลืออยู่ภายในเส้นใยคอลลาเจน อาจจะเป็นแหล่งแกนกลางนิวเคลียสที่มีการสะสมแร่ธาตุและเป็นบริเวณเริ่มต้นที่สามารถเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ดี⁽¹⁸⁾

5. แนวคิดในการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน

การคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันมีความซับซ้อนและมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเคลือบฟัน การคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันมีหลายแนวคิดดังนี้

5.1 Classical ion-based crystallization concept

มีการสร้างผลึกอะพาไทต์แบบเอพิแทกเซียล (Epitaxial growth) คือมีการสร้างผลึกอะพาไทต์เป็นชั้นบาง ๆ ล้อมรอบผลึกแร่ธาตุที่มีอยู่เดิม ภาวะนี้จะเกิดเมื่อเนื้อฟันถูกละลายแร่ธาตุออกเพียงบางส่วน พบได้ในบริเวณที่เนื้อฟันถูกกรดกัดจากสารยัดติดในระบบเซลฟ์เอท และเนื้อฟันบริเวณชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ โดยอะตอมของผลึกอะพาไทต์ที่สร้างขึ้นมีการเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีการจัดเรียงตัวเหมือนกับอะตอมต้นกำเนิด การศึกษาที่ผ่านมาทั้งการใช้สารประเภทฟลูออไรด์, การใช้สารยัดติดที่ดัดแปลงให้สามารถปล่อยไอออนของแคลเซียมและฟอสเฟตได้, เเรซินที่สามารถปล่อยไอออนของแคลเซียมและฟอสเฟต พบว่าเมื่อนำเนื้อฟันแช่ในสารละลายที่มีไอออนของแคลเซียมและฟอสเฟตจะเกิดการสร้างผลึกอะพาไทต์แทรก

ซึมในเนื้อฟันได้⁽³³⁾ ผู้วิจัยบางกลุ่มมีการใช้สารประเภทโมเลกุลของฟอสเฟต เช่น Sodium metaphosphate ทำหน้าที่เป็นต้นแบบของผลึกแอฟาไทต์ เหนี่ยวนำให้มีการเรียงตัวของผลึกในบริเวณช่องว่าง และเกิดการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันเป็นชั้น ๆ การศึกษาของ Fan และคณะในปี ค.ศ. 2009 ทำการศึกษาความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเคลือบฟันและเนื้อฟัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันโดยใช้สารละลายฟลูออไรด์ และเรซินดัดแปลงชนิดที่สามารถปล่อยอะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟต ในการทดลองได้มีการทำให้โครงสร้างเนื้อฟันสูญเสียแร่ธาตุโดยใช้กรดฟอสฟอริกกัด ผลการศึกษาพบว่าการคืนกลับแร่ธาตุเฉพาะในส่วนของเคลือบฟัน แต่ไม่พบการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟัน ผู้ทดลองได้อธิบายสาเหตุความแตกต่างของทั้งสองบริเวณ เป็นเพราะในชั้นเคลือบฟันจะยังคงเหลือปริมาณแร่ธาตุอยู่ค่อนข้างมากภายหลังการใช้กรดกัด แร่ธาตุที่เหลือเหล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นแกนกลางให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุบริเวณรอบ ๆ ได้ ในขณะที่ชั้นเนื้อฟันเมื่อใช้กรดกัดจะเหลือปริมาณแร่ธาตุค่อนข้างน้อยรวมถึงยังมีส่วนของคอลลาเจนที่เผยผิ่ค่อนข้างมากจึงอาจจะเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ไม่ดีเท่าชั้นเคลือบฟัน⁽³⁴⁾

งานวิจัยที่ผ่านมา^(35, 36) ศึกษาการลดความเสี่ยงในการเกิดฟันผุซ้ำได้วัสดุด้วยการใช้สารที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการศึกษาในเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่ในระยะเวลาต่อมาพบว่าเนื้อฟันส่วนที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด (Completely-demineralized dentine) ก็สามารถเกิดการคืนกลับแร่ธาตุสามารถเกิดได้เช่นกัน ดังนั้นแนวคิดนี้ก็ยังไม่สามารถอธิบายการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันได้อย่างชัดเจนมากนัก เนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดเกิดได้ในสถานการณ์ที่ใช้สารยึดติดระบบโทเทิลเอทในบริเวณเนื้อฟัน หรือพบเนื้อฟันเหล่านี้ในบริเวณส่วนบนของชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ

5.2 Non classical ion-based crystallization concept

การคืนกลับแร่ธาตุแนวคิดนี้ไม่ได้ยึดหลักการของการตกตะกอนแร่ธาตุรอบ ๆ ผลึกของแร่ธาตุเดิม แต่จะอาศัยบทบาทการทำงานของสารที่สังเคราะห์ขึ้นแทนโปรตีนต่าง ๆ ที่อยู่ในเนื้อฟัน หรือโปรตีนที่อยู่นอกเซลล์ (Extracellular matrix protein) และโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน โปรตีนดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการเกิดผลึกอะพาไทต์⁽¹¹⁾ เมื่อสภาวะแวดล้อมเอื้อต่อการคืนกลับแร่ธาตุ กล่าวคือการทำฟันถูกล้อมรอบด้วยสารละลายอิ่มตัวด้วยแร่ธาตุตั้งต้นในการสร้างอะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟต เมื่อสารตั้งต้นเหล่านั้นมาเกาะบนพื้นผิวของคอลลาเจนที่เผยผิ่ในเนื้อฟัน จะเป็นการกระตุ้นให้การคืนกลับแร่ธาตุ โดยทำให้เกิดการสร้างอะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟตแทรกซึมลงในช่องว่างระหว่างเส้นในคอลลาเจนในเนื้อฟัน การคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิด Non classical ion-based crystallization concept นี้มีหลายวิธีที่ได้รับความนิยมเช่น วิธี Bottom

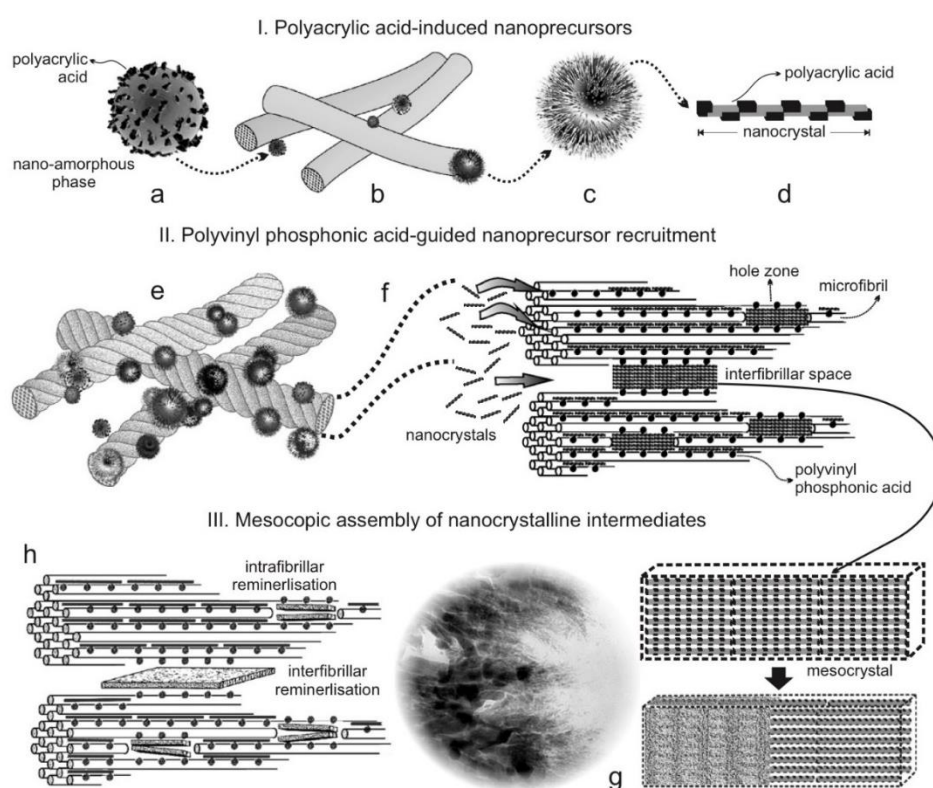
- up เป็นวิธีที่นิยมในการทดสอบสารแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ ขณะที่ซีเมนต์ก่อตัวจะมีการปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในรูปแบบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และยังมีการปล่อยซิติคอนไฮดรอกไซด์เข้าสู่ชั้นเนื้อฟัน โดยซิติกาจะทำหน้าที่เป็นตัวเหนียวนำที่สำคัญในการส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุของชั้นเนื้อฟัน ความเป็นต่างที่สูงของวัสดุประเภทแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์จะเป็นการสร้างสภาวะแวดล้อมที่ส่งเสริมการสร้างผลึกอะพาไทต์ในชั้นเนื้อฟันได้

นอกจากนี้ยังพบการคืนกลับแร่ธาตุที่น่าสนใจอีกวิธีคือแนวคิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ⁽⁸⁾ เป็นวิธีที่สามารถทำให้เนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดจากการใช้กรดของสารยึดติดระบบไทเทเลทเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ โดยระดับการคืนกลับแร่ธาตุที่เกิดขึ้นในครั้งนั้นเกิดได้มากถึง 300 ไมโครเมตร⁽⁸⁾ ซึ่งการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดนี้จัดเป็นวิธีที่สามารถทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันได้อย่างสมบูรณ์ และมีระดับการคืนกลับแร่ธาตุที่มากกว่าแนวคิดอื่น

5.3 การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ (Biomimetic remineralization)

การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติเป็นกระบวนการที่จำลองขึ้นเพื่อลอกเลียนแบบการเกิดการคืนกลับแร่ธาตุทางชีวภาพ (Biomimetalization)⁽⁶⁾ โดยนิยามการคืนกลับแร่ธาตุทางชีวภาพ หมายถึงการที่สิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์และสัตว์ สามารถปล่อยแร่ธาตุอินทรีย์ออกมาในรูปของแร่ธาตุชีวภาพ เช่น แร่ธาตุประเภทซิติกา แคลเซียมคาร์บอเนต คาร์บอเนตอะพาไทต์ในรูปผลึกต่าง ๆ การปล่อยแร่ธาตุนี้อาจเกิดได้หลายบริเวณทั้งในไซโตพลาสซึมของเซลล์ ในบริเวณเปลือกของสัตว์น้ำบางชนิด ในโครงสร้างฟันและกระดูกก็สามารถเกิดกระบวนการนี้เช่นกัน เมื่อพิจารณาในเนื้อเยื่อแข็งของมนุษย์พบว่าภายในประกอบด้วยคอลลาเจนเมทริกซ์ที่มีการเรียงตัวของแร่ธาตุคาร์บอเนตอะพาไทต์อยู่ร่วมกัน และมีส่วนของโปรตีนโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนหลายชนิด⁽⁶⁾ กระบวนการคืนกลับแร่ธาตุทางชีวภาพ ในมนุษย์มีการควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อนและเป็นลำดับขั้นตอนอาศัยโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนในการควบคุมการตกผลึกแร่ธาตุเข้าสู่บริเวณคอลลาเจนเมทริกซ์ โดยพบว่าโปรตีนที่มีบทบาทคือกรดแอสปาร์ติก (Aspartic acid) ฟอสโฟโปรตีนชนิด (Dentin matrix protein 1-DMP1) Glutamic acid rich-domain และโมเลกุลของกรดโพลีอะคริลิก (Polyacrylic acid molecule)⁽¹⁰⁾ การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติจึงเป็นการสร้างสารหรือวิธีการใดก็ตามที่สามารถลอกเลียนแบบการเกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติให้สามารถเกิดขึ้นได้เอง จึงจัดอยู่ในแนวคิดเดียวกับคืนกลับแร่ธาตุแบบ Non classical ion-based crystallization concept

การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติที่แท้จริงนั้นควรจะสามารทำได้ทำให้เกิดการสะสมแร่ธาตุทั้งบริเวณด้านนอกเส้นใยคอลลาเจน และบริเวณด้านในเส้นใยคอลลาเจน⁽⁵⁾ และจะต้องสามารถกระตุ้นให้คอลลาเจนเกิดการสะสมแร่ธาตุได้เอง⁽¹⁰⁾ การศึกษาของ Tay FR. และ Pashley DH. ในปี ค.ศ. 2008 ได้นำเสนอขั้นตอนการเหนี่ยวนำให้เนื้อฟันเกิดการคืนกลับแร่ธาตุ ด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) และสารละลายฟอสเฟต ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน⁽¹⁰⁾ ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงขั้นตอนการเหนี่ยวนำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุในบริเวณคอลลาเจนเมทริกซ์
ในชั้นเนื้อฟัน

ที่ ม า :Tay FR, Pashley DH. Guided tissue remineralisation of partially demineralised human dentine. Biomaterials. 2008;29(8):1127-37.⁽¹⁰⁾

ขั้นตอนที่ 1 nanoprecursor induction step

การเหนี่ยวนำสารตั้งต้นขนาดเล็กด้วยการใช้กรดโพลีอคริลิก (Polyacrylic acid) ทำให้สารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตระดับนาโน (Calcium phosphate nanoprecursors) อยู่ในลักษณะกึ่งเสถียร (a) และสารตั้งต้นนี้มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถแทรกผ่านคอลลาเจนเมทริกซ์เข้าไปได้ (b) ขณะนั้นสารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตระดับนาโนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกอะพาไทต์ได้ (c) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะประจุลบของกรดโพลีอคริลิกที่เข้าไปแทรกระหว่างผลึก (d) ในขั้นตอนนี้สารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตระดับนาโนที่เข้ามาภายในเส้นใยคอลลาเจน จะจับกับโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนประเภท Dentin matrix protein 1-DMP1

Dentin matrix protein 1-DMP1 มีโครงสร้างที่จับกับสารอื่น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่จับกับคอลลาเจนโมเลกุล (Collagen binding site) และบริเวณที่จับกับแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate binding site) ในสภาวะจำลองที่มีการใส่กรดโพลีอคริลิกจะเป็นเพิ่มปริมาณโครงสร้างบริเวณที่จับแคลเซียมฟอสเฟต

ขั้นตอนที่ 2 Polyvinyl phosphonic acid-guided nanoprecursor recruitment

การใช้กรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิกจะช่วยยับยั้งไม่ให้ประจุลบเคลื่อนย้ายออกจากเส้นใยคอลลาเจนทำให้สารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตระดับนาโนยังคงอยู่ในเส้นใยคอลลาเจน นอกจากนี้ยังมีบทบาทช่วยกระตุ้นให้ Dentin matrix protein 1-DMP1 มีบริเวณที่จับกับคอลลาเจนโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น โดยรวมแล้วจะเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นแคลเซียมฟอสเฟตระดับนาโนให้เกาะอยู่กับเส้นใยคอลลาเจนมากยิ่งขึ้น (e) และรวมตัวกันจนเป็นผลึกขนาดนาโน (Nanocrystals) ได้มากยิ่งขึ้น กระบวนการนี้สามารถเกิดได้ทั้งภายในและภายนอกเส้นใยคอลลาเจน (f)

ขั้นตอนที่ 3 mesoscopic assembly of nanocrystalline step

กรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิกในขั้นตอนนี้จะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้ผลึกอะพาไทต์นาโน (Apatite nanocrystals) ตัวอื่น ๆ ที่อยู่นอกเส้นใยคอลลาเจนมารวมตัวกันกลายเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (h)

ดังนั้นโดยสรุปแนวทางการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ ต้องมีองค์ประกอบครบทั้งสามประการ คอลลาเจนเมทริกซ์ที่เผยผิซึ่งได้จากเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ สารที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแคลเซียมฟอสเฟตโดยอาจจะอยู่ในรูปสารละลายหรือวัสดุที่นำมาทดสอบ และสารที่ทำหน้าที่เลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน

การศึกษาทางห้องปฏิบัติการที่ประสบความสำเร็จในการคืนกลับแร่ธาตุให้เนื้อฟันบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุและเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุภายในชั้นไฮบริด ด้วยวิธีการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาตินี้ นิยมออกแบบการทดลองให้เนื้อฟันและวัสดุที่ทดสอบถูกล้อมรอบด้วยสารละลายที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ ซึ่งในทางปฏิบัติสิ่งแวดล้อมดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงเนื่องจาก เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุบริเวณชั้นไฮบริดและเนื้อฟันบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ จะถูกบุรณะด้วยวัสดุบุรณะ ทำให้เนื้อฟันส่วนนั้นมีโอกาสสัมผัสกับสารละลายที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ได้น้อย โดยจะสัมผัสได้เพียงส่วนของรอยต่อโพรงฟันและวัสดุบุรณะที่เรียกว่า Cavo-surface margin เท่านั้น ดังนั้นการใช้สารคืนกลับแร่ธาตุประเภทใช้เฉพาะที่เช่น การใช้ฟลูออไรด์หรือสารอื่น ๆ เคลือบเฉพาะบริเวณผิวฟันด้านนอก ไม่สามารถส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้⁽¹⁰⁾ ในระยะหลังนักวิจัยจึงเชื่อว่าวิธีที่จะสามารถนำความรู้เรื่องการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันด้วยแนวคิดนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์และใกล้เคียงกับสถานการณ์ทางคลินิกมากที่สุดคือ การนำแนวคิดนี้มาใช้ในรูปแบบของวัสดุบุรณะ หรือนำมาใช้ร่วมกับสารยึดติดเพื่อให้สัมผัสกับเนื้อฟันในส่วนนั้นโดยตรง

6. การประเมินผลของการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

การศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันมีการศึกษาใน 2 แนวมุดังต่อไปนี้

6.1 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ (Morphology) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ภายในเนื้อฟัน

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างมีระบบของ Taha AA. และคณะในปี ค.ศ. 2017 เกี่ยวกับการคืนกลับแร่ธาตุของสารประเภทแก้วชีวภาพ (Bioactive glass) ในชั้นเคลือบฟัน พบว่า 3 วิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุคือ การทดสอบความแข็งผิว การทดสอบการศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ภายในด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)⁽³⁷⁾ การศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและองค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ภายในเนื้อฟันมีหลายเทคนิคในการประเมิน เช่นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM), การใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR), การใช้วิธีรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy), การใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, การใช้เครื่อง

วิเคราะห์ห้องประกอบแร่ธาตุและการใช้เครื่องถ่ายรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ชนิดไมโคร (Micro-computed tomography) เป็นต้น

การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุของเนื้อฟันจะสามารถระบุสัดส่วนของแคลเซียมและฟอสเฟตที่พบในชั้นเนื้อฟัน ซึ่งถือเป็นการบ่งชี้ได้ว่าในเนื้อฟันบริเวณที่มีการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสร้างผลึกอะพาไทต์ใหม่ขึ้น ก็จะมีพบแร่ธาตุแคลเซียมและฟอสเฟตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย⁽¹⁰⁾ การศึกษาของ Gandolfi MG และคณะในปี ค.ศ. 2011 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการเลียนแบบการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันมนุษย์ด้วยวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดดัดแปลงที่มีการใส่ฟิลเลอร์ประเภทแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นอนุพันธ์ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เปรียบเทียบกับวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิม และวัสดุประเภทกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุภายในเนื้อฟันด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องประกอบแร่ธาตุ ผลการทดลองพบว่าในแผ่นเนื้อฟันที่สัมผัสกับคอมโพสิตชนิดดังกล่าวจะมีปริมาณธาตุแคลเซียม และธาตุฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นจากระดับตั้งต้น ในขณะที่วัสดุกลุ่มอื่นไม่มีการเพิ่มขึ้นของธาตุ 2 ชนิดดังกล่าว จึงสรุปว่าวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดดัดแปลงมีความสามารถในการเลียนแบบการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันมนุษย์ได้ดีกว่า⁽³⁸⁾

อย่างไรก็ตามเครื่องมือเหล่านี้ต่างมีข้อจำกัดบางประการ เช่นไม่สามารถให้ภาพรายละเอียดกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นเนื้อฟันได้ ดังเช่นการใช้สแกนภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะให้ข้อมูลในด้านลักษณะรูปร่างและโครงสร้างของผลึกภายในเนื้อฟัน แต่ไม่สามารถแยกได้อย่างสมบูรณ์ว่าปริมาณและอัตราการเกิดผลึกเกิดมีมากน้อยเพียงใด⁽⁵⁾ รวมถึงยังไม่สามารถระบุได้ว่าผลึกที่เกิดขึ้นอยู่บริเวณด้านนอกหรือด้านในเส้นใยคอลลาเจน เครื่องมือประเภทที่ตรวจสอบชนิดและปริมาณแร่ธาตุที่อยู่เกิดขึ้นภายในเนื้อฟันเครื่องมือเหล่านี้ไม่สามารถระบุระดับการแทรกซึมของแร่ธาตุลงไปเนื้อฟันได้ และไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าสัดส่วนแร่ธาตุที่เกิดขึ้นอยู่ในส่วนใดของเนื้อฟัน

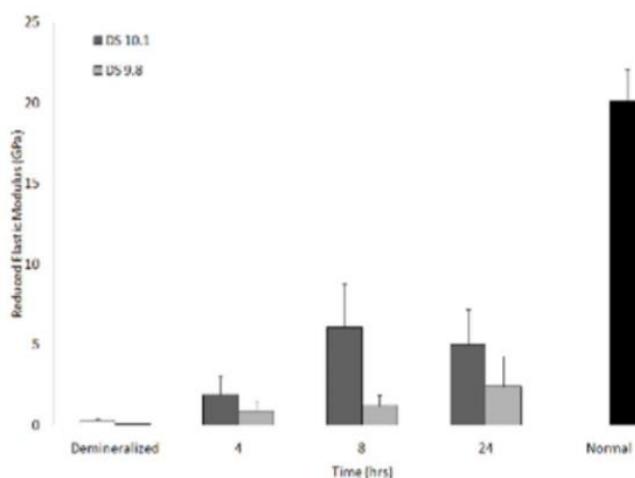
แม้ว่าวิธีการศึกษาประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันในปัจจุบันจะการใช้การประเมินปริมาณแร่ธาตุโดยรวมที่อยู่ภายในโครงสร้างฟันด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมองภาพรวมของการมีเนื้อฟันที่มีคุณภาพนั้นจะต้องมีการศึกษาในหลายแง่มุมประกอบกันเช่น ต้องมีการศึกษาถึงโครงสร้างองค์ประกอบภายในเนื้อฟัน ปริมาณแร่ธาตุ ความหนาแน่นของแร่ธาตุ ตำแหน่งและความสามารถในการจัดเรียงตัวของแร่ธาตุที่อยู่ในส่วนอินทรีย์เมทริกซ์ในเนื้อฟัน การศึกษาคูณสมบัติทางกลของเนื้อฟันเป็นสิ่งที่สามารถประเมินคุณภาพของเนื้อฟันได้ดี Bertassoni LE. และคณะในปี ค.ศ. 2009 เชื่อว่าการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบ

จากรอยผุนั้น มีจุดประสงค์เพื่อให้เนื้อฟันส่วนนั้นกลับมามีคุณภาพดีขึ้น กล่าวคือมีความแข็งแรงสามารถทำหน้าที่รองรับแรงบดเคี้ยวได้ตามเดิม⁽⁵⁾

6.2 คุณสมบัติความแข็งแรงของเนื้อฟัน

การที่เนื้อฟันมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีนั้นเป็นสิ่งที่สามารถประเมินความแข็งแรงของฟันทั้งตัวฟันได้⁽⁵⁾ เนื่องจากในโครงสร้างฟันของมนุษย์มีสัดส่วนเนื้อฟันปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับเคลือบฟัน และเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน โดยเนื้อฟันจะมีทั้งเนื้อฟันบริเวณตัวฟัน (Coronal dentine) และเนื้อฟันบริเวณรากฟัน (Root dentine) นอกจากนี้พบว่าเนื้อฟันที่มีความนิ่มกว่าเคลือบฟันอันเนื่องมาจากองค์ประกอบภายในที่มีทั้งส่วนแร่ธาตุและคอลลาเจนเมทริกซ์ การมีชั้นเนื้อฟันบริเวณรอยต่อของเนื้อฟันและเคลือบฟัน (Dentine-enamel junction) สามารถลดการก่อตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากชั้นเคลือบฟันที่มีความเปราะได้⁽³⁹⁾ ไม่ให้รอยร้าวลุกลามลงสู่ชั้นโพรงประสาทฟันทำให้ฟันไม่แตกง่ายจนเกินไปสามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวได้

การศึกษาความแข็งแรงเชิงกลถือเป็นการประเมินประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุที่ดีเนื่องจาก การที่เนื้อฟันจะมีความแข็งแรงเชิงกลที่มากขึ้นนั้นเป็นผลประมวบรวมของทุกปัจจัยทั้งในแง่องค์ประกอบแร่ธาตุภายในเนื้อฟันที่มากขึ้น การจัดเรียงตัวของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใหม่อย่างเป็นระบบระเบียบ และลำดับการสะสมแร่ธาตุในคอลลาเจนเมทริกซ์ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติทางกลของเนื้อฟันจึงเป็นอีกวิธีในการประเมินผลของการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น⁽⁵⁾ ดังเช่นการศึกษาของ Bertassoni LE และคณะในปี ค.ศ. 2011 นำคุณสมบัติเชิงกลมาประเมินผลการคืนกลับแร่ธาตุบนผิวเนื้อฟันด้วยการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงระดับนาโน ทำการวัดก่อนและหลังการแช่สารที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ ผลการทดลองพบว่าเนื้อฟันปกติที่ไม่มีการละลายแร่ธาตุจะมีความอดุลย์ความยืดหยุ่นสูงที่สุด ต่อมาเมื่อทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุค่ามอดุลย์ความยืดหยุ่นจะลดลง และเมื่อนำฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุไปทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุอีกครั้งค่ามอดุลย์ความยืดหยุ่นจะกลับมามีค่าสูงขึ้น⁽¹²⁾ ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นก่อนและหลังการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

ที่มา : Bertassoni LE, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. Mechanical recovery of dentin following remineralization in vitro — An indentation study. Journal of Biomechanics. 2011; 44(1): 176-81.

6.3. การทดสอบคุณสมบัติความแข็งในระดับนาโน

การประเมินค่าความแข็งของวัสดุของวัสดุทางทันตกรรมสามารถทำได้ โดยวิธีการทดสอบความแข็งต่อสารขัดถู (Abrasive test) การทดสอบความแข็งต่อรอยขีดข่วน (Scratch test) หรือการทดสอบความแข็งโดยการกด (Indentation) ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอื่นและมีข้อดีหลายประการคือ ขั้นตอนและวิธีการทดสอบง่าย ราคาถูก และสามารถทำซ้ำได้⁽⁴⁰⁾

การทดสอบความแข็งโดยการกดมีหลายวิธี เริ่มตั้งแต่ในปี 1900 มีการใช้หัวกดลูกเหล็กทรงกลม (Steel ball) มากดบริเวณพื้นผิวที่ทดสอบจนกระทั่งถึงแรงที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นเครื่องทดสอบจะมีการคำนวณสัดส่วนของแรงกดต่อพื้นที่ผิวสัมผัส เรียกการทดสอบนี้ว่า การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell test) อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้มีข้อเสียคือ หัวกดลูกเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อกดกับวัสดุที่มีความแข็งมาก และไม่สามารถหาความแข็งในระดับไมโครได้⁽⁴⁰⁾

การทดสอบความแข็งโดยการกดแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การทดสอบความแข็งแบบมาโคร (Macrohardness tests) จะใช้แรงกดมากกว่า 1 กิโลกรัม และทดสอบความแข็งแบบไมโคร (microhardness tests) จะใช้แรงกดน้อยกว่า 1 กิโลกรัม ซึ่งนิยมใช้ทางทันตกรรมมากกว่า การทดสอบแบบไมโครมีหลายวิธี เช่น การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell test) แบบบาร์โคล

(Barcol test) เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบนูป (Knop hardness test) และแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test) โดยมีหลักการคำนวณความแข็งจากค่าแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ผิวหลังจากหัวกดกดเรียบร้อยแล้ว⁽⁴⁰⁾ การทดสอบแบบนูป จะมีการใช้หัวกดเพชรรูปร่างปิรามิด (Diamond pyramidal indenter) ที่ทำให้รอยกดเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhomboid shape) และความยาวของเส้นทแยงมุม (Diagonal) บริเวณรอยกดจะถูกนำมาคำนวณ มีหน่วยเป็น knop hardness number (KHN) มีสูตร ดังนี้

$$KHN = \frac{P}{l^2 C_p}$$

ค่า P คือแรงที่ใช้กด, ค่า l คือความยาวของเส้นทแยงมุม และค่า Cp คือค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า l การทดสอบแบบนูปมีข้อดีคือ สามารถใช้แรงกดมากน้อยแตกต่างกันได้ ทำให้วัสดุที่นำมาทดสอบมีค่าความแข็งที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแบบนูปจะต้องขัดและมีพื้นที่ผิวเรียบ⁽⁴¹⁾

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส หลักการกดเหมือนกับการทดสอบแบบบริเนลล์ และนูป แต่จะใช้หัวกดเพชรรูปร่างปิรามิดที่มีมุม 136 องศา ทำให้ได้รอยกดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square shape) เหมาะสำหรับวัดความแข็งของวัสดุที่มีความเปราะ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบนูปที่แรงระดับเดียวกัน รอยกดของวิกเกอร์สจะลึกกว่ารอยกดของนูป นั่นคือการทดสอบแบบวิกเกอร์สมีความไวต่อลักษณะพื้นผิวเรียบของวัสดุที่ทดสอบน้อยกว่า อย่างไรก็ตามลักษณะของรอยกดแบบวิกเกอร์สมีเส้นทแยงมุมที่สั้นเมื่อเปรียบเทียบกับรอยกดนูป ส่งผลให้การวัดผลโดยใช้สายตามีความผิดพลาดได้ง่ายกว่า⁽⁴¹⁾ การทดสอบแบบวิกเกอร์สมีหน่วยเป็น Vickers hardness number (VHN) มีสูตรคือ

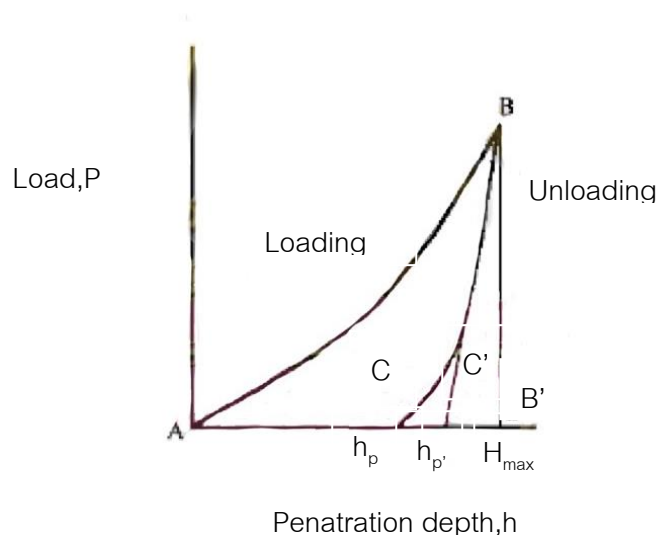
$$VHN = 2P \sin(\theta/2)/d^2$$

ค่า P คือแรงที่ใช้กด ค่า d คือค่าเฉลี่ยของความยาวของเส้นทแยงมุมทั้งสองเส้น และค่า θ คือมุม 136 องศา

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการทดสอบความแข็งในระดับไมโคร ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอย่างถาวร (Permanent deformation) เท่านั้น⁽⁴¹⁾ ดังนั้นค่า

ความแข็งที่ได้จะมากกว่าความเป็นจริง (Overestimate) เนื่องจากเป็นการวัดความลึกของรอยกดหลังจากวัสดุมีการคืนสภาพยืดหยุ่น (Elastic recover) แล้ว⁽⁴²⁾ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตที่มีจำหน่ายอยู่ตามท้องตลาดนั้น บางผลิตภัณฑ์มีขนาดของวัสดุอัดแทรกขนาด 0.04 ไมโครเมตร และบางผลิตภัณฑ์มีการผลิตวัสดุอัดแทรกที่มีอนุภาคในระดับนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารอยกดของหัวกดในการทดสอบความแข็งในระดับไมโคร ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งในระดับนาโนขึ้นมา ซึ่งการวัดระบบนี้เป็นการวัดความต้านทานการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอย่างถาวรรวมถึงวัดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) อีกด้วย การแปลผลไม่ได้ใช้การวัดขนาดของรอยกดโดยสายตาเป็นตัวประเมิน

นอกจากนี้เครื่องทดสอบความแข็งในระดับนาโน ยังสามารถกำหนดแรงที่กดและวัดความลึกที่หัวกดเคลื่อนตัวลงไปบนพื้นผิวทั้งในขณะที่ให้แรงกด (Load) และไม่ให้แรงกด (Unload) ดังนั้นการแปลผลข้อมูลจะกระทำผ่านเครื่องมือเดปเซนซิงอินเดนเทชัน (Depth-sensing indentation instruments) อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้ ค่อนข้างมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการสั่นสะเทือน และความเรียบของชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของระบบ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิและการสั่นสะเทือนและความเรียบของชิ้นงานจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการทดสอบแบบนี้



ภาพประกอบ 8 ลักษณะกราฟพี-เอช (P-h graph)

แสดงแรงที่กดลงบนวัสดุ (load;P) กับความลึกของรอยกด (penetration depth; h)

ที่มา : Toparli M, Koksai NS. Hardness and yield strength of dentin from simulated nano-indentation tests. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2005;77(3):253-7.⁽⁴³⁾

การทำงานของเครื่องวัดความแข็งในระดับนาโนนั้น หัวกดจะออกแรงกดตามค่าที่กำหนด ระดับความลึกจะถูกวัดและสร้างเป็นกราฟฟอร์ซ-ดิสเพลสเมนต์ (Force-displacement curve) จากภาพประกอบ 8 จุด A คือจุดเริ่มต้นที่หัวกดสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ และแรงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจะกระทั่งถึงจุด B โดยเส้นโค้ง AB (Loading curve) เป็นช่วงที่หัวกดกดเข้าไปในเนื้อวัสดุ และเส้นโค้ง BC (Unloading curve) เป็นช่วงเอาหัวกดขึ้นมาจากเนื้อวัสดุ ถ้าวัสดุมีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ เส้น AB และเส้น BC จะเป็นเส้นเดียวกัน (Identical) อย่างไรก็ตามหากวัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ระยะ AC คือระยะที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้นพื้นที่ ABC คือพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พื้นที่ CBB' คือ พลังงานที่วัสดุสามารถยืดหยุ่นได้ และพื้นที่ ABB' คือพลังงานทั้งหมดที่วัสดุได้กระทำ⁽⁴³⁾

ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น เป็นการบอกถึงความสัมพันธ์ในเรื่องความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic range) ซึ่งวัดได้จากความชัน (Slope) ของบริเวณยืดหยุ่นในกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) คุณสมบัตินี้ถือเป็นคุณสมบัติพื้นฐาน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุ หน่วยที่ใช้เป็นจิกะปาสคาล (GPa)

ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของทันตวัสดุสามารถหาได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบแบบแรงดึง (Tension) แรงกด (Compression) และแรงเฉือน (Shear) ซึ่งคำนวณได้จาก

ความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด เช่น การทดสอบแบบทรีพอยท์เบนด์ (Three-point bending test) ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐานไอเอสโอ 4049 (ISO-4049) นอกจากวิธีการดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีผู้ที่นำเครื่องทดสอบความแข็งมาใช้ในการหาค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นได้เช่นกัน⁽⁴²⁾

โดยส่วนใหญ่การคำนวณความเค้นของกราฟความเค้น-ความเครียด จะสมมติให้พื้นที่ตัดขวาง (Cross sectional area) ของวัสดุมีค่าคงที่ ในขณะที่ความเป็นจริงเมื่อให้แรงดึงกับวัสดุที่ทดสอบ พื้นที่ตัดขวางจะมีการเปลี่ยนแปลงจากการที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นจริง⁽⁴¹⁾ อย่างไรก็ตามการคำนวณนี้เป็นการคำนวณหลังจากที่วัสดุมีการคืนสภาพแล้ว ในขณะที่การทดสอบความแข็งในระดับนาโนสามารถหาค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุได้ตลอดช่วงความลึกของพื้นผิวที่ถูกกดทำให้ได้ค่าข้อมูลที่ต้องการมากกว่าการทดสอบวิธีอื่น ๆ

จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่า การทดสอบความแข็งในระดับนาโนนั้น เป็นวิธีที่สามารถหาความแข็งผิวและค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อพื้นได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการแปลผลข้อมูลมีความถูกต้อง แม่นยำมากกว่าการทดสอบความแข็งในระดับไมโคร เนื่องจากการอ่านข้อมูลผ่านเครื่องมือเดปเซนซิงอินเดนเตชัน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

1. สารไทมอล (Thymol) ความเข้มข้น 0.1เปอร์เซ็นต์ - M Dent
2. อะคริลิคชนิดบ่มตัวโดยไม่ใช้ความร้อน - PalaXpress® ultra
3. กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid – EDTA) ความเข้มข้น 17 เปอร์เซ็นต์ - Endo Clean® - M Dent
4. กรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิก (Polyvinylphosphonic acid) - Sigma-Aldrich
5. กรดโพลีอะคริลิก (Polyacrylic acid) - Sigma-Aldrich
6. กระดาษทรายชนิด Silicon carbide abrasive paper เบอร์ 320 600 1,200 2,000 – Star World®
7. ใบมีดเวเฟอร์ (Wafering blade) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว – Pace Technologies
8. น้ำเปล่า
9. น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
10. แบบหล่ออะคริลิคใสรูปสี่เหลี่ยมขนาด 3x3x1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
11. เครื่องวิเคราะห์ห้องประกอบแร่ธาตุ (Energy dispersive X-ray spectroscopy) - OXFORD®, LINKISIS300, UK
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) - JEOL®, JSM-5410LV, JAPAN
13. เครื่องทดสอบความแข็งในระดับนาโน (Nano-hardness testing machine) - THE FISCHERSCOPE®.HM2000, Germany
14. เครื่องตัดละเอียด - Isomet® 1000 Precision saw, Buehler®
15. กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Steromicroscope) - Olympus® SZ61, Tokyo, Japan

16. เครื่องขัดผิววัสดุ (Polishing machine) – Nano 100T Grinder-polisher, Pace technologies®, USA

17. เครื่องชั่งสาร ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง – Sartorius, BP210S, Germany

18. ผงขัดเพชร (Polycrystalline diamond paste) ขนาด 6 3 1 0.25 ไมโครเมตร – Pace technologies®, USA

19. แผ่นขัดผ้าสักหลาด (Magnetron base plate) – Pace technologies®, USA

20. สไลด์แก้ว (Glass slide) ขนาด 3x1 ตารางนิ้ว หนา 1 มิลลิเมตร

21. แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนติน (Biodentine™) – Septodont; St. Maur-des-Fossés, France

22. กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูจิไนน์ (Fuji IX GP EXTRA® CAPSULE) -.GC, Tokyo, Japan

23. บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร

ใช้ฟันซี่กรามแท้ซี่ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ที่ไม่มีรอยผุ รอยสึก และไม่มีการบูรณะใด ๆ ทั้งสิ้น 20 ซี่ การศึกษานี้ผ่านการยกเว้นการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมสำหรับพิจารณาโครงการวิจัยที่ทำในมนุษย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หมายเลขการรับรอง SWUEC/X-094/2563

การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1. กลุ่มทดลอง เป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา ทดสอบจากแผ่นเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุทั้งหมด 15 ซี่ แบ่งเป็น 3 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 5 ซี่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กลุ่ม Fuji IX แผ่นเนื้อฟันที่สัมผัสกับ ฟูจิไนน์

กลุ่ม Biodentine แผ่นเนื้อฟันที่สัมผัสกับ ไบโอเดนติน

กลุ่ม Control แผ่นเนื้อฟันที่ไม่มีการสัมผัสกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ

2. กลุ่ม Normal จัดเป็นข้อมูลอ้างอิงพื้นฐานทั่วไปในการเปรียบเทียบ แผ่นเนื้อฟันทั้งหมด 5 ซี่ ทดสอบจากแผ่นเนื้อฟันที่ไม่ผ่านการใช้สารเคมีใด ๆ ซึ่งเป็นเพียงการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเนื้อฟันมนุษย์เท่านั้น

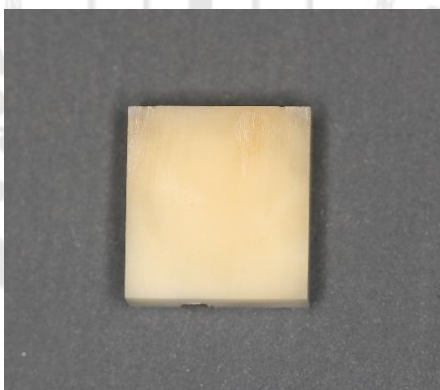
การเตรียมชิ้นงาน ขั้นตอนการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเตรียมชิ้นงาน

1. การเตรียมแผ่นเนื้อฟันให้มีขนาด $6 \times 6 \times 2$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร จำนวน 20 ชิ้น ทั้งกลุ่มการทดลอง และกลุ่มอ้างอิงมีการเตรียมแผ่นเนื้อฟันเหมือนกันโดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

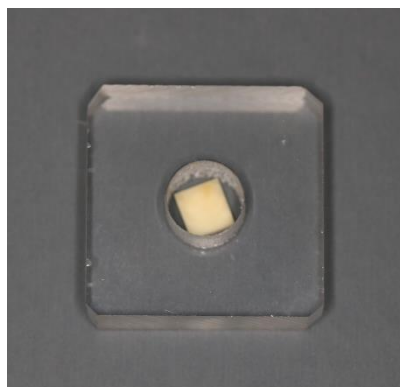
1.1 ใช้ฟันซี่กรามแท้ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ที่ไม่มีรอยผุ รอยสึก และไม่มี การบูรณะใด ๆ ภายหลังการถอนฟันเก็บในสารละลายโหมอลความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซนต์ กำหนด ใช้ฟันภายใน 2 สัปดาห์

1.2 ตัดฟันด้วยเครื่องตัดละเอียดโดยมีน้ำช่วยลดความร้อน เลือกใช้เนื้อฟัน บริเวณขนานกับด้านบดเคี้ยว ทำการตัดชิ้นเคลือบฟันบริเวณด้านบดเคี้ยวออกทั้งหมด จากนั้นตัด เฉพาะในส่วนเนื้อฟันกำหนดให้เนื้อฟันมีความหนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร นำแผ่นเนื้อฟันที่ได้มาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า เพื่อแยกชิ้นเนื้อฟัน ที่มีรอยทะลุโพรงประสาทฟันออกจากการทดลองดังภาพประกอบ 9



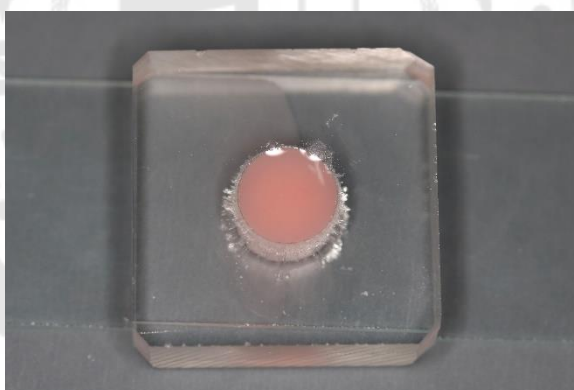
ภาพประกอบ 9 แสดงแผ่นเนื้อฟันขนาด $6 \times 6 \times 2$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร

1.3 เตรียมแบบหล่ออะคริลิกใสขนาด $3 \times 3 \times 1$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะรูบริเวณ ตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรเพื่อเป็นบริเวณที่ฝังแผ่นเนื้อฟันดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงแบบหล่ออะคริลิกใสขนาด 3x3x1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.4 นำแผ่นเนื้อฟันที่ได้ยึดเข้ากับแบบหล่ออะคริลิกใส ด้วยอะคริลิกชนิดบ่มตัว โดยไม่ใช้ความร้อน ใช้แผ่นสไลด์แก้ว วางรองบริเวณด้านใต้และด้านบนก่อนยึดชิ้นงานดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงการยึดแผ่นเนื้อฟันลงแบบหล่ออะคริลิกใสด้วยอะคริลิก

1.5 นำชิ้นงานที่ได้ขัดแต่งบนเครื่องขัดผิววัสดุด้วยเครื่องขัดผิววัสดุมีขั้นตอนทั้งหมด 8 ขั้นตอน

1.5.1 นำแผ่นเนื้อฟันขัดบนกระดาษทราย เบอร์ 320 โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.3 นำแผ่นเนื้อฟันขัดบนกระดาษทราย เบอร์ 1,200 โดยใช้เครื่องขัดผิว
วัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์
กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดข่วนที่ลึกกว่ารอยขีดจากกระดาษทรายเบอร์ก่อนหน้า ซึ่ง
หมายถึงเบอร์ 600 หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็น
เวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.4 นำแผ่นเนื้อฟันขัดบนกระดาษทราย เบอร์ 2,000 โดยใช้เครื่องขัดผิว วัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดข่วนที่ลึกกว่ารอยขีดจากกระดาษทรายเบอร์ก่อนหน้า ซึ่ง หมายถึงเบอร์ 1,200 หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.5 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 6 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับแผ่นขัดผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อพื้นโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดข่วนที่ลึกกว่ารอยขีดจากกระดาษทราย เบอร์ก่อนหน้าซึ่งหมายถึงเบอร์ 2,000 หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อพื้นเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วย คลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.6 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 3 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับแผ่นขัดผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อพื้นโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดข่วนที่ลึกกว่ารอยขีดจากผงขัดเพชรขนาด ก่อนหน้า ซึ่งหมายถึงขนาด 6 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อพื้นเข้าเครื่องทำความสะอาด ด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.7 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับแผ่นขัดผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดขีดที่ลึกกว่ารอยขีดจากผงขัดเพชรขนาด

ก่อนหน้า ซึ่งหมายถึงขนาด 3 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อพินเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องสั่นคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

1.5.8 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับแผ่นขัดผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อพินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า จะต้องไม่พบรอยขีดข่วนที่ลึกกว่ารอยขีดข่วนจากผงขัดเพชรขนาดก่อนหน้า ซึ่งหมายถึงขนาด 1 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อพินเข้าเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องสั่นคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาทีด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

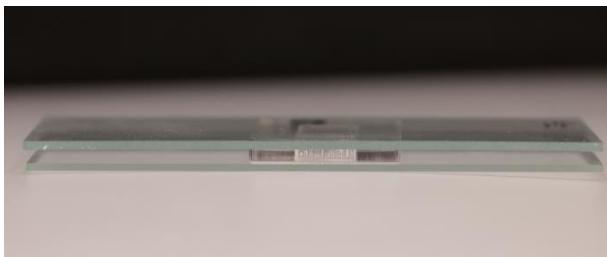
1.6 ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อพินอีกครั้งด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า

2. การเตรียมแผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบ วัสดุที่ทดสอบมีทั้งหมด 2 ชนิด ชนิดละ 5 แผ่น ได้แก่ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูโอไรน์และแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทิน กำหนดให้แผ่นวัสดุมีขนาดกว้าง 8 มิลลิเมตร ยาว 8 มิลลิเมตร สูง 2 มิลลิเมตร

2.1 แบบหล่ออะคริลิกใสรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 8x8x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตรดังภาพประกอบ 12 ใช้สไลด์แก้ววางทั้งบริเวณด้านล่างและด้านบนเพื่อกำจัดฟองอากาศขณะขึ้นรูปวัสดุดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 12 แสดงแบบหล่ออะคริลิกใสสำหรับขึ้นรูปแผ่นวัสดุ



ภาพประกอบ 13 แสดงสไลด์แก้วเพื่อกำจัดฟองอากาศขณะขึ้นรูปแผ่นวัสดุ

2.2 ผสมวัสดุแต่ละชนิดตามขั้นตอนดังนี้

2.2.1 พูจิไนน์ กดส่วนท้ายของแคปซูลเพื่อให้ส่วนผงผสมกับส่วนเหลว นำแคปซูลไปปั่นด้วยเครื่องผสมอะมัลกัมเป็นระยะเวลา 10 วินาที นำแคปซูลใส่ปั่นชนิด จากนั้นฉีดวัสดุลงในแบบหล่ออะคริลิคจนเต็ม

2.2.2 ไบโอเดนทิน หยดส่วนเหลวจำนวน 5 หยด ลงในแคปซูลที่เป็นส่วนผง นำแคปซูลไปเข้าเครื่องผสมอะมัลกัมเป็นระยะเวลา 30 วินาทีตามคำแนะนำของบริษัท ดังภาพประกอบ 3 จากนั้นเปิดแคปซูลและใช้พายพลาสติกนำวัสดุออกจากแคปซูลใส่ลงในแบบหล่ออะคริลิคจนเต็ม องค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตาราง 3

2.3 ใช้แผ่นโกลด์แก้วปิดวัสดุด้านบนและด้านล่างของแบบหล่ออะคริลิค รีดวัสดุส่วนเกินออก กดทับบริเวณด้านบนของแบบหล่ออะคริลิคด้วยแผ่นโลหะน้ำหนัก 3 กิโลกรัม เพื่อไล่ฟองอากาศและคงความหนาของแผ่นวัสดุให้มีความหนาอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร

2.4 รอวัสดุก่อตัวเต็มที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขณะรอการทดสอบเก็บชิ้นวัสดุในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศา ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์

2.5 แกะแผ่นวัสดุออกจากแบบหล่ออะคริลิค นำแผ่นวัสดุที่ก่อตัวแล้วมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสารเคมี

ตาราง 3 แสดงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

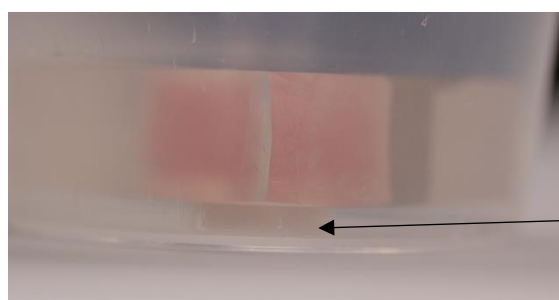
วัสดุ	ส่วนประกอบ	ผู้ผลิต	หมายเลขสินค้า-วันหมดอายุ
Fuji IX Extra	Fluoro-alumino-silicate glass, copolymer of acrylic maleic acid, tartaric acid, water	GC,Tokyo, Japan	1808201 หมดอายุ 19/8/2020
Biodentine™	Tricalcium silicate, dicalcium silicate, calcium carbonate and oxide, zirconium oxide and iron oxide, water, calcium chloride and water-soluble polymer	Septodont; St. Maur-des Fossés, France	B23615 หมดอายุ 12/2020

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองที่จะกล่าวดังต่อไปนี้เป็นขั้นตอนสำหรับกลุ่มทดลองเท่านั้น ในขณะที่กลุ่มอ้างอิงเมื่อขึ้นรูปแผ่นเนื้อฟันแล้ว จะนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานโดยมิได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่จะกล่าวต่อไป

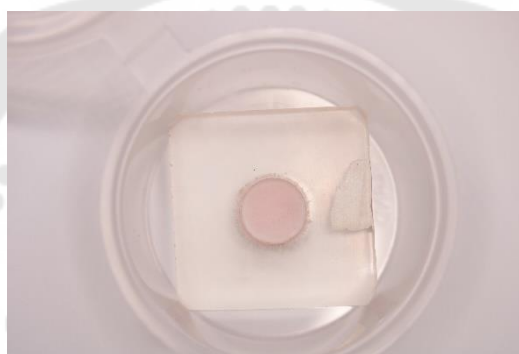
1. การละลายแร่ธาตุออกจากแผ่นเนื้อฟัน โดยการนำแผ่นเนื้อฟันทั้ง 15 ชิ้นแช่ในสารละลายแรงการสูญเสียแร่ธาตุกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกความเข้มข้น 17 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 15 มิลลิลิตรต่อการละลายแร่ธาตุในแผ่นเนื้อฟัน 1 แผ่น⁽³⁸⁾

2. นำแผ่นเนื้อฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุมาวางทับแผ่นวัสดุ โดยกำหนดให้ส่วนของเนื้อฟันทั้งหมดสัมผัสกับแผ่นวัสดุ ดังภาพประกอบ 14 ใช้กล้องเก็บสารที่มีขนาดพอดีกับแบบหล่ออะคริลิกใสเพื่อคงตำแหน่งให้วัสดุทั้งสองอยู่นิ่งดังภาพประกอบ 15



แผ่นวัสดุ

ภาพประกอบ 14 แสดงการวางแผ่นเนื้อฟันให้สัมผัสกับแผ่นวัสดุทั้งหมด



ภาพประกอบ 15 แสดงกล่องเก็บสารที่มีขนาดพอดีกับแบบหล่ออะคริลิกใส่เพื่อคงตำแหน่ง

3. เตรียมสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุมีส่วนประกอบดังตาราง 4 ซึ่งเป็นสารละลายฟอสเฟตที่ไม่มีส่วนประกอบของแคลเซียม ผสมสารโดยใช้น้ำปราศจากประจุ ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่า pH 7.3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์⁽¹⁰⁾

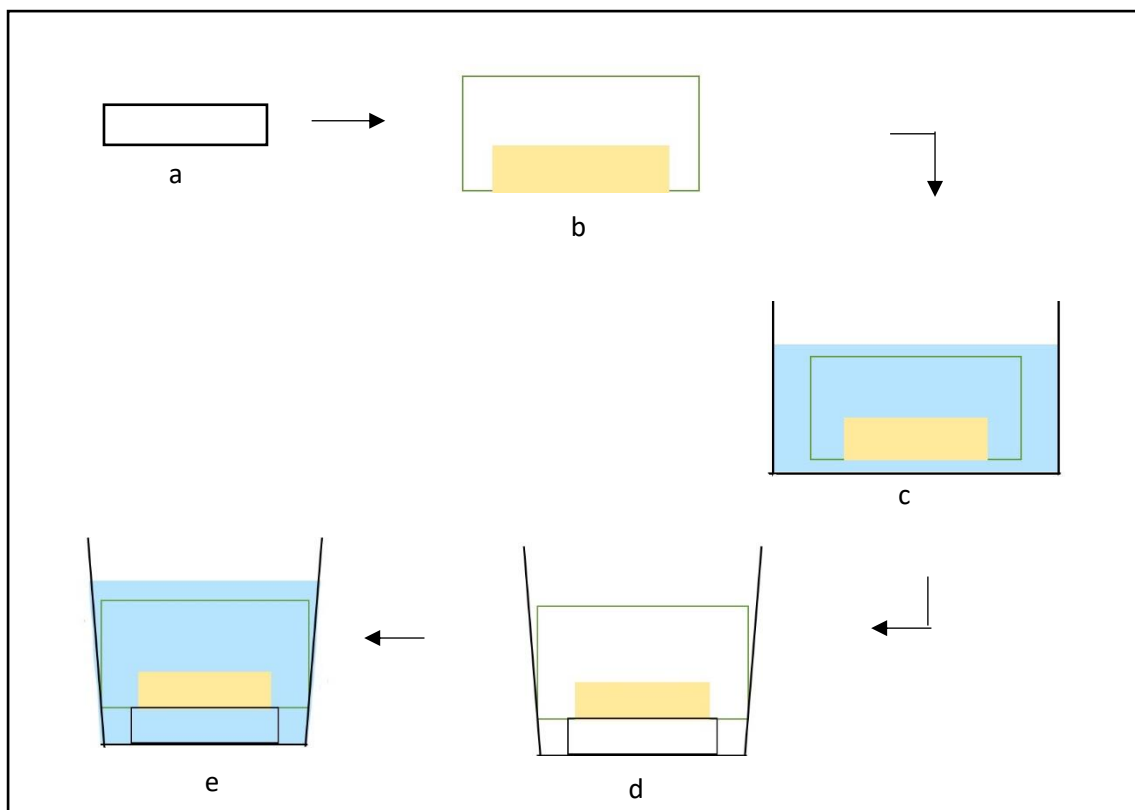
4. นำชิ้นงานแช่ในสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ ปริมาณสารละลายที่ใช้ 15 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักแผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบ 1 กรัม⁽¹⁰⁾ โดยชิ้นงานที่แช่มี 3 กลุ่มคือ กลุ่มแรกแผ่นเนื้อฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุและแผ่นวัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ กลุ่มที่สองแผ่นเนื้อฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุและแผ่นวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลุ่มที่สามแผ่นเนื้อฟันที่ผ่านการสูญเสียแร่ธาตุเพียงอย่างเดียว ชิ้นงานทั้งหมดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสได้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ กำหนดให้แช่สารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์^(10, 38)

5. แยกแผ่นเนื้อฟันออกจากแผ่นวัสดุ นำชิ้นเนื้อฟันมาทดสอบประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุด้วยคุณสมบัติ 3 ด้านตามลำดับ หาค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่นด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน วิเคราะห์ประกอบของแร่ธาตุด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์แร่ธาตุ และศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขณะรอการทดสอบเก็บชิ้นวัสดุในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศา ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ก่อนการทดสอบจะนำชิ้นงานมาแช่ในน้ำปราศจากประจุ 1 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

ตาราง 4 แสดงองค์ประกอบของสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ

องค์ประกอบ	ปริมาณ
สารละลายฟอสเฟต	
NaCl	136.9 มิลลิโมลาร์
KCl	2.7 มิลลิโมลาร์
Na ₂ HPO ₄	8.3 มิลลิโมลาร์
KH ₂ PO ₄	1.25 มิลลิโมลาร์
สารเลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน	
Polyacrylic acid (Sigma-Aldrich®)	500 ไมโครกรัมต่อสารละลายฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร
Polyvinylphosphonic acid (Sigma-Aldrich®)	200 ไมโครกรัมต่อสารละลายฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร

ที่มา : Tay FR, Pashley DH. Guided tissue remineralisation of partially demineralised human dentine. *Biomaterials*. 2008; 29(8): 1127-37.



ภาพประกอบ 16 แสดงขั้นตอนการทดลองทั้งหมด

โดยสรุปขั้นตอนการทดลองทั้งหมดแสดงดังภาพประกอบ 16 ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธี Gandolfi technique⁽³⁸⁾

a แผ่นวัสดุขนาด 8x8 x2 ลบ.มม.

b แผ่นเนื้อพินขนาด 6x6 x2 ลบ.มม. ที่บรรจุในแบบหล่ออะคริลิค

c ละลายแร่ธาตุออกจากแผ่นเนื้อพินด้วยกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกความเข้มข้น 17 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงในภาชนะปิกเกอร์ ณ อุณหภูมิห้อง

d วางแบบหล่ออะคริลิคทับแผ่นวัสดุ กำหนดให้ตำแหน่งของแผ่นเนื้อพินซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 6x6 ตร.มม. สัมผัสกับแผ่นวัสดุทั้งหมดที่มีพื้นที่หน้าตัด 8x8 ตร.มม. เปลี่ยนภาชนะบรรจุให้มีขนาดพอดีกับแบบหล่ออะคริลิค

e แสงสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ ที่อุณหภูมิที่ 37 องศา เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทั้ง 4 กลุ่มการทดลองมีระเบียบวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมือนกันดังนี้

1. ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน เก็บข้อมูลจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงระดับนาโน

2. ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุของผิวเนื้อฟัน เก็บข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ

1. การเก็บข้อมูลจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงระดับนาโน

เป็นการประเมินความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุจากความแข็งแรงเชิงกล ทดสอบค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นด้วยการใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงในระดับนาโน ทำการกดชิ้นงานเฉพาะแผ่นเนื้อฟัน มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1.1. นำแผ่นเนื้อฟันที่ฝังในแบบหล่ออะคริลิกไปวางบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบความแข็งแรงในระดับนาโน ทำการทดสอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิและทำการทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์

1.2. การเลือกหัวกดใช้หัวกดชนิดวิกเกอร์ (Vicker's indenter) เลือกกดเฉพาะที่ตำแหน่งเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน (Intertubular dentin) จะทำการสุ่มบริเวณที่กดทั้งหมด 5 บริเวณในการทดสอบแผ่นเนื้อฟัน 1 ชิ้น นำค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ได้ทั้ง 5 บริเวณมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวแทนของแผ่นเนื้อฟันชิ้นนั้น ๆ

1.3 การกดของหัวกดใน 1 รอยกด เริ่มจากแรง 0 จนกระทั่งถึงค่าแรงที่ทำให้เกิดร่องรอยหัวกดลงบนแผ่นเนื้อฟัน (Penetration depth) ที่ความลึก 5 ไมโครเมตร ซึ่งแรงกดสูงสุดที่ทำให้เกิดความลึกดังกล่าวคือ 6 มิลลินิวตัน (Load) ใช้ระยะเวลาจากเริ่มออกแรงกดจาก 0 ถึง 6 มิลลินิวตันทั้งสิ้น 3 วินาที (Loading rate) เมื่อถึงค่าแรง 6 มิลลินิวตันจะคงแรงนั้นเป็นเวลา 10 วินาที (Hold) เพื่อให้เกิดครีป (Creep) ให้มากที่สุด ก่อนที่จะค่อย ๆ ลดแรงลงจาก 6 มิลลินิวตัน จนเหลือ 0 มิลลินิวตันภายในระยะเวลา 3 วินาที (Unloading rate) เมื่อแรงกดมีค่าเป็น 0 หัวกดจะถูกยกขึ้นจากแผ่นเนื้อฟัน (Unload)

1.4. กำหนดการเริ่มต้นทำงานของเครื่องหลังจากตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว อย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิในตู้ควบคุมอุณหภูมิคงที่

1.5. กำหนดค่าปัวซอง (Poisson's) ที่ใช้ในการคำนวณคือ 0.31 ⁽⁴⁴⁾

2. การเก็บข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ

ทำการสุ่มชิ้นงาน 2 ชิ้นงานในแต่ละกลุ่มที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่องกดระดับนาโนเรียบร้อยแล้ว มาศึกษาต่อด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ และกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า ก่อนการทดสอบจะปล่อยชิ้นงานให้แห้งอย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาฉาบผิวด้วยแพลทินัม (Platinum) กำหนดให้มีการวิเคราะห์แร่ธาตุ 5 ชนิดได้แก่ แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) และฟลูออไรด์ (F) คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O)

การวิเคราะห์ข้อมูล

ภายหลังการทดลองนำข้อมูลจากทั้ง 4 กลุ่มมาเปรียบเทียบกัน

1. เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบการกัดระดับนาโน นำค่าเฉลี่ยความแข็งมอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันมาวิเคราะห์ทางสถิติ ทดสอบค่าการแจกแจงและความแปรปรวนของข้อมูล (Normality test) โดยใช้สถิติ Shapiro-Wilk test

1.1 เปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 4 กลุ่มการทดลอง

1.1.1 กรณีประชากรมีการแจกแจงและความแปรปรวนปกติ จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสี่กลุ่มโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Anova)

1.1.2 กรณีประชากรมีการแจกแจงและความแปรปรวนไม่ปกติจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสี่กลุ่มโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยสถิติ Kruskal-Wallis Test

2. ผลการทดสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุจะวิเคราะห์ด้วยการบรรยายเชิงพรรณนา (Descriptive analysis)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของวัสดุ ขั้นตอนการทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้น ขั้นแรกคือการละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟันด้วยการใช้กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก และขั้นต่อมาคือการกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันอีกครั้ง ซึ่งการทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพในส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันของวัสดุ 2 ประเภทได้แก่ กلاسไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออไรด์ และแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทิน ทางผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีกลุ่มการทดลองทั้งหมด 4 กลุ่มดังนี้

1. กลุ่ม Fuji IX หมายถึงเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับกلاسไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออไรด์
2. กลุ่ม Biodentine หมายถึงเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทิน
3. กลุ่ม Control หมายถึงเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการใช้วัสดุกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุ ไม่มีการสัมผัสกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ
4. กลุ่ม Normal หมายถึงเนื้อฟันในสภาวะปกติ มิได้เป็นการทดลองให้เกิดการละลายแร่ธาตุ และกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุแต่อย่างใด ทำขึ้นเพื่อเป็นกลุ่มเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่มข้างต้น ข้อมูลที่ได้นี้จะเพียงหลักฐานและใช้ในการอ้างอิงลักษณะต่าง ๆ ของเนื้อฟันในสภาวะปกติเท่านั้น โดยกลุ่มอ้างอิงนี้จะมีการศึกษาคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ ด้วยการใช้อุปกรณ์เช่นเดียวกับกลุ่มทดลองทุกประการ ทำให้สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์และกلاسไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์ที่มีการจำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด พิจารณาจากคุณสมบัติ 3 ประการดังนี้

1. ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน
2. ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ ทดสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุบนผิวเนื้อฟัน ทดสอบด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ

1.ค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่นโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน

การศึกษาคุณสมบัติทางกลของเนื้อฟัน ด้วยการใช้เครื่องทดสอบความแข็งในระดับนาโน พิจารณาจากค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นทั้ง 4 กลุ่ม พบว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มแสดงดังนี้ กลุ่ม Normal มีค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นสูงที่สุด 17.06 จิกะปาสคาล รองลงมาเป็นกลุ่ม Biodentine มีค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่น 9.38 จิกะปาสคาล ถัดมาเป็นกลุ่ม Fuji IX มีค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่น 1.69 จิกะปาสคาล ส่วนแผ่นเนื้อฟันในกลุ่ม Control มีค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นต่ำที่สุด 1.34 จิกะปาสคาล

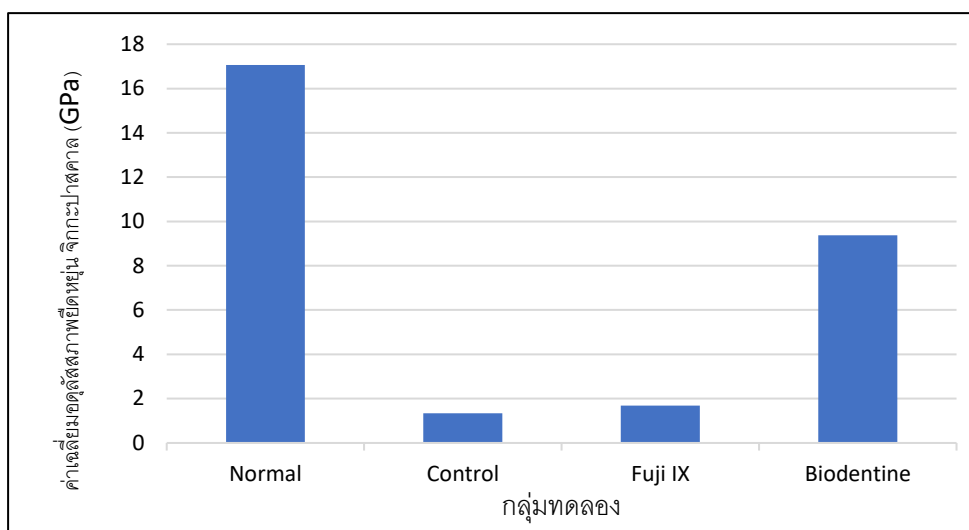
ตาราง 5 แสดงค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่นของแผ่นเนื้อฟันที่ทำการทดสอบ

กลุ่มทดลอง	จำนวน	Mean (GPa)	Min (GPa)	Max (GPa)	SD
Control	5	1.34 ^a	00.00	2.13	0.85
Biodentine	5	9.38 ^b	7.61	11.54	1.60
Fuji IX	5	1.69 ^a	0.57	3.70	1.30
Normal	5	17.06 ^c	15.24	21.03	2.41

อักษรด้วยที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากนั้นนำข้อมูลค่าเฉลี่ยมอดุลัสสภาพยึดหยุ่นที่ได้มาทดสอบการแจกแจงและความแปรปรวนของข้อมูล (Normality test) โดยใช้สถิติ Shapiro-Wilk test พบว่าข้อมูลมีการกระจายที่ไม่ปกติ จึงวิเคราะห์ข้อมูลทั้ง 4 กลุ่มด้วยสถิติ непараметрический Kruskal-Wallis Test ผลการวิเคราะห์พบว่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นของทั้ง 4 กลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทำการตรวจสอบการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Post Hoc Tests (Bonferroni) พบว่าแผ่นเนื้อฟันทุกกลุ่มมีค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นที่แตกต่างกัน ยกเว้นเนื้อฟันในกลุ่ม Control และเนื้อฟันในกลุ่ม Fuji IX ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังตาราง 5

เมื่อนำค่าเฉลี่ยมอดุลัสสภาพยึดหยุ่นมาแสดงผลในรูปแบบแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าเนื้อฟันกลุ่ม Normal มีค่ามอดุลัสสูงที่สุด ต่อมาเมื่อมีการละลายแร่ธาตุออกในกลุ่ม Control ค่ามอดุลัสจะลดลง และเมื่อมีการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนตินสามารถทำให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้นได้อีกครั้งอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่ม Control ในขณะที่การคืนกลับแร่ธาตุด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูลิโนนทำให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่ม Control ดังภาพประกอบ 17



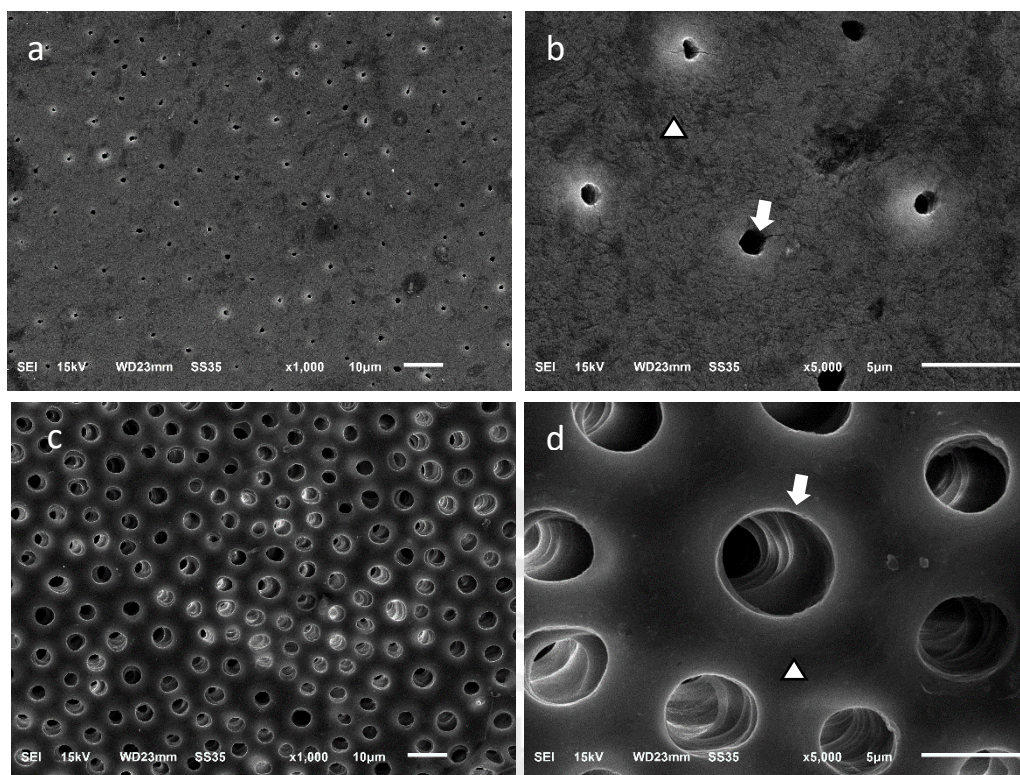
ภาพประกอบ 17 แสดงค่าเฉลี่ยมอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันทั้ง 4 กลุ่ม

2.คุณสมบัติด้านลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า พบลักษณะดังนี้

เนื้อฟันสภาวะปกติที่ไม่มีการละลายแร่ธาตุ กลุ่ม Normal จะพบท่อเนื้อฟันหน้าตัดค่อนข้างกลมขนาดใกล้เคียงกัน มีการกระจายตัวของท่อเนื้อฟันอย่างสม่ำเสมอ ภายในท่อเนื้อฟัน (Intratubular dentine) มีลักษณะกลวง และเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน (Intertubular dentine) มีลักษณะพื้นผิวเรียบ

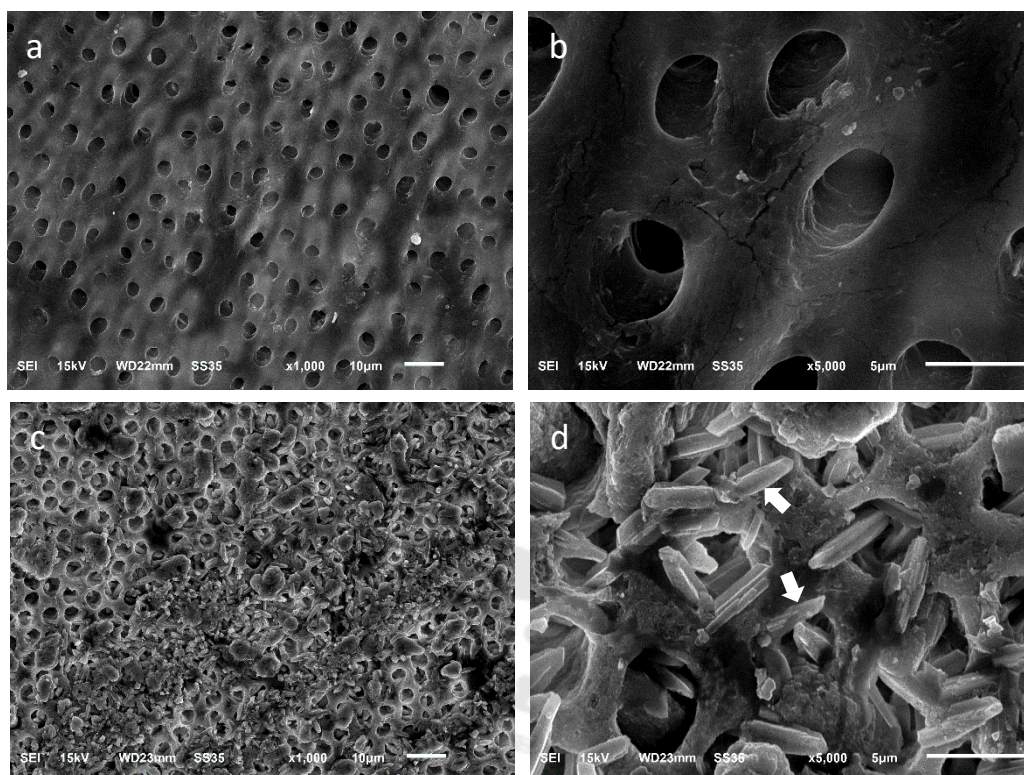
เนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ โดยไม่มีการใช้วัสดุกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุ กลุ่ม Control จะพบลักษณะท่อเนื้อฟันหน้าตัดกลม ท่อเนื้อฟันมีขนาดใหญ่กว่าขนาดท่อเนื้อฟันในกลุ่ม Normal เนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟันมีสัดส่วนน้อยลงอย่างชัดเจน นอกจากนั้นยังพบว่าภายในท่อเนื้อฟัน มีลักษณะกลวงไม่พบผลึกแร่ธาตุหลงเหลืออยู่ภายใน ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน กลุ่ม Normal และกลุ่ม Control กลุ่ม Normal ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า:a, ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า:b, กลุ่ม Control ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า:c, ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า:d, สัญลักษณ์ลูกศรแทนบริเวณรูเปิดท่อเนื้อฟัน, สัญลักษณ์สามเหลี่ยมแทนเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน

เนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับฟลูออไรด์ กลุ่ม Fuji IX จะพบลักษณะผลึกแร่ธาตุเพียงเล็กน้อยปกคลุมบริเวณท่อเนื้อฟัน และเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน แสดงให้เห็นว่าในกลุ่ม Fuji IX มีการคืนกลับแร่ธาตุได้บ้างเป็นส่วนใหญ่ในบางบริเวณ

เนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลุ่ม Biodentine จะพบผลึกแร่ธาตุสะสมอย่างหนาแน่นและมีปริมาณมากปกคลุมทั้งบริเวณท่อเนื้อฟัน เนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน และภายในท่อเนื้อฟัน แสดงให้เห็นว่าในกลุ่ม Biodentine มีการคืนกลับแร่ธาตุได้มากกว่ากลุ่ม Fuji IX ดังภาพประกอบ 19



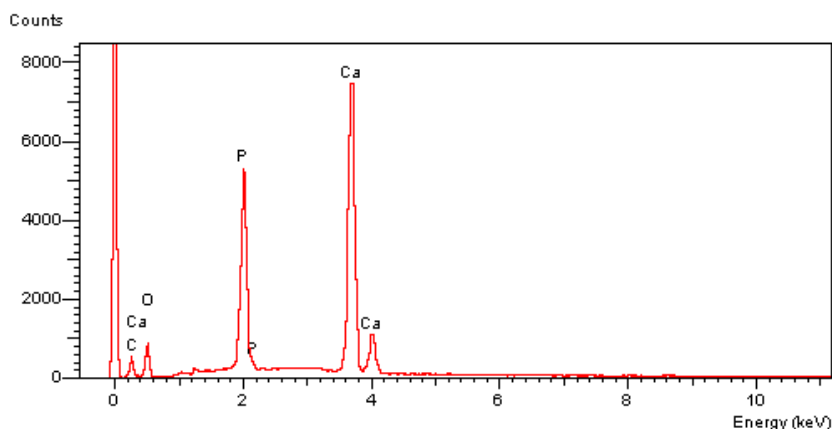
ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน กลุ่ม Fuji IX และ กลุ่ม Biodentine

กลุ่ม Fuji IX ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า:a, ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า:b, กลุ่ม Biodentine ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า:c, ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า:d, สัญลักษณ์ลูกศรแทนผลึกแร่ธาตุที่สะสมบนผิวฟัน

3.การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ

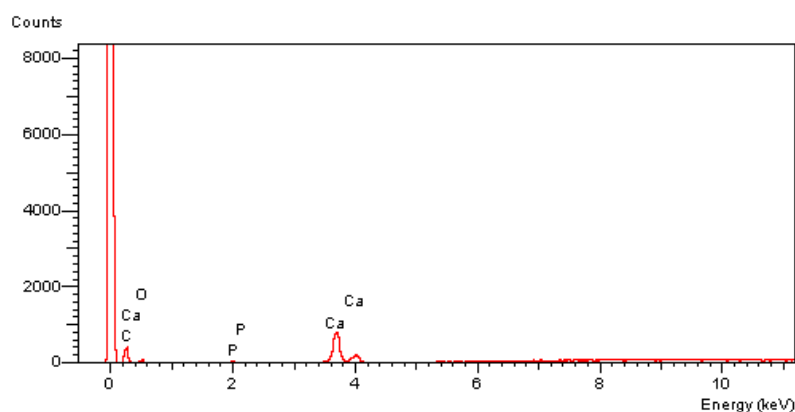
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุของเนื้อฟันทั้ง 4 กลุ่มด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพบลักษณะดังนี้

เนื้อฟันในสภาวะปกติจะมีองค์ประกอบของ แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) ในปริมาณมาก ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Normal

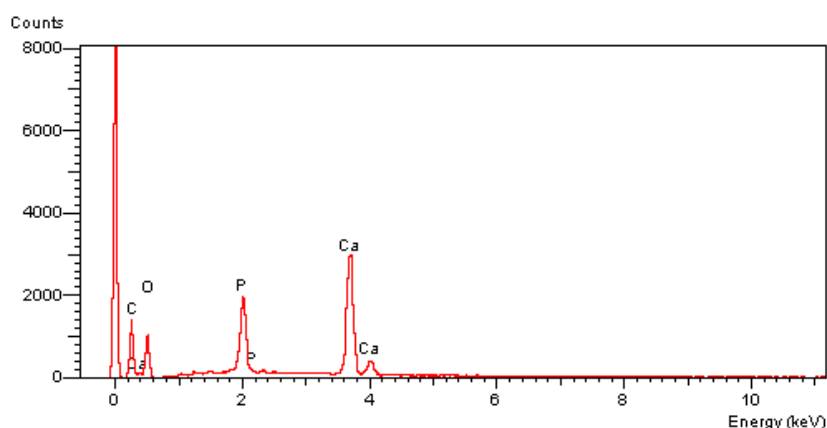
เมื่อทำการละลายแร่ธาตุด้วยกรด เนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการใช้วัสดุกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุกลุ่ม Control จะมีแคลเซียม ฟอสฟอรัส ในปริมาณน้อยลงมาก แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กรดกัด แร่ธาตุที่ละลายออกจากเนื้อฟันคือ แคลเซียม และฟอสฟอรัส โดยแร่ธาตุอื่น ๆ ยังคงมีปริมาณใกล้เคียงเดิม ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Control

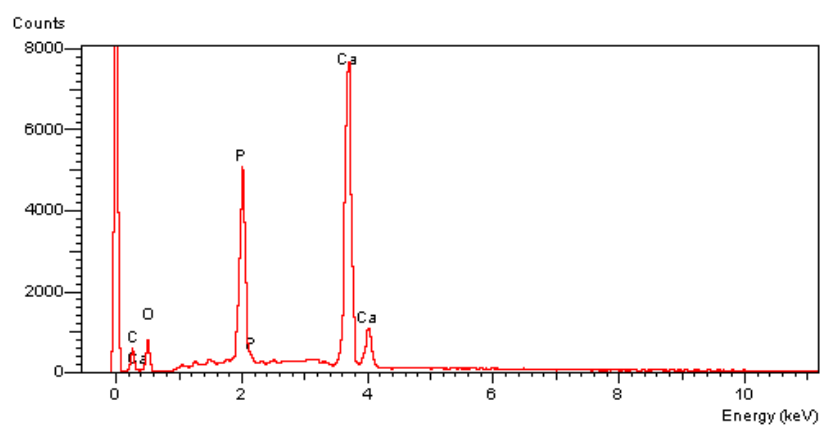
กลุ่มเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ กลุ่ม Fuji IX พบแคลเซียม ฟอสฟอรัส ในปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่ม Control แต่ปริมาณแร่ธาตุที่เพิ่มขึ้นมานี้ยังไม่สูงเท่ากับกลุ่ม Normal แสดงให้เห็นว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูจิไนน์ สามารถคืนกลับแร่ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส เข้าสู่เนื้อฟันได้

บางส่วน นอกจากนั้นในกลุ่มนี้ยังไม่พบการคืนกลับแร่ธาตุฟลูออไรด์เพิ่มมากขึ้นแต่อย่างใด ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในกลุ่ม Fuji IX

กลุ่มเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ และจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการสัมผัสกับแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลุ่ม Biodentine พบแคลเซียม ฟอสฟอรัส ในปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่ม control และปริมาณแร่ธาตุที่มากขึ้นนี้ มากกว่ากลุ่ม Fuji IX แสดงให้เห็นว่าวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนติน สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันได้ในปริมาณที่มากกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูจิไนน์ และนอกจากนี้ยังพบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถทำให้เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุ กลับมามีปริมาณแร่ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส สูงในระดับใกล้เคียงกับเนื้อฟันปกติ ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุใน กลุ่ม Biodentine



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล

ในการศึกษาเรื่องการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันมนุษย์ โดยการใช้แคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ ทางผู้วิจัยนำข้อมูลผลการวิจัยที่ได้มาประเมินและทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ จึงได้มีข้อสรุปผลการดำเนินงานแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

- 1.สรุปผลการวิจัย
- 2.อภิปรายผลการวิจัย

1.สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์และกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติของเนื้อฟันของมนุษย์ ขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้น ขั้นแรกคือการละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟันและขั้นต่อมาคือการกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันอีกครั้งด้วยวัสดุ 2 ประเภท จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลจากคุณสมบัติ 3 ประการดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล ทางผู้วิจัยจึงข้อสรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้

กลุ่ม Normal จากผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงเชิงกล พบว่าค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นมีค่ามอดุลัส 17.06 จิกะปาสคาล ซึ่งมีความแข็งแรงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับปริมาณแร่ธาตุที่อยู่ในเนื้อฟันจะพบทั้งองค์ประกอบของส่วนที่เป็นแร่ธาตุ (Mineral) ได้แก่ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัสในปริมาณมาก และส่วนออร์แกนิกเมทริกซ์ (Organic matrix) ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน และเมื่อพิจารณาจากลักษณะพื้นผิวทางกายภาพจะพบท่อเนื้อฟันกระจายตัวของท่อเนื้อฟันอย่างสม่ำเสมอ

ต่อมาเมื่อมีการละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟันแต่ไม่ได้มีการจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุ ในกลุ่ม Control พบค่ามอดุลัส 1.34 จิกะปาสคาล ซึ่งถือว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่ม Normal สอดคล้องกับปริมาณแร่ธาตุที่อยู่ในเนื้อฟันจะพบพีคของธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัสในระดับต่ำมากเมื่อเทียบกับเนื้อฟันกลุ่ม Normal แต่ยังคงพบพีคของคาร์บอน ออกซิเจน ในปริมาณใกล้เคียงเดิมสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา⁽⁴⁵⁾ ซึ่งหมายถึงสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกที่ใช้ในการละลายแร่ธาตุ สามารถละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟันได้จริงโดย จะทำหน้าที่ละลายแร่ธาตุเฉพาะในส่วนที่เป็นแร่ธาตุเท่านั้น แต่จะไม่ได้มีการละลายส่วนที่เป็นออร์แกนิกเมทริกซ์ซึ่งทำให้ยังคงเหลือส่วนของโครงข่ายคอลลาเจนส่วนที่ดีไว้ได้ สามารถ

เหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้ เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพผิวจะพบลักษณะท่อเนื้อฟัน เปิดกว้างมากขึ้นโดยไม่มีผลึกของแร่ธาตุมาปกคลุมทั้งในบริเวณเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน และภายในท่อเนื้อฟัน

เมื่อมีการจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถทำให้ค่ามอดุลัส กลับมาสูงขึ้นอยู่ที่ 9.38 จิกะปาสคาล ซึ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่ม Control จะพบพีคของธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัสในระดับที่สูงขึ้นจาก Control นอกจากนี้ยังพบผลึกแร่ธาตุหนาแน่นปกคลุมทั้งในบริเวณท่อเนื้อฟัน เนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน และภายในท่อเนื้อฟัน แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้ดี

เมื่อมีการจำลองให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ พบค่ามอดุลัส 1.69 จิกะปาสคาล ซึ่งสูงขึ้นจากกลุ่ม Control เล็กน้อยแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุจะพบพีคของธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัสมากขึ้นกว่ากลุ่ม Control แต่แร่ธาตุที่พบมีปริมาณน้อยกว่ากลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์และพบผลึกแร่ธาตุเพียงเล็กน้อยปกคลุมบริเวณท่อเนื้อฟัน และเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีผลึกแร่ธาตุปกคลุมเนื้อฟันมากกว่า แสดงให้เห็นว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ มีประสิทธิภาพในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อฟันของมนุษย์ได้ด้อยกว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

การวิจัยครั้งนี้จึงยอมรับสมมติฐานการวิจัยที่ว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อฟันของมนุษย์ที่จำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

2.อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาประสิทธิภาพของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติในเนื้อฟันของมนุษย์ที่จำลองให้สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดเปรียบเทียบกับกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ซึ่งความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุนี้จัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและโดดเด่นของการเลือกวัสดุบูรณะรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟัน⁽¹⁾

ในอดีตกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ได้รับการแนะนำให้ใช้บูรณะรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันในผู้สูงอายุ เนื่องจากมีความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่ผิวฟันได้ และมีความแนบสนิทกับโพรงฟันที่ดี เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ยังพบข้อด้อยบางประการเช่น มีการรั่วซึมบริเวณขอบรอยต่อของวัสดุ ในระยะหลังวัสดุเรซินคอมโพสิตแข็งได้รับความนิยมในการอุดรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเรซิน

คอมโพสิตยังเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกระตุ้นให้เนื้อฟันเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้และมีข้อจำกัดในเรื่องของความไวต่อความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยากเมื่อทำการบูรณะฟันผุบริเวณคอฟันในผู้สูงอายุ มีการศึกษาพบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินมีข้อดีหลายประการที่ไม่ค่อยไปกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ในเรื่องความทนทานต่อการกดอัด (Compressive strength) แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินมีค่าความแข็งแรงต่อการกดอัด 300 เมกกะพาสกาลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 28 วันรวมถึงเมื่อระยะเวลาผ่านไปความแข็งแรงก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งใกล้เคียงกับเนื้อฟันธรรมชาติที่มีค่า 297 เมกกะพาสกาล ในขณะที่กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูลิโนมีค่าเพียง 185 เมกกะพาสกาล⁽⁴⁶⁾ มีการศึกษาทางคลินิกนำแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มาบูรณะบริเวณฟันหลังพบว่าสามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวได้นานถึง 6 เดือน⁽⁴⁷⁾ ในแง่ความแข็งแรงพบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินมีความแข็งแรงระดับจุลภาค สูงกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟูลิโนและเรซินมอร์ติฟายวิทริบอนด์ Camilleri J. และคณะในปี 2013 พบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถทนต่อการถูกกัดด้วยกรดฟอสฟอริก 37 เปอร์เซ็นต์โดยไม่ทำให้ความแข็งแรงลดลง⁽⁴⁸⁾ การศึกษาการรั่วซึมของวัสดุและเนื้อฟันด้วยการแทรกซึมของซิลเวอร์ไนเตรต พบว่าการรั่วซึมบริเวณผนังด้านเหงือก ในโพรงฟันชนิดคลาสสิก กลุ่มที่อุดด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินมีระดับการรั่วซึมน้อยกว่ากลุ่มที่อุดด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟูลิโนแอลซี⁽³⁾ จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นแม้จะยังไม่มากพอที่จะเชื่อได้ว่าในปัจจุบันแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถนำมาเป็นวัสดุบูรณะแทนกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ได้ แต่แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ก็มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการไม่ค่อยไปกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ทั้งในแง่ของความแข็งแรงที่สูงเพียงพอ มีความแนบสนิทกับโพรงฟันอยู่ในเกณฑ์ดี และความสามารถในการคืนกลับแร่ธาตุที่อาจจะดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์⁽⁴⁹⁾

การศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุที่ผ่านมานิยมออกแบบการทดลองให้เนื้อฟันและวัสดุที่ทดสอบ ถูกล้อมรอบด้วยสารละลายที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ ซึ่งในทางปฏิบัติสิ่งแวดล้อมดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงเนื่องจาก เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุบริเวณชั้นไฮบริดและเนื้อฟันบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ จะถูกอุดปิดด้วยวัสดุบูรณะ ทำให้เนื้อฟันส่วนนั้นไม่มีโอกาสสัมผัสกับสารละลายที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ได้ โดยจะสัมผัสได้เพียงส่วนขอบรอยต่อโพรงฟันและวัสดุบูรณะที่เรียกว่า Cavosurface margin เท่านั้น ดังนั้นการใช้สารคืนกลับแร่ธาตุประเภทใช้เฉพาะที่เช่น การใช้ฟลูออไรด์หรือสารอื่น ๆ เคลือบเฉพาะบริเวณผิวฟันด้านนอก ไม่สามารถส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้⁽¹⁰⁾ ในระยะหลังนักวิจัยเชื่อว่าวิธีที่จะสามารถนำความรู้

เรื่องการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อพืชนั้นด้วยแนวคิดนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์และใกล้เคียงกับสถานการณ์ทางคลินิกมากที่สุดคือ การนำแนวคิดนี้มาใช้ในรูปแบบของวัสดุปุฐุณะ หรือนำมาใช้ร่วมกับสารยึดติดที่ใช้ในการบูรณะฟันบริเวณดังกล่าว^(38, 45, 50)

พบว่าการใช้วัสดุที่มีความสามารถในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติมาเป็นวัสดุปุฐุณะในบริเวณตัวฟัน ดังเช่นไบโอเดนทิน หรือใช้เป็นวัสดุที่อุดในคลองรากฟันเช่นมินเอร์ลไตรออกไซด์แอกกรีเกต, พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีข้อดีคือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นใหม่นั้นจะแทรกตัวอยู่ระหว่างรอยต่อของวัสดุและเนื้อฟันส่งผลให้วัสดุมีความแนบสนิทกับเนื้อได้ดียิ่งขึ้น^(3, 51) ผลดังกล่าวยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดบริเวณรอยต่อวัสดุถูกทำลายจากสภาวะแวดล้อมโดยรอบและสามารถป้องกันการเกิด Hydrolysis ในอนาคตได้อีกด้วย⁽⁴⁹⁾ ในระยะแรกนิยมทำการศึกษาในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และมินเอร์ลไตรออกไซด์แอกกรีเกต^(10, 52, 53) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นฐานหลักประกอบด้วยซิลิเกตซีเมนต์สามารถปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาก่อตัว แต่ปัญหาของมินเอร์ลไตรออกไซด์แอกกรีเกต คือใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างนานถึง 2 ชั่วโมง 45 นาที⁽²⁸⁾ ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำมาเป็นวัสดุปุฐุณะบริเวณคอฟัน ทางผู้วิจัยเลือกใช้ไบโอเดนทิน ในการศึกษาครั้งนี้เพราะไบโอเดนทิน มีองค์ประกอบหลักใกล้เคียงกับมินเอร์ลไตรออกไซด์แอกกรีเกต มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีและมีระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นกว่าเพียง 12 นาทีจึงมีความเหมาะที่จะนำมาเป็นวัสดุปุฐุณะคอฟันได้ดีกว่า

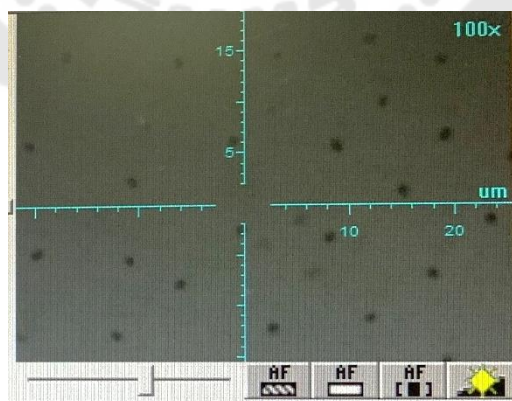
การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติมีข้อดีเหนือกว่าการคืนกลับแร่ธาตุด้วยวิธีอื่นเพราะเป็นวิธีที่สามารถทำให้เนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด เกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ โดยระดับการคืนกลับแร่ธาตุที่เกิดขึ้นในครั้งนั้นเกิดได้ลึกถึง 300 ไมโครเมตร⁽⁸⁾ การคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดนี้สามารถคืนกลับแร่ธาตุในชั้นเนื้อฟันได้อย่างสมบูรณ์ทั้งบริเวณด้านนอกเส้นใยคอลลาเจน และบริเวณด้านในเส้นใยคอลลาเจน⁽⁵⁾ และมีระดับการคืนกลับแร่ธาตุที่มากกว่าแนวคิดอื่น กระบวนการเลียนแบบการคืนกลับแร่ธาตุ ต้องมีองค์ประกอบครบทั้ง 3 ประการ คอลลาเจนเมทริกซ์ที่เผยแพร่ซึ่งได้จากเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุ, สารที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแคลเซียมฟอสเฟตโดยอาจจะอยู่ในรูปสารละลายหรือวัสดุที่นำมาทดสอบ และสารที่ทำหน้าที่เลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน ทำหน้าที่ควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์⁽¹⁰⁾ ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดการทดลองให้มีองค์ประกอบครบทั้ง 3 ประการเช่นกัน ประการแรกคอลลาเจนเมทริกซ์ที่เผยแพร่จากเนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุโดยการแช่ในสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกความเข้มข้น 17 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งมีรายงานระบุว่าวิธีนี้สามารถละลายธาตุได้ทั้งหมด โดยไม่มีการทำลายส่วนออร์แกนิกเมทริกซ์

ทำให้ยังคงเหลือโครงข่ายคอลลาเจนเผยผิ่ที่สมบูรณ์และยังคงสภาพคอลลาเจน Cross-link สภาพดีไว้ได้^(11, 38) ประการที่สองมีวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินและกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออไรด์ทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแคลเซียมฟอสเฟต ประการสุดท้ายคือมีการใส่กรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิกและกรดโพลีอคริลิก ซึ่งเป็นสารเลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน ใช้อัตราส่วนในการผสมที่ได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเลียนแบบการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้ดีที่สุดในระยะเวลา 8 สัปดาห์⁽¹⁰⁾

การคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ เป็นกระบวนการสร้างผลึกอะพาไทต์เข้าสู่เนื้อฟันอีกครั้ง ซึ่งผลึกอะพาไทต์มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมและฟอสเฟต ดังนั้นการคืนกลับแร่ธาตุด้วยวิธีนี้จึงเป็นกระบวนการสร้างผลึกสารตั้งต้นแคลเซียม-ฟอสเฟตขนาดเล็กแทรกระหว่างเส้นใยคอลลาเจนโมเลกุล⁽¹⁰⁾ การจะเกิดผลึกอะพาไทต์ได้นั้นจะต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม กล่าวคือเนื้อฟันจะต้องอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือต่าง⁽⁵⁴⁾ ในการทดลองนี้มีการปรับให้สารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางด้วยเช่นกัน สภาวะแวดล้อมอีกอย่างคือต้องมีปริมาณแคลเซียม ฟอสเฟตขนาดเล็กระดับนาโนในปริมาณที่มากเพียงพอ ในการทดลองนี้อ้างอิงผลการศึกษาของ Gandolfi MG และคณะในปี 2011 ในการกำหนดปริมาณสารละลายที่ใช้ตามน้ำหนักของไบโอเดนทินและกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ซึ่งการใช้สารละลายตามสัดส่วนดังกล่าวจะทำให้ปริมาณฟอสเฟตในสารละลายมีมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่ปล่อยออกมาจากซีเมนต์เกิดเป็นสารตั้งต้นอะพาไทต์ (ACP precursor) ได้⁽³⁸⁾ สารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุในการทดลองนี้ประกอบด้วยสารละลายฟอสเฟตที่ไม่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ เพื่อป้องกันการเกิดสารตั้งต้นอะพาไทต์ขึ้นเองในสารละลาย เมื่อแช่เนื้อฟันและวัสดุทดสอบในสารละลาย วัสดุทดสอบใดที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้ จะมีการปล่อยไอออนของแคลเซียมและไอออนนั้นจะมีการทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับฟอสเฟตในสารละลายเกิดผลึกอะพาไทต์ขึ้นใหม่ได้ อ้างอิงผลการวิเคราะห์แร่ธาตุที่ควรจะมีพีคของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเนื้อฟันเพิ่มขึ้น และจากผลลักษณะพื้นผิวทางกายภาพควรจะต้องมีการตกตะกอนผลึกบนผิวเนื้อฟัน เมื่อพิจารณาปัจจัยโดยรวมหากผลึกที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวในชั้นเนื้อฟันทั้งบริเวณด้านในเส้นใยคอลลาเจน และด้านนอกเส้นใยคอลลาเจน อย่างถูกต้องเป็นระเบียบและปริมาณมากเพียงพอเนื้อฟันนั้นควรจะมี ความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นตามไปด้วย⁽¹²⁾

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างมีระบบของ Taha AA. และคณะในปี ค.ศ. 2017 พบว่า 3 วิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุคือ การทดสอบความแข็งแรง

การศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ⁽³⁷⁾ ผู้วิจัยจึงศึกษาประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุด้วยคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเช่นกัน โดยการทดสอบความแข็งแรงผิวเลือกใช้การทดสอบความแข็งแรงในระดับนาโน เพราะเป็นวิธีที่สามารถหาค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการแปลผลข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการทดสอบความแข็งแรงในระดับไมโคร เนื่องจากการแปลผลผ่านเครื่องมือเดปเซนซึ่งอินเดนเตชัน อีกประการคือก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงผิวระดับนาโนชิ้นงานจะถูกส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) กำลังขยายสูงถึง 100 เท่า ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของบริเวณท่อนเนื้อฟันและเนื้อฟันระหว่างท่อนเนื้อฟัน ได้อย่างชัดเจนดังภาพประกอบ 24 เพื่อความแม่นยำในการทดสอบค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันหัตถ์ควรจะต้องกดในตำแหน่งเดิมและมีความแม่นยำในทุกครั้งที่ออกแรงกด กล่าวคือควรจะต้องกดในบริเวณเนื้อฟันระหว่างท่อนเนื้อฟันเท่านั้น⁽¹²⁾ เนื่องจากมีรายงานระบุว่า บริเวณเนื้อฟันระหว่างท่อนเนื้อฟันมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic elasticity) การกดบริเวณนี้จะให้ผลคงที่และถูกต้องมากกว่า⁽⁵⁵⁾ ในทางกลับกันหากใช้เครื่องมือที่ไม่สามารถเลือกบริเวณที่กดได้ บางครั้งอาจจะกดโดนบริเวณที่เป็นรูเปิดท่อนเนื้อฟัน ส่งผลให้การอ่านค่าผิดไปจากความเป็นจริง นอกจากนี้ชิ้นงานที่จะส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจำเป็นต้องมีระดับความสูงต่ำ (Roughness) ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร การขัดชิ้นงานจึงมีความละเอียดซับซ้อนจะต้องมีการใช้กระดาษทรายร่วมกับผงขัดความละเอียดสูงและใช้ระมัดระวังในการขัด



ภาพประกอบ 24 แสดงภาพชิ้นงานภายใต้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม สามารถแยกความแตกต่างระหว่างท่อนเนื้อฟันและเนื้อฟันระหว่างท่อนเนื้อฟันได้ เส้นสีฟ้าแสดงตำแหน่งที่หัตถ์จะทำการกดชิ้นงาน

มีรายงานระบุว่าแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจนมีบทบาทสำคัญ 2 ประการ ประการแรกคือช่วยให้พื้นต้านทานต่อการถูกทำลายด้วยกรด ประการต่อมาคือเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงเชิงกลของคอลลาเจนในเนื้อฟันส่วนนั้น ๆ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจนมีผลต่อค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันทั้งหมด ทั้งนี้เป็นเพราะการที่เนื้อฟันไม่มีแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจนจะทำให้เมทริกซ์ส่วนนั้นมีการเรียงตัวแบบหลวม ๆ มีช่องว่างเกิดขึ้น น้ำจะเข้ามาแทรกซึมในบริเวณช่องว่างดังกล่าวทำให้เนื้อฟันดูดน้ำและบวมน้ำมากกว่าปกติ เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลค่าที่ได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ในทุกครั้งที่มีการคืนกลับแร่ธาตุ หากการคืนกลับแร่ธาตุครั้งนั้นเกิดขึ้นโดยไม่สามารถคืนแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจนได้ จะไม่สามารถทำให้ความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันสูงขึ้นแม้ว่าจะมีปริมาณแร่ธาตุในส่วนอื่น ๆ มากขึ้นก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าปริมาณแร่ธาตุในเนื้อฟันที่มากขึ้นเพียงอย่างเดียวไม่ว่าแร่ธาตุจะสะสมอยู่ในส่วนใดก็ไม่สามารถทำให้เนื้อฟันมีความแข็งแรงมากขึ้นได้ จำเป็นจะต้องมีแร่ธาตุส่วนที่เกิดพันธะเคมีกับคอลลาเจนโมเลกุลรวมด้วยเนื้อฟันจึงจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้⁽⁵⁾ ดังนั้นการใช้ความแข็งแรงเชิงกลจึงเป็นวิธีที่สามารถประเมินประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุได้ดี

Bertassoni LE และคณะในปี 2011 ศึกษาประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันด้วยการใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงระดับนาโน ด้วยการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นพบว่าในเนื้อฟันปกติมีค่ามอดุลัสประมาณ 21 จิกะปาสคาล เมื่อละลายแร่ธาตุออกจากเนื้อฟันจะทำให้ค่ามอดุลัสลดต่ำลงเหลือ น้อยกว่า 1 จิกะปาสคาล จากนั้นทำการคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันด้วยการแช่ในสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถทำให้ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นกลับมามีค่าสูงขึ้นอีกครั้งโดยมีค่าประมาณ 5 จิกะปาสคาล⁽¹²⁾ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของผู้วิจัยที่ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือในเนื้อฟันปกติมีค่ามอดุลัสสูงที่สุด เมื่อมีการละลายแร่ธาตุออกค่ามอดุลัสมีค่าลดลง และเมื่อกระตุ้นให้เนื้อฟันคืนกลับแร่ธาตุด้วยแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ทำให้ค่ามอดุลัสมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง แต่ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นอาจจะแตกต่างกันเนื่องจากการใช้สารละลายต่างและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟันพบว่าการทดลองครั้งนี้มีการเกิดผลึกแร่ธาตุเฉพาะในกลุ่มแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์แร่ธาตุที่เกิดขึ้นมีทั้งบริเวณท่อนเนื้อฟัน เนื้อฟันระหว่างท่อนเนื้อฟัน และภายในท่อนเนื้อฟัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Atmeh AR. ในปี 2014 ที่ศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุโดยสมบูรณ์ด้วยการใช้แคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินและกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออไรด์ โดยมีขั้นตอนการทดลองที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยครั้งนี้ ใช้การวิเคราะห์ผลด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence

microscope). ผลการศึกษาพบว่าเฉพาะเนื้อฟันที่สัมผัสกับแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนตินเท่านั้นที่มีแร่ธาตุเกิดขึ้น มีการตรวจพบในตำแหน่งเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน และภายในท่อเนื้อฟันเช่นเดียวกัน⁽⁴⁹⁾ ในขณะที่เนื้อฟันในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออไรด์ต่างก็ไม่พบการสะสมแร่ธาตุเกิดขึ้นเช่นกันในทั้งสองการทดลอง แม้ทั้งสองการทดลองจะมีวิธีการใช้เครื่องมือตรวจสอบแร่ธาตุที่แตกต่างกัน แต่ผลที่ได้พบว่ามีแร่ธาตุสะสมในตำแหน่งเดียวกัน

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุของเนื้อฟันพบว่าในการทดลองครั้งนี้มีเฉพาะกลุ่ม Biodentine และกลุ่ม Normal ที่พบแคลเซียมและฟอสฟอรัส ในกลุ่ม Normal การพบฟอสฟอรัสของแร่ธาตุดังกล่าวเป็นการแสดงให้เห็นว่าเนื้อฟันในภาวะปกติจะมีองค์ประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัสอยู่แล้ว เมื่อคืนกลับแร่ธาตุด้วยแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนตินสามารถตรวจพบฟอสฟอรัสและแคลเซียมได้อีกครั้งแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์สามารถทำให้มีผลึกอะพาไทต์มาสะสมบนเนื้อฟันได้ใหม่ สอดคล้องกับการทดลองของ Atmeh AR ในปี 2014 ที่ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุด้วยการใช้รามานสเปกโตรสโคปี ผลการวิเคราะห์ออกมาในทิศทางเดียวกันคือในฟันธรรมชาติ มีการตรวจพบความยาวคลื่นฟอสเฟตใน 4 ช่วง ความยาวคลื่นสเปกตรัม กลุ่มแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนตินก็สามารถตรวจพบความยาวคลื่นฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างอะพาไทต์ใหม่ได้ นอกจากนี้พบว่าลักษณะช่วงความยาวคลื่นฟอสเฟตที่ตรวจพบแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนตินมีลักษณะเดียวกับช่วงความยาวคลื่นที่ตรวจพบในฟันธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของฟอสเฟตที่เกิดขึ้นใหม่นี้ คือฟอสเฟตที่เป็นองค์ประกอบเดียวกันกับผลึกอะพาไทต์ที่ตรวจพบในฟันธรรมชาติ⁽⁴⁹⁾ มิใช่ฟอสเฟต-แคลเซียมที่เกิดจากการรวมตัวในโครงสร้างแบบอื่น เช่น โครงสร้างที่ไม่สามารถระบุปร่างการเรียงตัวได้ (Amorphous calciumphosphate) หรือโครงสร้างรูปแปดเหลี่ยม (Octacalciumphosphate) เป็นต้น แต่เมื่อพิจารณาการคืนกลับแร่ธาตุด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์กลับไม่พบความยาวคลื่นฟอสเฟตในกลุ่มเนื้อฟันที่สัมผัสกับแผ่นวัสดุฟลูออไรด์เช่นเดียวกันกับการวิจัยครั้งนี้ เป็นการยืนยันว่ากลาสไอโอโนเมอร์ชนิดฟลูออไรด์ไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติ

ผลการทดลองครั้งนี้พบว่าแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ มีความสามารถในการกระตุ้นให้เนื้อฟันเกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้เป็นอย่างดีจากทั้งผลในด้านค่าความแข็งระดับนาโนและองค์ประกอบแร่ธาตุของเนื้อฟันที่พบฟอสฟอรัส-แคลเซียมมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงมีลักษณะการเกิดผลึกแร่ธาตุบริเวณเนื้อฟันอย่างชัดเจน ในขณะที่กลาสไอ

ไอโอโนเมอร์กลับไม่พบลักษณะการสะสมแร่ธาตุบนเนื้อฟัน และผลการวิเคราะห์แร่ธาตุพบปริมาณแคลเซียม-ฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่นที่มีค่าน้อยไม่ต่างกับกลุ่ม Control แสดงให้เห็นว่ากลาสไอโอโนเมอร์มีบทบาทในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติอย่างไม่เด่นชัด กล่าวคือในการวิจัยนี้กลาสไอโอโนเมอร์ไม่สามารถกระตุ้นให้เนื้อฟันสร้างผลึกอะพาไทต์ใหม่ขึ้นมาได้ ทำให้ความค่ามอดุลัสสภาพยึดหยุ่นไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Atmeh AR. ในปี 2015⁽⁴⁹⁾ และการทดลองของ Kim YK. ในปี 2010⁽⁵⁶⁾ ที่พบว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ไม่สามารถกระตุ้นให้เนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดเกิด อะพาไทต์ใหม่ขึ้นมาได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการคืนกลับแร่ธาตุของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ต้องอาศัยการตกตะกอนล้อมรอบผลึกแร่ธาตุเดิมโดยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ระหว่างสตรอนเทียม (Sr^{2+}) จากกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และแคลเซียมในเนื้อฟันที่เหลืออยู่ซึ่งจัดเป็นเนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุไปเพียงบางส่วน

ในทางกลับกันการทดลองบนเนื้อฟันที่มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมดพบว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์สามารถคืนแร่ธาตุประเภท สตรอนเทียม อะลูมิเนียม เข้าสู่ผิวเนื้อฟันได้มากโดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวรอยต่อของวัสดุและเนื้อฟันที่ระดับไม่เกิน 10 ไมครอน แต่พบแร่ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเนื้อฟันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย⁽⁵⁶⁾ สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ ที่พบพีคของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเนื้อฟันกลุ่ม Fuji IX เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นกัน อธิบายได้จากเข้มข้นของแร่ธาตุใน 2 พื้นผิวมีความแตกต่างกัน (Ion concentration gradient) กล่าวคือในฝั่งกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ที่มีการก่อตัวแล้วจะพบไอออนของ สตรอนเทียม อะลูมิเนียม แคลเซียม และฟอสฟอรัสค่อนข้างมาก ในขณะที่พื้นผิวเนื้อฟันไม่มีแร่ธาตุดังกล่าวสะสมอยู่จึงทำให้แร่ธาตุเกิดการเคลื่อนย้ายจากพื้นผิวที่มีความเข้มข้นมากกว่ามาสู่พื้นผิวที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า⁽⁵⁷⁾ จึงทำให้สามารถพบพีคของแคลเซียม และฟอสฟอรัสขึ้นเล็กน้อยในการทดลองครั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณฟลูออไรด์ไอออน ในการทดลองนี้กลุ่ม Fuji IX กลับไม่พบพีคของฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด สอดคล้องกับการศึกษาของ Knight GM. ในปี 2007 ที่พบว่าแม้ว่ากลาสไอโอโนเมอร์ชนิด Ketac Molar ที่ก่อตัวแล้วจะสามารถปล่อยฟลูออไรด์สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณสูงที่สุดในบรรดากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ทั้งหมด แต่ฟลูออไรด์เหล่านั้นกลับไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อฟันที่ผ่านการละลายแร่ธาตุออกเพียงบางส่วนได้⁽⁵⁷⁾ นอกจากนี้ยังพบว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์สามารถทำให้มีแร่ธาตุสะสมได้เฉพาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น (Hypermineral) ซึ่งคุณสมบัติการสะสมแร่ธาตุบนผิวฟันของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะเหนี่ยวนำให้ เกิดการสร้าง

ผลึกอะพาไทต์ใหม่ในโครงข่ายโมเลกุลคอลลาเจนได้ จึงเป็นการยืนยันว่ากลาสไฮโอโนเมอร์ซีเมนต์ไม่สามารถเกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้^(54, 58)

แม้ว่าจากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินจะมีความสามารถในการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติได้ดีกว่ากลาสไฮโอโนเมอร์ซีเมนต์ และมีข้อบ่งชี้ให้ใช้เป็นวัสดุทดแทนเนื้อฟันที่ได้รับความเสียหายได้ทั้งส่วนตัวฟันและรากฟัน แต่วัสดุประเภทนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในทางทันตกรรมบูรณะเท่าที่ควรอันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดคือมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มอื่นที่สามารถทดแทนเนื้อฟันได้ในลักษณะเดียวกัน และมีราคาที่สูง การเลือกใช้งานวัสดุกลุ่มนี้จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่มีข้อควรพิจารณาเลือกใช้เป็นกรณีพิเศษ เช่นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุบูรณะในผู้ป่วยกลุ่มผู้สูงอายุที่มีความเสี่ยงในการเกิดรอยโรคฟันผุบริเวณคอฟันได้ง่าย กลุ่มผู้ป่วยในชนบทที่มีโอกาสเข้ารับการรักษาทันตกรรมไม่มากนัก โดยหวังผลให้วัสดุช่วยคืนกลับแร่ธาตุเข้าสู่เนื้อฟันและลดการลุกลามของรอยโรคฟันผุ มีการศึกษาพบว่าแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ชนิดไบโอเดนทินสามารถใช้งานเป็นวัสดุบูรณะชั่วคราวทดแทนโครงสร้างฟันที่เสียหายทั้งส่วนเคลือบฟันและเนื้อฟันบริเวณฟันหลังได้นานถึง 6 เดือน⁽⁴⁷⁾

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ จึงไม่สามารถจำลองสภาพจริงที่เกิดขึ้นทางคลินิกได้ทั้งหมด เช่น องค์ประกอบและความเป็นกรด-ด่างของน้ำลาย ความสามารถในการสะท้อนกรดของน้ำลาย การแพร่กระจายแรงการคืนกลับแร่ธาตุที่มีส่วนประกอบของกรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิกและกรดโพลีอคริลิก ซึ่งในสภาวะจริงทางคลินิกน้ำลายไม่มีองค์ประกอบของสารดังกล่าว มีศึกษาพบว่าการใช้แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุในธรรมชาติขึ้นได้เองโดยไม่จำเป็นต้องใช้กรดดังกล่าว แต่การใช้กรดโพลีไวนิลฟอสฟอนิกและกรดโพลีอคริลิกจะเป็นการเลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนส่งผลช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการคืนกลับแร่ธาตุเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น⁽¹⁰⁾ อย่างไรก็ตามในอนาคตการพัฒนาแนวคิดการนำวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุบูรณะควรจะได้รับการศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่นการเตรียมเนื้อฟันก่อนการบูรณะให้เหมาะสมรวมถึงการปรับสภาพเนื้อฟันให้มีประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุที่ดีขึ้นด้วยการใช้สารเลียนแบบการทำงานของโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนมาใช้ร่วมกับการบูรณะเป็นต้น ศึกษาความสามารถในการยึดติดกับโพรงฟัน ความหยาบผิว (Surface roughness) ของวัสดุภายหลังการขัด

บรรณานุกรม

1. Billings RJ BL, Kaster AG. Contemporary treatment strategies for root surface dental caries. *Gerodontology*. 1985; 1(1): 20-7.
2. Namgung CR, Y.J.; Jin, B.H.; Lim, B.S.; Cho, B.H. A Retrospective Clinical Study of Cervical Restorations: Longevity and Failure-Prognostic Variables. *Operative Dentistry*. 2013; 38-4: 376-85.
3. Raskin A EG, Dejou J et al. In Vitro Microleakage of Biodentine as a Dentin Substitute Compared to Fuji II LC in Cervical Lining Restorations. *Journal of Adhesive Dentistry*. 2012; 14: 535-42.
4. Zhao W WJ, Zhai W, Wang Z, Chang J. The self-setting properties and in vitro bioactivity of tricalcium silicate. *Biomaterials*. 2005; 26: 6113-21.
5. Bertassoni LE, Habelitz S, Kinney JH, Marshall SJ, Marshall Jr GW. Biomechanical Perspective on the Remineralization of Dentin. *Caries Research*. 2009; 43(1): 70-7.
6. Niu L-N, Zhang W, Pashley DH, Breschi L, Mao J, Chen J-H, et al. Biomimetic remineralization of dentin. *Dental Materials*. 2014; 30(1): 77-96.
7. Scholtanus JD, Purwanta K, Dogan N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Microtensile bond strength of three simplified adhesive systems to caries-affected dentin. *Journal of Adhesive Dentistry*. 2010; 12(4): 273-8.
8. Mai S, Kim YK, Kim J, Yiu CKY, Ling J, Pashley DH, et al. In vitro Remineralization of Severely Compromised Bonded Dentin. *Journal of Dental Research*. 2010; 89(4): 405-10.
9. Tay FR, Pashley DH, Rueggeberg FA, Loushine RJ, Weller RN. Calcium Phosphate Phase Transformation Produced by the Interaction of the Portland Cement Component of White Mineral Trioxide Aggregate with a Phosphate-containing Fluid. *Journal of Endodontics*. 2007; 33(11): 1347-51.
10. Tay FR, Pashley DH. Guided tissue remineralisation of partially demineralised human dentine. *Biomaterials*. 2008; 29(8): 1127-37.
11. Cao C, Mei M, Li Q-L, Lo E, Chu C. Methods for Biomimetic Remineralization of

Human Dentine: A Systematic Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015; 16(3): 4615-27.

12. Bertassoni LE, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. Mechanical recovery of dentin following remineralization in vitro — An indentation study. *Journal of Biomechanics*. 2011; 44(1): 176-81.

13. Effect of Setting Time on the Shear Bond Strength Between Biodentine and Composite [database on the Internet]2015.

14. Combes C, Cazalbou S, Rey C. Apatite Biominerals. *Minerals*. 2016; 6(2): 34.

15. Zenobio MAF, Tavares MSN, Zenobio EG, Silva TA. Elemental composition of dental biologic tissues: study by means of different analytical techniques.(Report). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2011; 289(1): 161.

16. Boskey AL. Amorphous Calcium Phosphate: The Contention of Bone. *Journal of Dental Research*. 1997; 76(8): 1433-6.

17. Katz EP, Li S-T. Structure and function of bone collagen fibrils. *Journal of Molecular Biology*. 1973; 80(1): 1-15.

18. Balooch M, Habelitz S, Kinney JH, Marshall SJ, Marshall GW. Mechanical Properties of Mineralized Collagen Fibrils As Influenced By Demineralization. *J Struct Biol* 162:404,2008. 2009; 162(3).

19. Bertassoni L, Orgel J, Antipova O, Swain M. The dentin organic matrix - limitations of restorative dentistry hidden on the nanometer scale. *Acta Biomaterialia*. 2012; 8(7): 2419-33.

20. Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, Dorigo E. Dental adhesion review: Aging and stability of the bonded interface. *Dental Materials*. 2008; 24(1): 90-101.

21. Fusayama T TS. Differentiation of two layers of carious dentin by staining. *Journal of dental research*. 1972; 51: 866.

22. Kata R-G, Kristina P, Ivana Š, Krešimir B. The cariostatic mechanisms of fluoride. *Acta Medica Academica*. 2013; 42(2): 179-88.

23. RK R. Effects of an anticariogenic casein phosphopeptide on calcium diffusion in

streptococcal model dental plaques. *Arch Oral Biol.* 2000; 45(7): 569-75.

24. Sangamesh B. AK. Iatrogenic effects of Orthodontic treatment –

Review on white spot lesions. *International Journal of Scientific & Engineering Research.* 2011; 2(5): 1-7.

25. Tanumiharja M, Burrow MF, Cimmino A, Tyas MJ. The evaluation of four conditioners for glass ionomer cements using field-emission scanning electron microscopy. *Journal of Dentistry.* 2001; 29(2): 131-8.

26. Andersson-Wenckert IE1 vDJ, Kieri C. Durability of extensive Class II open-sandwich restorations with a resin-modified glass ionomer cement after 6 years. *Am J Dent.* 2004; 17(1): 43-50.

27. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review—Part I: Chemical, Physical, and Antibacterial Properties. *Journal of Endodontics.* 2010; 36(1): 16-27.

28. Asgary S, Shahabi S, Jafarzadeh T, Amini S, Kheirieh S. The Properties of a New Endodontic Material. *Journal of Endodontics.* 2008; 34(8): 990-3.

29. Koubi S, Elmerini H, Koubi G, Tassery H, Camps J. Quantitative Evaluation by Glucose Diffusion of Microleakage in Aged Calcium Silicate-Based Open-Sandwich Restorations. *International Journal of Dentistry.* 2012.

30. Küçükkaya S, Görduysus MÖ, Zeybek ND, Müftüoğlu SF. Cytotoxicity of Calcium Silicate-Based Endodontic Cement as Root-End Filling Materials. *Scientifica.* 2016; 2016.

31. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement Interfacial Interaction: Calcium Silicates and Polyalkenoates. *Journal of Dental Research.* 2012; 91(5): 454-9.

32. Andersen M LA, Andreasen JO, Andreasen FM. In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *Endod Dent Traumatol.* 1992; 8(3): 104-8.

33. Liu Y, Mai S, Li N, Yiu CKY, Mao J, Pashley DH, et al. Differences between top-down and bottom-up approaches in mineralizing thick, partially demineralized collagen scaffolds. *Acta Biomaterialia.* 2011; 7(4): 1742-51.

34. Fan Y, Sun Z, Moradian-Oldak J. Controlled remineralization of enamel in the presence of amelogenin and fluoride. *Biomaterials*. 2009; 30(4): 478-83.
35. Shen C, Zhang NZ, Anusavice KJ. Fluoride and Chlorhexidine Release from Filled Resins. *Journal of Dental Research*. 2010; 89(9): 1002-6.
36. Xu HHK, Moreau JL, Sun L, Chow LC. Nanocomposite containing amorphous calcium phosphate nanoparticles for caries inhibition. *Dental Materials*. 2011; 27(8): 762-9.
37. Taha AA, Patel MP, Hill RG, Fleming PS. The effect of bioactive glasses on enamel remineralization: A systematic review. *Journal of Dentistry*. 2017; 67: 9-17.
38. Gandolfi MG, Taddei P, Siboni F, Modena E, De Stefano ED, Prati C. Biomimetic remineralization of human dentin using promising innovative calcium-silicate hybrid "smart" materials. *Dental Materials*. 2011; 27(11): 1055-69.
39. Imbeni V, Kruzic JJ, Marshall GW, Marshall SJ, Ritchie RO. The dentin-enamel junction and the fracture of human teeth. *Nature materials*. 2005; 4(3): 229.
40. Gunnar Ryge DEF, Carl W. Fairhurst. Micro-indentation Hardness. *J Dent Res*. 1960; 40: 1116-26.
41. Craig RG PJ. Restorative dental material. 11 ed. St Louis: Mosby-Year Book Inc; 2002.
42. Willems G CJ, Lambrechts P, Braem M, Vanherle G. Hardness and Young's modulus determined by nanoindentation technique of filler particles of dental restorative materials compared with human enamel. *J Biomed Mater Res*. 1993; 27(6): 747-55.
43. Toparli M, Koksall NS. Hardness and yield strength of dentin from simulated nano-indentation tests. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2005; 77(3): 253-7.
44. Romeed S, Malik R, Dunne S. Stress Analysis of Occlusal Forces in Canine Teeth and Their Role in the Development of Non-Carious Cervical Lesions: Abfraction. *International Journal of Dentistry*. 2012; 2012(2012).
45. Daneshpoor N, Pishavar L. Comparative evaluation of bioactive cements on biomimetic remineralization of dentin. *Journal of clinical and experimental dentistry*. 2020; 12(3): e291.

46. Bachoo IK, Seymour D, Brunton P. A biocompatible and bioactive replacement for dentine: is this a reality? The properties and uses of a novel calcium-based cement. *BDJ*. 2013; 214(2): E5.
47. Koubi G, Colon P, Franquin J-C, Hartmann A, Richard G, Faure M-O, et al. Clinical evaluation of the performance and safety of a new dentine substitute, Biodentine, in the restoration of posterior teeth — a prospective study. *Clinical Oral Investigations*. 2013; 17(1): 243-9.
48. Camilleri J, Sorrentino F, Damidot D. Investigation of the hydration and bioactivity of radiopacified tricalcium silicate cement, Biodentine and MTA Angelus. *Dental materials* : official publication of the Academy of Dental Materials. 2013; 29(5): 580.
49. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Boyde A, Festy F, Watson TF. Calcium silicate cement-induced remineralisation of totally demineralised dentine in comparison with glass ionomer cement: tetracycline labelling and two-photon fluorescence microscopy. *Journal of Microscopy*. 2015; 257(2): 151-60.
50. Suprastiwi E, Putranto AW, Maharti LD. The Ability of Biodentine™ of Guided Tissue Remineralization (GTR): Analysis Using SEM, EDX and TEM *Pesqui Bras Odontopediatria Clin Integr*. 2019; 1(19): 1-8.
51. Weller R, Tay K, Garrett L. Microscopic appearance and apical seal of root canals filled with gutta-percha and ProRoot Endo Sealer after immersion in a phosphate-containing fluid. *International Endodontic Journal*. 2008; 41: 977-86.
52. 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. *Journal of endodontics*. 2009; 35(5): 731-6.
53. Gu L, Kim YK, Liu Y, Ryou H, Wimmer CE, Dai L, et al. Biomimetic Analogs for Collagen Biomineralization. *Journal of Dental Research*. 2011; 90(1): 82-7.
54. Ferreira G, Inés M. Bioactive materials in dentin remineralisation. *Odontoestomatología*. 2016; 18(28): 11-8.
55. Kinney J, Balooch M, Marshall G, Marshall S. A micromechanics model of the elastic properties of human dentine. *Arch Oral Biol*. 1999; 44: 813-22.

56. Kim YK, Yiu CKY, Kim JR, Gu L, Kim SK, Weller RN, et al. Failure of a Glass Ionomer to Remineralize Apatite-depleted Dentin. *Journal of Dental Research*. 2010; 89(3): 230-5.
57. Knight GM, McIntyre JM, Craig GG. Electron probe microanalysis of ion exchange of selected elements between dentine and adhesive restorative materials. *Australian Dental Journal*. 2007; 52(2): 128-32.
58. Kinney JH, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. The Importance of Intrafibrillar Mineralization of Collagen on the Mechanical Properties of Dentin. *Journal of Dental Research*. 2003; 82(12): 957-61.





ภาคผนวก

ตารางแสดงค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของแผ่นเนื้อฟันที่ทำการทดสอบ 20 ชิ้น

กลุ่มทดลอง	Modulus (GPa)	จำนวน	Mean (GPa)	SD
Control 1	1.95	5	1.34	0.85
Control 2	2.13			
Control 3	0.00			
Control 4	1.55			
Control 5	1.10			
Bondentine 1	11.54	5	9.38	1.60
Bondentine 2	9.49			
Bondentine 3	10.22			
Bondentine 4	7.61			
Bondentine 5	8.04			
Fuji IX 1	3.70	5	1.69	1.30
Fuji IX 2	2.27			
Fuji IX 3	1.21			
Fuji IX 4	0.72			
Fuji IX 5	0.57			
Normal 1	15.24	5	17.06	2.41
Normal 2	17.55			
Normal 3	21.03			
Normal 4	16.27			
Normal 5	15.24			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิมพ์กานดา มณีรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	15 สิงหาคม 2534
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	2/7 ม.5 ถ.ประปาเก่า ต.ดอนสัก อ.ดอนสัก จ.สุราษฎร์ธานี
ผลงานตีพิมพ์	Maneerat P., The masking ability of the ceramic restoration to final color of the crown restoration. TADI. 2020;53:16-18.

