



ผลของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ต่อการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน
ที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลอง : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

THE EFFECT OF CALCIUM SILICATE CEMENT ON REMINERALIZATION
IN ARTIFICIAL CARIES AFFECTED DENTINE : IN VITRO STUDY

อรุณา อัครธรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2564

ผลของแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์ต่อการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน
ที่ได้รับผลกระทบจากรอยผ่าลง : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE EFFECT OF CALCIUM SILICATE CEMENT ON REMINERALIZATION
IN ARTIFICIAL CARIES AFFECTED DENTINE : IN VITRO STUDY



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

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2021

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของแคลเซียมซิติเลตซีเมนต์ต่อการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน
ที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลอง : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ของ

อรวรา อัครธรรม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์จัตตชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพญ.ศิริจันทร์ เจียรพุดมิ)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทพญ.รังสิมา สกุลณะมรรคา)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ทพ.วินุฉย์ไพศาลกอบฤทธิ)

ชื่อเรื่อง	ผลของแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ต่อการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผู้จำลอง : การศึกษาในห้องปฏิบัติการ
ผู้วิจัย	อรุวรา อัครธรรม
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพญ. ศิริจันทร์ เจียรพุดิ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุของวัสดุแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ วิธีการศึกษาใช้ฟันกรามมนุษย์ที่สาม จำนวน 25 ซี่ ทำการเตรียมโพรงฟันบริเวณคอฟันด้านแก้มและนำไปจำลองรอยผู้ในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผู้ โดยใช้กระบวนการวิจัยการวัดความเป็นกรดต่าง จากนั้นนำไปบูรณะด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม ในกลุ่มทดลอง ได้แก่ กลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ (n=5) กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม (n=5) และกลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (n=5) และนำไปเก็บในสารละลายน้ำลายเทียม 1 สัปดาห์ โดยมีกลุ่มควบคุมอีก 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุมลบ (n=5) จะเป็นกลุ่มที่ผ่านการเตรียมโพรงฟันและจำลองรอยผู้ แต่ไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุและสารเคมีใด ๆ และกลุ่มควบคุมบวก (n=5) จะเป็นกลุ่มที่ผ่านการเตรียมโพรงฟันแต่ไม่ผ่านการบูรณะด้วยวัสดุและสารเคมีใด ๆ หลังจากนั้นขึ้นตัวอย่างจะถูกตัดตามแนวยาวและนำมาทดสอบประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุโดยทดสอบวัดค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันบริเวณใต้ต่อวัสดุ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงระดับนาโน ศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์สาร ผลการศึกษาพบว่าค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันในกลุ่มควบคุมบวก มีค่าสูงที่สุด ตามด้วยกลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินกลาสไอโอโนเมอร์ และกลุ่มควบคุมลบ ตามลำดับ โดยผลการศึกษาพบว่าทุกกลุ่มมีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพบว่าในกลุ่มควบคุมบวกและกลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์พบปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสสูงกว่ากลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพในกลุ่มควบคุมบวก และกลุ่มแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์พบลักษณะมีแร่ธาตุสะสมในชั้นเนื้อฟัน ขณะที่กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ ไม่พบลักษณะของแร่ธาตุสะสมใดๆ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าแคลเซียมซิติเกตซีเมนต์ มีประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผู้จำลอง ได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

คำสำคัญ : เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผู้, เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผู้จำลอง, การคืนกลับแร่ธาตุ

Title	THE EFFECT OF CALCIUM SILICATE CEMENT ON REMINERALIZATION IN ARTIFICIAL CARIES AFFECTED DENTINE : IN VITRO STUDY
Author	ONWARA AKKARATHAM
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sirichan Chiaraputt

The objective of this study is to evaluate the efficacy of remineralization in artificially caries-affected dentine restored with three different materials: calcium silicate cement, conventional glass ionomer cement and resin modified glass ionomer cement. Material and methods: there were 25 human third molar teeth were prepared in Class V cavities on the buccal side, and 20 cavities were used to simulate caries-affected dentin using the pH cycling method. There were 15 cavities, simulated as caries-affected dentin, were filled with three groups of different materials: calcium silicate cement (n=5), conventional glass ionomer cement (n=5) and resin modified glass ionomer cement (n=5) and immersed in artificial saliva for one week. The five demineralized cavities without restoration served as the negative control group (n=5), while the five sound cavities served as the positive control group (n=5). All of the specimens were cut longitudinally, and a nanoindentation test was performed on the dentine beneath the material at the axial wall and two specimens of each group were measured using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and scanning electron microscope (SEM). Results: The positive control group had the highest modulus of elasticity. The calcium silicate cement group was the second, followed by the conventional glass ionomer cement group, the resin-modified glass ionomer cement group and the negative control group, respectively. Except for the negative control group, conventional glass ionomer cement group, and resin-modified ionomer cement group, which were not statistically significant and all groups had different modulus of elasticity ($p < 0.05$). The EDX analysis showed higher calcium and phosphorus in the positive control group and calcium silicate cement group than in the conventional glass ionomer cement group, resin modified glass ionomer group and the negative control group. The SEM analysis showed mineral deposits in the dentin layer of the calcium silicate cement group and the positive control group. However, the conventional glass ionomer group, resin modified glass ionomer group and the negative group were not discovered. Conclusion: the calcium silicate cement was more effective than conventional glass ionomer cement and resin modified glass ionomer cement in remineralizing artificial caries affected dentin.

Keyword : Caries affected dentin, Artificial caries affected dentin, Remineralization

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ หากปราศจากคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพญ.ศิริจันทร์ เจียรพุฒิ อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์ และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ผู้ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้า ในโครงการ 70 ปี 70 ทุน มศว คีนส์สังคม ตลอดจนคณะกรรมการสอบเค้าโครงร่างปริญญานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ประกอบกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ หน่วยงาน สังกัดคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทางผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบ ขอบพระคุณผู้มีพระคุณดังกล่าวมา ณ ที่นี้

อนึ่งขั้นตอนการทดลองนั้นได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทดสอบจากผู้เกี่ยวข้อง ได้แก่ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัดความแข็งผิววัสดุ บริษัท เฮลมูท ฟิสเซอร์ (ไทยแลนด์) จำกัด ผู้ให้คำแนะนำเรื่องการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวระดับนาโน พร้อมทั้งได้รับความสะดวกจาก นางกนกพร สุขยานันท์ เจ้าหน้าที่คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในการอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องขัดชิ้นงาน จนสามารถทำให้งานเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ตามที่วางแผนได้ จึงขอกล่าวแสดงความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์นี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกล่าวขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนกระทั่งสามารถดำเนินปริญญานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อรورا อัครธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประชากรที่ใช้ในการวิจัย.....	3
กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ตัวแปรที่ศึกษา.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
สมมติฐานการวิจัย	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
1. แร่ธาตุในโครงสร้างฟัน.....	5
1.1 เคลือบฟัน (Enamel).....	5
1.2 เนื้อฟัน (Dentin)	5

2. การสูญเสียแร่ธาตุของฟัน	7
2.1 ลักษณะของเนื้อฟัน.....	7
2.2 ผลกระทบของเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุต่อการบูรณะ	7
2.3. การจำลองการสูญเสียแร่ธาตุ.....	8
3. การคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟัน	9
3.1 Classical ion-based crystallization concept.....	9
3.2 Non classical ion-based crystallization concept.....	10
4. วัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์.....	11
5. วัสดุเคลือบซีเมนต์ซีเมนต์.....	12
6. การประเมินการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน	16
6.1 การประเมินลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ (Morphology) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ในเนื้อฟัน	16
6.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อฟัน.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง.....	23
การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	24
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	33
การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	36
1.ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน.....	36
2.ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน	40
3.องค์ประกอบของแร่ธาตุในเนื้อฟัน.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล	48

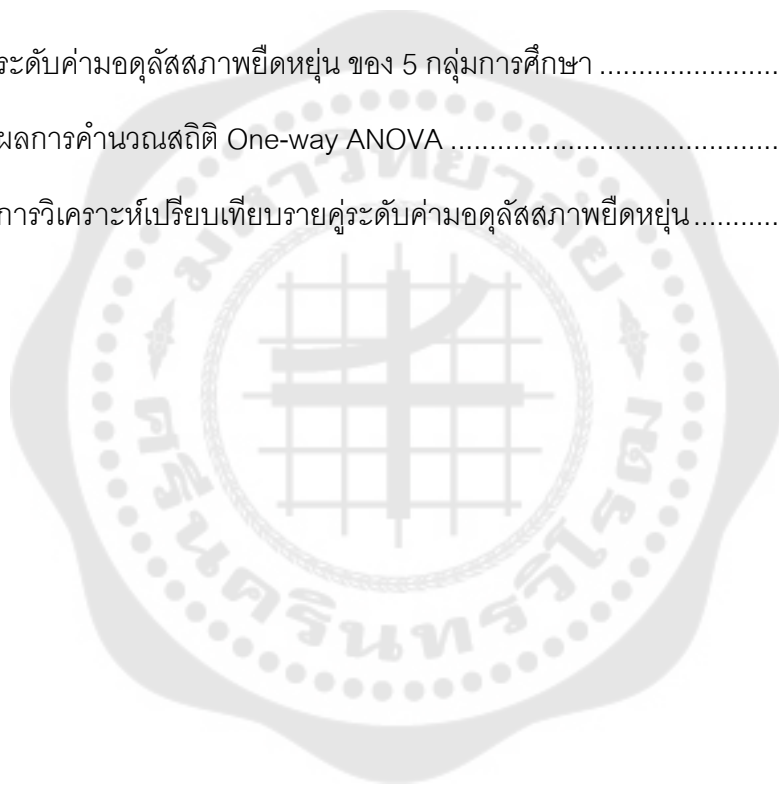
1.สรุปผลการวิจัย.....	48
2.อภิปรายผลการวิจัย.....	49
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	61



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงองค์ประกอบของวัสดุไบโอเดนทิน	14
ตาราง 2 แสดงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้ในการจำลองรอยผุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin)	27
ตาราง 3 แสดงองค์ประกอบของสารละลายน้ำลายเทียม	29
ตาราง 4 ระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น ของ 5 กลุ่มการศึกษา	37
ตาราง 5 ผลการคำนวณสถิติ One-way ANOVA	37
ตาราง 6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น	39



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย	4
ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของคอลลาเจนเมทริกซ์และบริเวณที่มีการสะสมแร่ธาตุ 6	
ภาพประกอบ 3 แสดงลักษณะของการคืนกลับแร่ธาตุแบบ Non-classical crystallization	11
ภาพประกอบ 4 แสดงบรรจุภัณฑ์ของวัสดุไบโอเดนทิน	15
ภาพประกอบ 5 แสดงการผสมวัสดุไบโอเดนทิน	15
ภาพประกอบ 6 แสดงสมการปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ	16
ภาพประกอบ 7 แสดงค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันกลุ่มที่จำลองการสูญเสียแร่ธาตุและแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ เทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้แช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ	18
ภาพประกอบ 8 แสดงรูปรอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop hardness test) และแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)	20
ภาพประกอบ 9 แสดงกราฟระหว่างแรงที่ใช้ในการกด (L) กับความลึกในการกด (h)	21
ภาพประกอบ 10 แสดงการเตรียมโพรงฟันด้านแก้ม ลักษณะเป็นโพรงฟันคลาสไฟฟ์ ที่มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตรสูง 2 มิลลิเมตร และลึก 1.5 มิลลิเมตร	26
ภาพประกอบ 11 แสดงการจำลองรอยผุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin)	28
ภาพประกอบ 12 แสดงการแบ่งกลุ่มบูรณะในแต่ละกลุ่มทดลอง และการเก็บแช่ในน้ำลายเทียม 30	
ภาพประกอบ 13 แสดงการตัดฟันตามแนวยาว (long axis) และภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอขึ้นตัวอย่างวัสดุอุดต้องมีลักษณะแน่นเต็ม	30
ภาพประกอบ 14 แสดงการยึดชิ้นงานลงแบบหล่อท่อพีวีซี (PVC) ด้วยอะคลิลิคชนิดบ่มตัวโดยไม่ใช้ความร้อน	31
ภาพประกอบ 15 แสดงการเตรียมชิ้นงานโดยการตัดแบ่งครึ่งในฟันซี่เดียวกัน ได้เป็น 2 ส่วน และนำแต่ละส่วนไปทดสอบ ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล หาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นด้วยเครื่องทดสอบความ	

แข็งระดับนาโน และส้อมตัวอย่างส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุธาตุ และศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
ภาพประกอบ 16 แสดงชิ้นตัวอย่างบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน	33
ภาพประกอบ 17 แสดงบริเวณในการทดสอบค่าความแข็งผิวระดับนาโน ที่ตำแหน่งใต้ต่อจากรอยต่อของเนื้อวัสดุและเนื้อพื้นบริเวณ axial wall และแสดงตำแหน่งการกดเฉพาะบริเวณเนื้อพื้นระหว่างท่อเนื้อพื้น	34
ภาพประกอบ 18 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของระดับมอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อพื้นที่ทั้ง 5 กลุ่มหมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติ.....	39
ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ A.กลุ่มควบคุมบวก B.กลุ่มควบคุมลบ C.กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม D.กลุ่มเรซินมอดิฟายกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ E.กลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์.....	41
ภาพประกอบ 20 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มควบคุมบวก B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน	43
ภาพประกอบ 21 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มควบคุมลบ B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน	44
ภาพประกอบ 22 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม B.องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน F.องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม G.องค์ประกอบแร่สตรอนเทียม H.องค์ประกอบแร่ฟลูออไรด์.....	45
ภาพประกอบ 23 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มเรซินมอดิฟายกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ B.องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน F.องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม G.องค์ประกอบแร่สตรอนเทียม H.องค์ประกอบแร่ฟลูออไรด์ I.องค์ประกอบแร่อะลูมิเนียม	46

ภาพประกอบ 24 A. องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มแคลเซียมซิติล
เกตซีเมนต์ B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C. องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D. องค์ประกอบแร่ออกซิเจน
E. องค์ประกอบแร่คาร์บอน F. องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม G. องค์ประกอบแร่ซิลิกอน 47



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

แนวคิดการบูรณะในฟันที่เกิดการสูญเสียแร่ธาตุจากรอยผุในปัจจุบันนั้น จะเป็นการใช้วิธีการรักษาโดยกำจัดรอยผุเท่าที่จำเป็น คงเหลือไว้ซึ่งโครงสร้างของเนื้อฟัน โดยทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อฟันน้อยที่สุด อาศัยการทำหน้าที่ของสารยึดติด เพื่อช่วยทำให้การบูรณะฟันเกิดการยึดติดที่ดี⁽¹⁾ ในการบูรณะนั้นการใช้สารยึดติดและวัสดุเรซินคอมโพสิตเป็นวิธีบูรณะที่นิยมอย่างแพร่หลาย ในการยึดติดของเรซินกับเนื้อฟันจะอาศัยการทำให้เกิดการยึดติดเชิงกลทางจุลภาค (Micromechanical retention) กับเนื้อฟัน โดยการใช้กรด หรือสารอะซิติกเรซินมอนอเมอร์ (Acids/ acidic resin monomers) ทำให้เมื่อเกิดการละลายของแร่ธาตุ จะเกิดการเผยผิวด้านในของคอลลาเจนเกิดขึ้น และเกิดการแทรกซึมของมอนอเมอร์ลงไป แต่จนถึงปัจจุบันนี้ พบว่าสารยึดติดไม่สามารถปกคลุมส่วนของเส้นใยคอลลาเจนได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความคงทนของวัสดุในช่องปากได้⁽²⁾ อีกทั้งในการยึดติดของสารยึดติดบนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) พบว่ามีประสิทธิภาพด้อยกว่าในเนื้อฟันปกติ โดยประสิทธิภาพในการยึดติดในเนื้อฟันปกติมีค่ามากกว่าไม่ว่าจะใช้สารยึดติดระบบใด เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ธาตุและการเรียงตัวของแร่ธาตุที่กระจัดกระจายมากกว่าเนื้อฟันปกติ^(3, 4)

ในทางทันตกรรมจึงได้มีการพัฒนา นำวัสดุที่มีคุณสมบัติในการคืนกลับแร่ธาตุมาใช้ในงานบูรณะในฟันที่มีรอยโรคฟันผุ โดยวัสดุเหล่านี้จัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพ (Bioactive material) หมายถึงวัสดุที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพ ส่งผลเหนี่ยวนำต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อนั้น ๆ ได้ โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อของวัสดุ (Material interface)⁽⁵⁾ วัสดุนิตินิยมนำมาใช้บูรณะบริเวณรอยผุ ได้แก่ กลาสไอโอไอโนเมอร์ซีเมนต์ เพราะสามารถคืนกลับแร่ธาตุ ปลดปล่อยฟลูออไรด์ อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาการยึดติดกับเนื้อฟันในทางเคมี จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย⁽⁶⁾ จึงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการบูรณะรอยผุ เช่น รอยผุบริเวณคอฟัน โดยเฉพาะฟันผุบริเวณรากฟันที่พบได้บ่อยในกลุ่มผู้สูงอายุ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของต่อมน้ำลาย หรือ ภาวะโรค ยาที่รับประทาน ซึ่งส่งผลทำให้มีความเสี่ยงในการเกิดโรคครอยฟันผุได้มากขึ้น⁽⁷⁾

นอกจากนี้วัสดุอีกกลุ่ม ได้แก่ วัสดุในกลุ่มของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ มีคุณสมบัติความเข้ากันได้กับโพรงประสาทฟันและส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันได้ วัสดุที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ มิเนอร์อัลไตรออกไซด์ แอกก리게ต (Mineral Trioxide Aggregate : MTA) เป็นวัสดุที่นำมาใช้

งานหลากหลาย อาทิเช่น วัสดุอุดปิดปลายรากฟัน การซ่อมแซมการทะลุของรากฟัน วัสดุปิดทับเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน ข้อเสียของเอ็มทีเอ คือ ใช้เวลาในการก่อตัวนาน ทำให้ไม่สามารถทำการรักษาได้ภายในครั้งเดียว ลักษณะการใช้งานที่ยาก และ ติดสีกับเนื้อฟัน^(8, 9) จึงได้มีการพัฒนาวัสดุในกลุ่มนี้ต่อมา นั่นก็คือ ไบโอเดนทีน (Biodentine) เป็นวัสดุที่ทดแทนในส่วนของเนื้อฟัน มีส่วนประกอบเป็นไตรแคลเซียมซิลิเกต เช่นเดียวกับ เอ็มทีเอ แต่มีการพัฒนาให้มีการก่อตัวที่เร็วขึ้น มีการศึกษาในหลายการศึกษาที่พบว่าวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์นี้สามารถที่จะกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ ด้วยองค์ประกอบที่มีแร่ธาตุ เป็นแหล่งของแคลเซียม และความเป็นด่าง (High alkalinity) ซึ่งจะช่วยให้การกระตุ้นให้เกิดการสร้างผลึกอะพาไทต์ได้ เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีฟอสเฟต(Phosphate-rich fluids)⁽¹⁰⁾

จะเห็นได้ว่าวัสดุซึ่งส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันนั้น อาจเป็นทางเลือกในการบูรณะในรอยโรคฟันผุ ในแง่ของการเพิ่มความคงทนของการบูรณะ และการเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติด โดยเฉพาะเมื่อต้องทำการบูรณะบนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากกรวยผุ (Caries affected dentin) ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพ (Bioactive material) วัสดุที่ใช้มาอย่างยาวนาน นั่นก็คือ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และวัสดุที่มีการพัฒนาต่อมา แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ หรือไบโอเดนทีน (Biodentine) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุ และอาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาบูรณะในรอยโรคฟันผุได้

การศึกษานี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุของวัสดุ 3 กลุ่ม ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ทำการจำลองรอยผุบริเวณคอฟันในลักษณะเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากกรวยผุ ด้วยวิธีวัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) และนำไปเก็บแช่ในสารละลายน้ำลายเทียม หลังจากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการวิเคราะห์ความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟัน ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟันและองค์ประกอบของแร่ธาตุในเนื้อฟัน

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งหวังเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยพิจารณาจาก ความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟัน ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟันและองค์ประกอบของแร่ธาตุในเนื้อฟัน

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษานี้ เมื่อทราบถึงประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุของวัสดุที่นำมาศึกษา จะเป็นการพัฒนานำวัสดุเคลือบเซรามิกชนิดซีเมนต์ มาพิจารณาใช้ในงานรักษาทันตกรรมบูรณะ ในพื้นที่มีรอยผุ หรือรอยผุเล็กใกล้โพรงประสาทฟัน ตามหลักแนวคิดในปัจจุบันที่มุ่งเน้นไปที่วิธีการรักษาโดยกำจัดรอยผุเท่าที่จำเป็น คงเหลือไว้ซึ่งโครงสร้างของเนื้อฟัน โดยทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อฟันน้อยที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติด และการคงอยู่ของการบูรณะมากขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย

ใช้ฟันกรามแท้ซี่ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ โดยต้องไม่มีรอยผุ รอยร้าว รอยสีก และไม่มีอาการบูรณะใดๆ

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

แบ่งการทดลองออกเป็น กลุ่มทดลอง และกลุ่มควบคุม

1. กลุ่มทดลอง ทดสอบจากฟันที่ผ่านการเตรียมโพรงฟันให้มีลักษณะเป็นโพรงฟันชนิดคลาสไฟฟ์ บริเวณด้านแก้มและผ่านการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin) ด้วยวิธีวัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling)

1.1 โพรงฟันที่บูรณะด้วยเคลือบเซรามิกชนิดซีเมนต์ ไบโอดีนทีน : Biodentine (Septodont,. Saint-Maur-des-Fossés, France)

1.2 โพรงฟันที่บูรณะด้วยกาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟูจิไนน์ : Fuji IX GP EXTRA (GC, Tokyu,Japan)

1.3 โพรงฟันที่บูรณะด้วยเรซินมอดิฟายด์กาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟูจิทูที่แข็งตัวด้วยแสง : Fuji II LC (GC, Tokyu,Japan)

2. กลุ่มควบคุม

2.1 กลุ่มควบคุมลบ (Negative control) กลุ่มที่ผ่านการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุและไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุใดๆ

2.2 กลุ่มควบคุมบวก (Positive control) กลุ่มเนื้อฟันปกติ โดยเป็นโพรงฟันที่ผ่านการกรอเตรียมโพรงฟัน โดยที่โพรงฟันไม่ได้สัมผัสกับสารเคมีใดๆ

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ ได้แก่ วัสดุที่ส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุ 3 ชนิด

2. ตัวแปรตาม ได้แก่ คุณสมบัติ 3 ด้าน ของเนื้อฟันที่เปลี่ยนแปลงไป
3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ความเรียบและขนาดของชิ้นงาน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ สารละลายอิมิตัวที่ใช้ทดสอบ

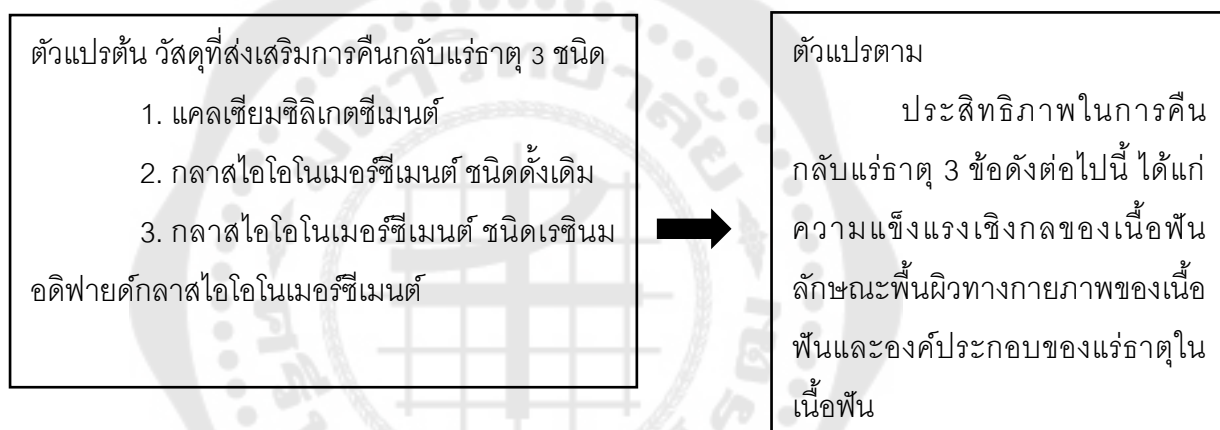
นิยามศัพท์เฉพาะ

Caries affected dentin คือ เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ

Artificial caries affected dentin คือ เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลอง

Remineralization คือ การคืนกลับแร่ธาตุ

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

ไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุ ระหว่างวัสดุที่ใช้ในการอุดในโพรงฟันบริเวณคอฟันที่จำลองการสูญเสียแร่ธาตุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. แร่ธาตุในโครงสร้างฟัน
2. การสูญเสียแร่ธาตุของเนื้อฟัน
3. การคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟัน
4. วัสดุเคลือบไอโอโนเมอร์ซีเมนต์
5. วัสดุเคลือบซีลแลนต์
6. การประเมินการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

1. แร่ธาตุในโครงสร้างฟัน

1.1 เคลือบฟัน (Enamel)

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอนินทรีย์สาร มีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบหลัก 96 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ธาตุต่างๆ และส่วนอนินทรีย์สารและน้ำ 4 เปอร์เซ็นต์⁽¹¹⁾

1.2 เนื้อฟัน (Dentin)

ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้แก่ คาร์บอนเนต แคลเซียมอะพาไทต์ และอีก 30 เปอร์เซ็นต์ประกอบไปด้วยอินทรีย์สาร (organic) ส่วนใหญ่เป็น คอลลาเจนชนิดรูปแบบที่ 1 (Collagen type I) และอีก 20 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยน้ำและของเหลว นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ สารประกอบโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน (Non-collagenous protein)

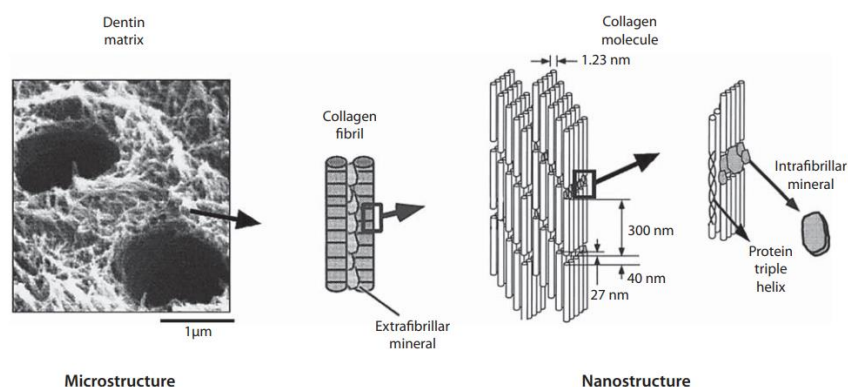
เนื้อฟันประกอบไปด้วยลักษณะโครงสร้างคล้ายท่อ เรียกว่าท่อเนื้อฟัน (Dentinal tubule) ลักษณะนี้เกิดจากการสร้างโดยเซลล์โอดอนโตบลาสต์ (Odontoblast cell) ลักษณะของท่อเนื้อฟันจะแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ โดยจำนวนความหนาแน่นของท่อเนื้อฟันจะแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ พบว่า ความหนาแน่นของท่อเนื้อฟัน ต่ตรงรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและเคลือบฟัน (Dento-enamel junction:DEJ) จะมีจำนวนน้อยกว่า ท่อเนื้อฟันที่พบบริเวณที่ใกล้กับโพรงประสาทฟัน (Pulp chamber) ที่ซึ่งพบเซลล์โอดอนโตบลาสต์ (Odontoblast cell) วางเรียงตัวอยู่ระหว่างรอยต่อของเนื้อฟันและโพรงประสาทฟัน โดยในท่อเนื้อฟันจะประกอบไปด้วย ส่วนยื่นของโอดอนโตบลาสต์เซลล์ (Odontoblastic process) และของเหลว โดยพบว่าส่วนยื่นของส่วนยื่นของ

ไฮดรอกซีอะปาทิตเซลล์ พบว่ายังไม่แน่ชัดว่าสิ้นสุดที่ตำแหน่งใด แต่พบว่าจะใกล้เคียงสิ้นสุดที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเคลือบฟันและเนื้อฟัน (Dento-enamel junction:DEJ)

องค์ประกอบของ เนื้อฟันที่อยู่รอบท่อเนื้อฟัน (Peritubular dentin) พบว่าส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยผลึกอะพาไทต์ (Apatite crystals) และมีสารอินทรีย์ (Organic matrix) เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เนื้อฟันที่อยู่ระหว่างท่อเนื้อฟัน (Intertubular dentin) พบแร่ธาตุในปริมาณน้อยกว่า ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยคอลลาเจนชนิดรูปแบบที่ 1 (Collagen type I)⁽¹¹⁾

ลักษณะทางจุลภาคของเนื้อฟัน (Microstructure of dentine matrix) เส้นใยคอลลาเจน จะประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ (Monomer) คือ Tropocollagen หลายโมเลกุลที่เชื่อมกันโดยการสานเป็นโครงข่าย (Cross link) โดย Tropocollagen แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยโปรตีน α chain 3 สายพันกันเป็น Triple helix

แร่ธาตุที่พบจะอยู่ในรูปของผลึกอะพาไทต์ ภายในเนื้อฟันซึ่งแบ่งตามตำแหน่งที่พบตามเส้นใยคอลลาเจน 2 บริเวณ ได้แก่ แร่ธาตุที่สะสมอยู่ภายนอกเส้นใยคอลลาเจน (Extrafibrillar mineral) จะพบอยู่ระหว่างเส้นใยคอลลาเจนในแต่ละเส้นใย (Fibrils) เป็นตัวแยกเส้นใยคอลลาเจนในแต่ละเส้นใยจากกัน อีกบริเวณ คือ แร่ธาตุที่สะสมอยู่ภายในเส้นใยคอลลาเจน (Intrafibrillar mineral) จะสะสมอยู่ระหว่างแต่ละโมเลกุลของ Tropocollagen⁽¹²⁾



ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของคอลลาเจนเมทริกซ์และบริเวณที่มีการสะสมแร่ธาตุ

ที่มา : Bertassoni, L. E., Habelitz, S., Kinney, J. H., Marshall, S. J., & Marshall, G. W., Jr. (2009). Biomechanical perspective on the remineralization of dentin. *Caries Res*, 43(1), 70-77.

2. การสูญเสียแร่ธาตุของฟัน

2.1 ลักษณะของเนื้อฟัน

2.2.1 เนื้อฟันที่มีการติดเชื้อ (Infected dentin)

พบอยู่ชั้นภายนอกของรอยผุ จะพบว่าเนื้อฟันในชั้นนี้มีการสูญเสียแร่ธาตุเป็นอย่างมาก ลักษณะเส้นใยคอลลาเจนที่พบจะถูกทำลายไปไม่พบลักษณะการประสานกัน (Cross-link) ของเส้นใย อาจพบเชื้อแบคทีเรียในชั้นนี้ได้อีกด้วย พบว่าเนื้อฟันในชั้นนี้ไม่สามารถเกิดการคืนกลับของแร่ธาตุในเนื้อฟันชั้นนี้ได้

2.2.2 เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin)

จะเป็นชั้นที่มีการสูญเสียแร่ธาตุไปบางส่วน (Partially demineralized) พบว่าสามารถที่จะเกิดการคืนกลับแร่ธาตุโดยธรรมชาติได้ (Physiologically remineralizable) ดังนั้นในการกำจัดรอยผุจะยังคงเหลือชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) เอาไว้ ลักษณะของแร่ธาตุในเนื้อฟันส่วนนี้ จากการศึกษาของคัมพอบแรธาตุด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (Fourier-transform infrared) พบว่าจะมีผลึกคริสตัลจำนวนน้อยกว่า และปริมาณแร่ธาตุที่ต่ำกว่าเนื้อฟันปกติ (Sound dentin) นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของแร่ธาตุจะเป็นในลักษณะกระจัดกระจาย มีขนาดผลึกคริสตัลของแร่ธาตุ และระยะห่างระหว่างผลึกแร่ธาตุที่มากกว่าเนื้อฟันปกติ (Sound dentin) นอกจากนี้ในส่วนของอินทรีย์สาร(Organic phase) ยังคงพบลักษณะโครงข่ายของเส้นใยคอลลาเจน ทำให้เนื้อฟันในส่วนนี้สามารถเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ (Physiologically remineralizable) แต่ก็พบว่าลักษณะของเส้นใยคอลลาเจนมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น พบสารจำพวก Proteoglycans ลดลงกว่าเนื้อฟันปกติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยคอลลาเจนนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดการคืนกลับแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจน (Intrafibrillar remineralization)⁽³⁾

2.2 ผลกระทบของเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุต่อการบูรณะ

การบูรณะฟันที่มีรอยผุนั้น การใช้สารยึดติดและการบูรณะด้วยวัสดุเรซินคอมโพสิต เป็นวิธีที่แพร่หลาย ในการยึดติดของเรซินกับฟันนั้นอาศัยการทำให้เกิดการยึดติดเชิงกลทางจุลภาค (Micromechanical retention) กับเนื้อฟัน โดยการใช้กรด หรือสารอะซิดิคมอนอเมอร์ (Acids/ acidic resin monomers) โดยการยึดติดระหว่างส่วนของเคลือบฟัน และเนื้อฟันนั้น มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ เนื้อฟันมีองค์ประกอบซับซ้อนประกอบไปด้วยแร่ธาตุ 70 เปอร์เซ็นต์ และอินทรีย์สาร ได้แก่ เส้นใยคอลลาเจน และน้ำอีก 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากเคลือบฟันที่ประกอบไปด้วยแร่ธาตุเป็นส่วนใหญ่ถึง 96 เปอร์เซ็นต์และส่วนอินทรีย์สารและน้ำเพียง 4 เปอร์เซ็นต์⁽¹¹⁾ ทำให้เมื่อใช้สารยึดติด ซึ่งจะเป็นการใช้กรดหรือสารอะซิดิคมอนอเมอร์ (Acids/

acidic resin monomers) ลงไปละลายส่วนของแร่ธาตุ ในส่วนของเคลือบฟัน กรดจะกัดส่วนของแท่งเคลือบฟัน และเกิดการแทรกซึมของมอนอเมอร์ เกิดการยึดติดเชิงกลทางจุลภาค (Micromechanical retention) ขึ้นอย่างสมบูรณ์ แตกต่างจาก การยึดติดในชั้นเนื้อฟัน ซึ่งมีองค์ประกอบอนินทรีย์สาร เมื่อเกิดการละลายของแร่ธาตุรอบเส้นใยคอลลาเจนเกิดขึ้น สารยึดติดไม่สามารถปกคลุมเส้นใยคอลลาเจนได้อย่างสมบูรณ์ บริเวณชั้นไฮบริด (Hybrid layer) คอลลาเจนที่ไม่ถูกปกคลุมด้วยมอนอเมอร์ เมื่อสัมผัสกับเอนไซม์ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป หรือการได้รับแรง จะก่อให้เกิดการเสื่อมสลายของการยึดติด ทำให้ส่งผลให้ความคงทนของสารยึดติดแย่งลง^(13, 14)

อีกทั้งในการยึดติดของสารยึดติดบนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) พบว่ามีประสิทธิภาพน้อยกว่าในเนื้อฟันปกติ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ธาตุและการเรียงตัวของแร่ธาตุที่กระจุกกระจายมากกว่าเนื้อฟันปกติ โดยพบว่าชั้นไฮบริดที่เกิดขึ้นบนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) มีลักษณะที่หนากว่าชั้นไฮบริดที่เกิดขึ้นบนเนื้อฟันปกติ เนื่องจากการใช้กรดหรือสารอะซิดิคมอนอเมอร์สามารถละลายแร่ธาตุได้ดีกว่าเนื้อฟันปกติ^(3, 4)

2.3. การจำลองการสูญเสียแร่ธาตุ

2.3.1 การใช้สารเคมี (Chemical solution)

การใช้สารเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่ยิมนนำมาใช้ในหลายการศึกษา โดยเป็นการใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุในเนื้อฟัน ข้อดีของวิธีนี้ ทำได้ง่าย สะดวก ราคาไม่แพง แต่ก็อาจจะมีข้อจำกัดเนื่องจากไม่ได้แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงรอยผุตามธรรมชาติ⁽¹⁵⁾

2.3.2 การใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling)

การใช้วัฏจักรกรดต่าง มาใช้จำลองฟันให้มีให้ลักษณะ เนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) เป็นวิธีที่จำลองลักษณะทางพลวัต ของการเกิดฟันผุของฟันธรรมชาติ (Dynamic process of caries formation) เพราะโรคฟันผุเป็นโรคที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยฟันแต่ละซี่จะมีการสูญเสียแร่ธาตุและคืนกลับแร่ธาตุตลอดเวลา⁽¹⁵⁾

พบว่าเป็นวิธีที่แนะนำในการนำมาศึกษาจำลองรอยผุในเนื้อฟัน โดยจากการศึกษาของ Marquezan และคณะในปี ค.ศ.2009⁽¹⁶⁾ โดยนำฟันมาแช่ในสารละลายเร่งการสูญเสียแร่ธาตุ (Demineralizing solution) 8 ชั่วโมง จากนั้นแช่ในสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ (Remineralizing solution) 16 ชั่วโมง สลับกันแบบนี้เป็นเวลา 14 วัน พบว่า มีค่าความแข็งผิวที่ใกล้เคียงรอยผุจากฟันธรรมชาติมากที่สุด จนถึงระดับความลึก 40 ไมครอน จากการศึกษานี้

จึงสรุปได้ว่า วิธีจำลองรอยผุโดยใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) เป็นวิธีที่เหมาะสมในการจำลองส่วนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin)

2.3.3 กลุ่มที่ใช้เชื้อแบคทีเรียในการจำลองรอยผุ (Microbiological)

จากการศึกษาพบว่า การใช้วิธีใช้เชื้อแบคทีเรียในการจำลองรอยผุ (Microbiological) จะเหมาะกับการใช้กับการจำลองส่วนเนื้อฟันที่มีการติดเชื้อ (Caries infected dentine)⁽¹⁶⁾ โดยในการศึกษาได้จำลองรอยผุ โดยนำฟันแต่ละซี่มาแช่ในสารละลายที่มีเชื้อแบคทีเรีย (caries solution) จากนั้นทำการเพาะเชื้อ (Incubated) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน นำมาประเมินค่าความแข็งผิว พบว่ามีค่าความแข็งผิวที่น้อยกว่ารอยผุในกลุ่มจากฟันธรรมชาติ จนถึงความลึก 200 ไมครอน จากนั้นใกล้เคียงรอยผุจากธรรมชาติ ที่ 300 ไมครอน

จากการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า วิธีจำลองรอยผุโดยใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) เป็นวิธีที่เหมาะสมในการจำลองส่วนเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ ส่วนการใช้วิธีใช้เชื้อแบคทีเรียในการจำลองรอยผุ (Microbiological) จะเหมาะกับการใช้กับการจำลองส่วนเนื้อฟันที่มีการติดเชื้อ⁽¹⁶⁾

อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าว ทำในฟันน้ำนม ซึ่งอาจให้ผลที่แตกต่างไปในฟันแท้ แต่จากการศึกษาของ TL Lenzi และคณะ ได้เปรียบเทียบการทำ การใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) จำลองการสูญเสียแร่ธาตุในฟันกรามแท้เทียบกับฟันกรามน้ำนม โดยดูที่ค่าความแข็งผิวพบว่า ทั้ง 2 กลุ่ม ไม่ว่าจะ เป็นกลุ่มที่จำลองรอยผุด้วยฟันแท้หรือฟันน้ำนม นั้น ให้ค่าความแข็งผิวที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ⁽¹⁷⁾

3. การคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟัน

3.1 Classical ion-based crystallization concept

แนวคิดการคืนกลับแร่ธาตุด้วยนี้จะเป็นการเติบโตของแร่ธาตุแบบเอพิแทกเซียล (Epitaxial growth) คือ การสะสมแร่ธาตุ จากผลึกแร่ธาตุเดิมที่มีอยู่ (Residual crystals) ซึ่งผลึกแร่ธาตุเดิมจะทำหน้าที่เป็นบริเวณที่เริ่มการสะสมแร่ธาตุ (Nucleation site) เมื่อมีแร่ธาตุไอออน เช่น แคลเซียม ฟอสเฟต

อย่างไรก็ตามแนวการคืนกลับแร่ธาตุด้วยแนวคิดนี้จะไม่เกิดการคืนกลับแร่ธาตุที่สมบูรณ์ (Incomplete remineralization) เนื่องจากการคืนกลับแร่ธาตุนั้นจะคืนกลับเฉพาะบริเวณที่เป็นส่วนนอกของเส้นใยคอลลาเจน (Extra-fibrillar remineralization) โดยไม่เกิดการคืนกลับแร่

ธาตุที่ส่วนในของเส้นใยคอลลาเจน(Intra-fibrillar remineralization) เนื่องมาจากขาดการควบคุมจัดเรียงลักษณะของผลึกแร่ธาตุ ระหว่างที่มีการคืนกลับแร่ธาตุ^(18, 19)

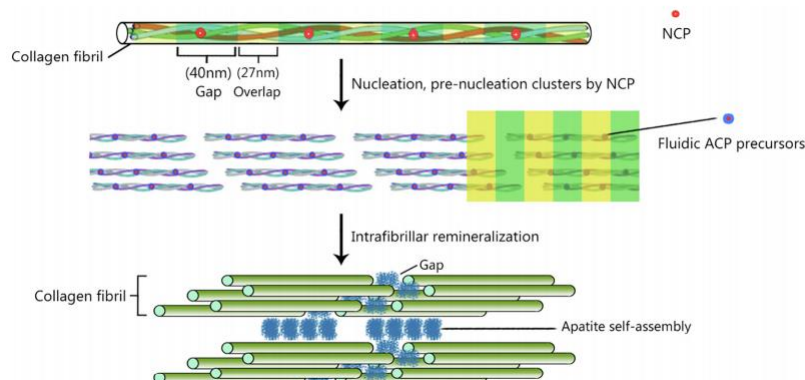
3.2 Non classical ion-based crystallization concept

แนวคิดนี้ เชื่อว่าสามารถที่จะเกิดการคืนกลับแร่ธาตุโดยการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุ (Biomimetic remineralization) ในฟันธรรมชาติ แม้จะมีการสูญเสียแร่ธาตุออกไปทั้งหมด

ในฟันธรรมชาตินั้น เนื้อฟันจะประกอบไปด้วยสารประกอบโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน ได้แก่ Dentine matrix protein (DMP1) ซึ่งสร้างจากเซลล์โอดอนโทบลาสต์ (odontoblast cell) สารดังกล่าวจะอยู่ภายในเส้นใยคอลลาเจน มีหน้าที่เป็นตัวเหนียวทำให้เกิดการตกตะกอนไอออนของแร่ธาตุต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการสร้างเนื้อฟัน

ในการศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุในวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุ (Biomimetic remineralization) ในฟันธรรมชาติ ในการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ที่พบว่าวัสดุเหล่านี้ มีประสิทธิภาพที่ดีในการคืนกลับแร่ธาตุ สามารถที่จะเกิดการคืนกลับแร่ธาตุโดยการเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุ (Biomimetic remineralization) ในฟันธรรมชาติ⁽¹⁰⁾ ในขณะที่วัสดุในกลุ่มของกลาสไอออนอเมอรรันนั้น ไม่สามารถที่จะคืนกลับแร่ธาตุด้วยวิธีการคืนกลับในแนวคิดนี้ โดยจากการศึกษาของ Kim และคณะในปี 2010 ศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุ ในฟันที่มีการจำลองให้มีการสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด (Complete demineralization) โดยใช้วัสดุ คือ กลาสไอออนอเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม : ฟุจิไนน์ Fuji ix GP EXTRA (GC, Tokyo, Japan) และใช้สารเพื่อเลียนแบบทางชีวภาพ (Biomimetic analog) ได้แก่ Polyacrylic acid และ polyvinylphosphonic acid เพื่อให้เกิดการเลียนแบบคืนกลับแร่ธาตุ โดยดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Transmission Electron Microscopy) , ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุ พบว่ามีปริมาณแร่ธาตุเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่พบลักษณะของอะพาไทต์ (Apatite) เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์⁽²⁰⁾

โดยในหลายการศึกษา เพื่อเลียนแบบการคืนกลับของแร่ธาตุตามธรรมชาติ จะเป็นการใช้สารเพื่อเลียนแบบทางชีวภาพ (Biomimetic analog) ได้แก่ โมเลกุล Polyacrylic acid (PAA) Polyvinylphosphonic acid (PVPA)^(21, 22) เป็นต้น โดยการแช่ในสารละลายที่มีองค์ประกอบของสารเพื่อเลียนแบบทางชีวภาพ (Biomimetic analog) ซึ่งใช้เป็นตัวเหนียวนำเร่งให้เกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุ ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้ในทางคลินิก



ภาพประกอบ 3 แสดงลักษณะของการคืนกลับแร่ธาตุแบบ Non-classical crystallization

ที่มา : He L, Hao Y, Zhen L, Liu H, Shao M, Xu X, . Biomineralization of dentin. J Struct Biol. 2019;207(2):115-22. 2019/06/04.

4. วัสดุกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

การใช้กระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ในงานทันตกรรมบูรณะมีมาอย่างแพร่หลาย พบวัสดุในชื่อของ โพลีแอลคิลีนเอตกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ถูกพัฒนามาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1975 โดยกระจกไอโอโนเมอร์จะประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นของแข็ง ส่วนที่เป็นองค์ประกอบด้วยแก้ว (Glass particle) ฟลูออโรอะลูมิโนซิลิเกตกระจก (Fluoro-aluminosilicate glass) และส่วนของน้ำ ซึ่งเป็นกรด เช่น กรดโพลีแอลคีนอิก (Poly alkenoic) เมื่อนำ 2 ส่วนมารวมกันจะเกิดปฏิกิริยากรดต่างขึ้น เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเกลือเกิดขึ้น ในลักษณะเป็นสัณฐานกึ่งวุ้น (Gel like form)

โดยปฏิกิริยาจะเกิดด้วยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ

1. ช่วงการละลายตัว (Dissolution phase) โดยกรดจะแตกตัวทำปฏิกิริยากับส่วนของแก้ว เกิดการแตกตัวของไอออนต่าง ๆ ได้แก่ อะลูมิเนียมไอออน ฟลูออไรด์ไอออน แคลเซียมไอออนหรือสตรอนเทียมไอออน เป็นต้น

2. ช่วงการก่อตัว (Gelation phase) เมื่อกรดเกิดการแตกตัวจะอยู่ในรูปโครงสร้างเส้นตรงมากยิ่งขึ้น ง่ายต่อการเกิดโครงสร้างประสานเป็นโครงข่าย (Cross link)⁽²³⁾

การคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟันจากวัสดุกระจกไอโอโนเมอร์นั้น พบว่ากระจกไอโอโนเมอร์สามารถทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ ในหลายการศึกษา บริเวณรอยต่อระหว่างกระจกไอโอโน

เมอร์ซีเมนต์กับเนื้อฟัน จะประกอบไปด้วยสารฟลูออออลิเดตคาร์บอนเตอะพาไทต์เกิดขึ้น ซึ่งพบใน 2-4 ชั่วโมงภายหลังการอุด ซึ่งกระบวนการเกิดนั้นเกิดจากไฮโดรเจนไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากกรดโพลีแอลคีนอิก (Poly alkenoic acid) ไปทำปฏิกิริยากับส่วนผง (Glass particle) และส่วนคาร์บอนเตอะพาไทต์ของเนื้อฟัน ซึ่งการเกิดสารฟลูออออลิเดตคาร์บอนเตอะพาไทต์ จะพบลักษณะของการเกิดการสะสมหนาตัวของแร่ธาตุบนเนื้อฟันเกิดขึ้น (Hypermineralization) เป็นผลให้มีความต้านทานต่อการกร่อนได้สูงขึ้น ลดโอกาสที่กรดจะแพร่มาจากคราบจุลินทรีย์ได้⁽⁶⁾ ในการศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ วัสดุ 2 กลุ่ม ได้แก่ ฟลูจิฟูแอลซี และฟูจีไนน์ ในโพรงฟันคลาสไฟฟของลิง ที่ผ่านการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุ โดยดูปริมาณแร่ธาตุที่คืนกลับด้วยวิธี Electron probe microanalysis (EPMA) พบว่ามีแร่ธาตุฟลูออไรด์ในบริเวณ ด้านล่างของรอยผุจำลอง (Bottom of the artificially demineralized dentin) ใน 3 วัน ซึ่งการพบนี้ผู้ทำการวิจัยได้วิเคราะห์ว่าเป็นการกระตุ้นให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุขึ้นได้⁽²⁴⁾

นอกจากนี้ในการศึกษานำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเนื้อฟัน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตแล้วพบว่ามีความแนบสนิท (Sealing ability) ที่ดีกว่าวัสดุคอมโพสิต ซึ่งผู้ทำการศึกษาได้วิเคราะห์ว่าเนื่องจากวัสดุกลุ่มนี้มีการยึดติดทางเคมีจึงให้ผลความแนบสนิทที่ดีกว่าคอมโพสิต⁽²⁵⁾ อย่างไรก็ตาม กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ก็มีข้อเสียนั้นก็คือ เป็นวัสดุที่แตกหักได้ง่าย ความต้านทานการสึกต้ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของกลาสไอโอโนเมอร์ โดยการเติมสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ได้แก่ เรซินโมโนเมอร์ เกิดเป็นวัสดุในกลุ่มของเรซินมอดิฟายกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ขึ้น ซึ่งมีความแข็งแรงกว่ากลุ่มของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม

5. วัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

วัสดุตัวแรกในกลุ่ม คือ มิเนอร์รัล ไตรออกไซด์ แอกริเกต (Mineral trioxide aggregate) ค.ศ. 1995 Torabinejad ได้นำวัสดุ ในชื่อของ เกรย์ โพรรูท เอ็มทีเอ (Grey ProRoot MTA) มาใช้ โดยนำมาใช้ในงานรักษารากฟัน โดยใช้เป็นวัสดุในงานเหล่านี้

1. วัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน (Retrograde filling)
2. วัสดุซ่อมแซมการทะลุบริเวณง่ามรากฟัน (Furcation perforation)
3. วัสดุซ่อมแซมการทะลุของรากฟัน (Root perforation repair)
4. วัสดุซ่อมแซมรอยทะลุจากการละลายตัวของฟันทั้งจากภายนอกและภายใน

(Internal/external resorptions)

ข้อเสียของเอ็มทีเอ คือ ใช้เวลาในการก่อตัวนาน ทำให้ไม่สามารถทำการรักษาได้ภายในครั้งเดียว ลักษณะการใช้งานที่ยาก และ ติดสีกับเนื้อฟัน^(8, 9) จึงได้มีการพัฒนาวัสดุอุดในกลุ่มของแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ต่อมา นั่นก็คือ ไบโอเดนติน (Biodentine)

ในปี ค.ศ.2009 ได้มีการพัฒนาวัสดุไบโอเดนติน ซึ่งเป็นวัสดุในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตเช่นเดียวกัน โดยวัตถุประสงค์เพื่อเป็นสารทดแทนเนื้อฟันโดยมีข้อดี ดังต่อไปนี้

1. ระยะเวลาในการก่อตัวมีระยะเวลาที่สั้นลงกว่าเอ็มทีเอ (MTA)
2. หลังจากผสมได้ ผลิตภัณฑ์ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) นั้นสามารถเหนี่ยวนำเซลล์ให้สร้างเนื้อฟันซ่อมแซม (Reparative dentin) ได้
3. มีการยึดติดกับเนื้อฟัน มีการสะสมแร่ธาตุเป็นชั้นของแคลเซียมฟอสเฟต (Layer of calcium phosphate)⁽⁹⁾

มีคุณสมบัติความเข้ากันได้กับโพรงประสาทฟันและส่งเสริมการคืนกลับแร่ธาตุของเนื้อฟัน ไบโอเดนติน (Biodentine) เป็นวัสดุที่ทดแทนในส่วนของเนื้อฟัน มีส่วนประกอบเป็นไตรแคลเซียมซิลิเกต เช่นเดียวกับ เอ็มทีเอ แต่มีการพัฒนาให้มีการก่อตัวที่เร็วขึ้น โดยทางบริษัทผู้ผลิตได้ระบุว่าไบโอเดนตินนั้นใช้เวลาในการก่อตัวที่ 12 นาที ซึ่งสามารถที่จะให้การรักษาผู้ป่วยในครั้งเดียวได้ และข้อดีของไบโอเดนติน คือ มีการติดสีที่น้อยกว่าเอ็มทีเอ โดยไบโอเดนตินสามารถที่จะกรอแต่งได้เหมือนกับเนื้อฟัน⁽²⁶⁾

Koubi และคณะในปี ค.ศ. 2013 พบว่าวัสดุทดแทนเดนติน หรือ ไบโอเดนตินนั้น สามารถคงอยู่ในการบูรณะในฟันหลังได้นาน 6 เดือน และหากได้รับการบูรณะปิดทับด้วยวัสดุเรซินคอมโพสิต จะเพิ่มความสำเร็จของการบูรณะได้⁽²⁷⁾

ในการศึกษาการใช้วัสดุทดแทนเนื้อฟันเปรียบเทียบระหว่างวัสดุแคลเซียมซิลิเกต ไบโอเดนติน และกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออโรแอลซี โดยนำไปอุดเป็นวัสดุทดแทนเนื้อฟันโพรงฟันชนิดคลาสสิก และนำไปผ่านกระบวนการร้อนและเย็น หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบในแง่ของความแนบสนิทของโพรงฟัน โดยดูที่ระดับการรั่วซึมที่ผนังด้านเหงือก โดยใช้สารซิลเวอร์ไนเตรตพบว่า ไบโอเดนตินให้ค่าความแนบสนิทที่มากกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ชนิดไบโอเดนติน มีค่าการรั่วซึม คิดเป็นร้อยละ 30 ขณะที่กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดฟลูออโรแอลซี มีค่าการรั่วซึมร้อยละ 100 จากการศึกษานี้ผู้ทำการศึกษาก็ได้วิเคราะห์ว่า อาจจะเป็นเพราะว่าวัสดุแคลเซียมซิลิเกตสามารถกระตุ้นการสร้างผลึกอะพาไทต์ได้ เมื่อนำวัสดุมาแช่ในน้ำลายเทียมสังเคราะห์⁽²⁸⁾

คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ

1. ส่วนประกอบ

ส่วนประกอบของไบโอเดนทินประกอบไปด้วยส่วนผง เป็นแคลเซียมซิลิเกตและส่วนของเหลว โดยมีองค์ประกอบดังนี้⁽²⁹⁾

ตาราง 1 แสดงองค์ประกอบของวัสดุไบโอเดนทิน

ส่วนผง	หน้าที่การทำงาน
1. Tricalcium silicate : $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	องค์ประกอบหลัก
2. Dicalcium silicate : $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	องค์ประกอบรอง
3. Calcium carbonate	ฟิลเลอร์
4. Iron oxide	เม็ดสี
5. Zirconium oxide : ZrO_2	สารทึบแสง
ส่วนของเหลว	หน้าที่การทำงาน
1. Calcium chloride : CaCl_2	ตัวเร่งปฏิกิริยา
2. Hydrosoluble polymer	สารลดการเกิดน้ำในปฏิกิริยา

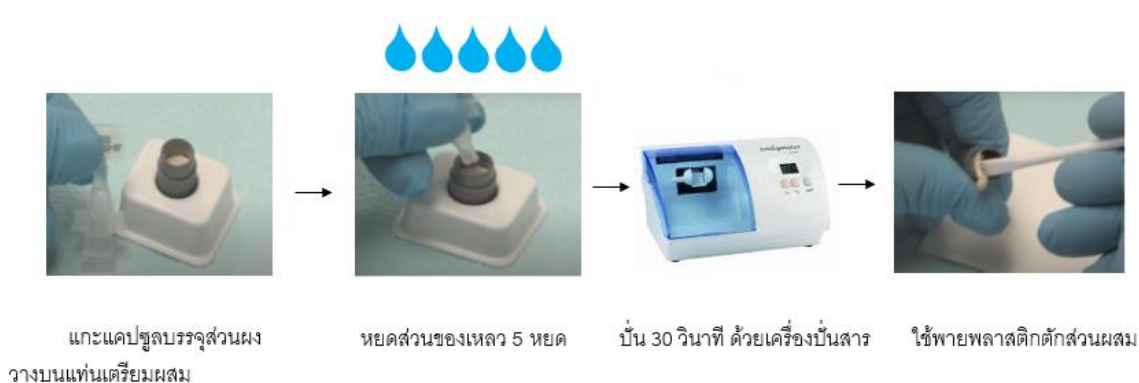
ที่มา : I. About. Biodentine: from biochemical and bioactive properties to clinical applications. *Giornale Italiano di Endodonzia*, vol. 30, no. 2, pp. 81–88, 2016.



ภาพประกอบ 4 แสดงบรรจุภัณฑ์ของวัสดุไบโอเดนต์

2. การใช้งานจากทางบริษัทผู้ผลิต

โดยการใช้งานจะใช้ส่วนของเหลวจำนวน 5 หยด ลงไปบนแคปซูล หลังจากนั้นก็ปิดฝาแคปซูลและนำไปเข้าเครื่องบ่มสาร เป็นเวลา 30 วินาที



ภาพประกอบ 5 แสดงการผสมวัสดุไบโอเดนต์

3. ระยะเวลาการก่อตัว

โดยทางบริษัทผู้ผลิตได้ระบุระยะเวลาในการก่อตัวของไบโอเดนต์ไว้ที่ 9-12 นาที Grech และคณะ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุไบโอเดนต์ นั้นอยู่ที่ 45 นาที โดยใช้วิธีการวัดค่าความแข็งผิว เมื่อวัสดุแช่ใน Hank's solution⁽²⁹⁾

4. ปฏิกิริยาการก่อตัว (Setting reaction)

Hydration reaction



Calcium silicate hydrate

Precipitation reaction



Hydroxyapatite precipitates

ภาพประกอบ 6 แสดงสมการปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ

ที่มา : Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review—part III: clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. J Endod 2010;36:400–13.

เป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Hydration reaction เมื่อ ส่วนผงและส่วนของเหลวผสมกัน โดยจะเกิดการละลายของแคลเซียมซิลิเกต และเกิดการสร้าง hydrogel ของ แคลเซียมซิลิเกตเกิดขึ้น เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium silicate hydrated gel) และจะเกิดการสร้างมากขึ้นเรื่อยๆ เกิดการสะสมแร่ธาตุจนระยะห่างระหว่าง particle จะลดลง โดยจะลดความเป็นรูพรุนลงและมีความแข็งแรงทางแรงกด (Compressive strength) มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป⁽⁹⁾

6. การประเมินการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน

6.1 การประเมินลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ (Morphology) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ภายในเนื้อฟัน

การประเมินการคืนกลับของแร่ธาตุ ด้วยการประเมินลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและวิธีการดูปริมาณแร่ธาตุที่เกิดขึ้น สามารถดูได้ด้วยหลายวิธี เช่น การดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ,การใช้เทคนิคดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy) , ร่วมกับประเมินแร่ธาตุ, การใช้กล้อง Light

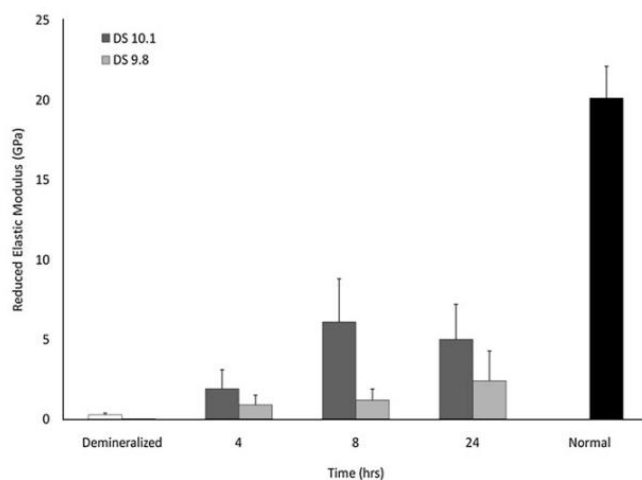
microscope, การใช้เครื่องถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ชนิดไมโคร (Micro-computed tomography) ,การใช้วิธีฟูเรียร์ทรานซฟอร์มนพลาเรดสเปกโตรมิเตอร์ spectroscopic analysis FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)เป็นต้น โดยการประเมินแร่ธาตุ จะดูสัดส่วน ปริมาณของแร่ธาตุแคลเซียมและฟอสเฟตในชั้นเนื้อฟันได้ ซึ่งหากมีปริมาณของแร่ธาตุเหล่านี้ เพิ่มขึ้นจะเป็นการบ่งชี้ว่ามีการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน⁽³⁰⁾

ในการทดสอบประสิทธิภาพการคืนกลับนั้นส่วนใหญ่แล้วนิยมนิยามประเมินดูปริมาณแร่ธาตุที่เกิดขึ้น จากเทคนิคต่างๆที่กล่าวมานั้น อาจจะมีข้อจำกัด เพราะในการจะดูว่าการคืนกลับแร่ธาตุนั้นมีประสิทธิภาพ ในแง่ของคุณภาพของเนื้อฟันนั้น ต้องศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อฟัน⁽³¹⁾

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างมีระบบ ในการศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุของสารประเภทแก้วซีวภาพ พบว่า 3 วิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์การคืนกลับแร่ธาตุ ได้แก่ การศึกษา ลักษณะพื้นผิวกายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) และการทดสอบความแข็งแรง⁽³²⁾

6.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อฟัน

การศึกษาคความแข็งแรงเชิงกล เป็นการประเมินประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุที่ดี โดยในการศึกษาของ Bertassoni LE⁽³¹⁾ ได้ใช้คุณสมบัติเชิงกลทดสอบประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุ โดยประเมินความแข็งแรงระดับนาโน ศึกษาโดยนำแผ่นเนื้อฟันมาจำลองให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุและนำไปแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุที่ต่างกัน 2 ชนิด โดยแบ่งกลุ่มการทดลองเป็น 4 กลุ่มการทดลอง ได้แก่ กลุ่มที่ 1 จำลองเนื้อฟันให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุและนำไปแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุระดับความอิ่มตัวของสารละลาย 10.1 (Degree of saturation = DS 10.1), กลุ่มที่ 2 จำลองเนื้อฟันให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุและนำไปแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุระดับความอิ่มตัวของสารละลาย 9.8 (Degree of saturation = DS 9.8), กลุ่มที่ 3 กลุ่มควบคุมบวก (Positive control) คือ เนื้อฟันปกติที่ไม่ได้ทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุ และกลุ่มที่ 4 กลุ่มควบคุมลบ (Negative control) คือ จำลองเนื้อฟันให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุและไม่ได้นำไปแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ ผลการศึกษาพบว่า ในกลุ่มของเนื้อฟันที่จำลองให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุ มีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นที่ลดลง ในขณะที่เนื้อฟันในกลุ่มที่จำลองให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุและนำไปแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุพบว่ามีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้แช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ แต่ยังมีค่าน้อยกว่ากลุ่มควบคุมบวก ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันกลุ่มที่จำลองการสูญเสียแร่ธาตุและแช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ เทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้แช่ในสารละลายคืนกลับแร่ธาตุ

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

แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการคืนกลับแร่ธาตุแล้วนั้น จะส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟัน ซึ่งผู้ทำการศึกษาได้วิเคราะห์ว่า การที่เนื้อฟันจะมีความแข็งแรงเชิงกลมากขึ้นนั้นเป็นผลประมวลของทุกปัจจัยทั้งในด้านปริมาณของแร่ธาตุ และคุณภาพของแร่ธาตุที่เกิดขึ้น

ความแข็งของวัสดุ (Hardness) คือ การต้านทาน (Resistance) ต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อมีแรงกดมากระทำ (Compressive force) แบ่งออกเป็น⁽³³⁾

1.การทดสอบความแข็งระดับไมโคร การทดสอบระดับไมโครมีด้วยกันหลายวิธีโดยวิธีที่นิยมในทางทันตกรรมได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop hardness test) และแบบวิกเกอร์ส์ (Vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop hardness test)

หน้าตัดของหัวกดจะเป็นรูปทรงปิรามิด เกิดรอยกดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยจะมีการคำนวณออกมาเป็นค่า Knoop Hardness Number (KHN) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$KHN = \frac{P}{L^2 C}$$

โดยที่ ค่า P คือ แรง (Load) หน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

ค่า L คือ ความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

ค่า C คือ ค่าคงที่ โดยจะมีค่าตามแต่ละบริษัทของหัวกดที่ใช้กำหนด

การทดสอบความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)

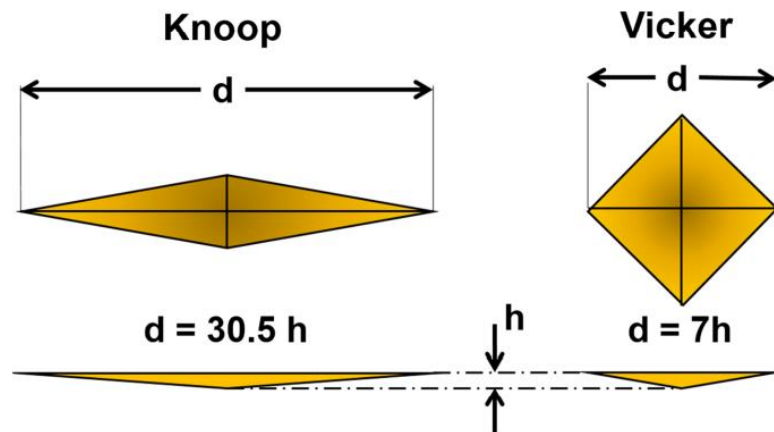
หัวกดจะเป็นรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม (square base diamond pyramid) โดยทำมุมกัน 136° โดยจะคำนวณออกมาเป็นค่า Vickers Hardness (VHN) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2}$$

โดยที่ค่า P คือ แรง (Load) หน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

ค่า L คือ ความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด (Diagonal) หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

ค่า θ คือ มุมระหว่างหัวกดรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม (square base diamond pyramid) ทำมุมกัน คือ $136^{(34)}$



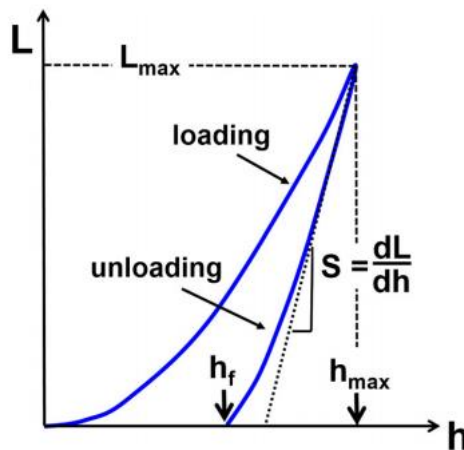
ภาพประกอบ 8 แสดงรูปรอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบนู๊ป (Knoop hardness test) และแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

ที่มา : Broitman, E. (2016). Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters*, 65(1).

2. การทดสอบความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation tests)

ได้รับความนิยมเพราะสามารถวัดค่าแรงกดในระดับต่ำที่ทำให้วัสดุที่เปลี่ยนแปลงได้ และมีค่าความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำสูง (Accuracy)

ตั้งแต่เริ่มให้แรง (Load) ก็เริ่มวัดค่าความลึกในการกด (The dept of penetration) ทั้งนี้ พื้นที่สัมผัสเมื่อเกิดการกดสูงสุด จะคำนวณจากความลึกของรอยกด หรือเรียกว่า มุมหรือรัศมีของอินเดนเตอร์ (angle or radius of the indenter) ค่าความแข็งจะหาได้จากการคำนวณค่าแรงกดต่อพื้นที่สัมผัส⁽³⁵⁾



ภาพประกอบ 9 แสดงกราฟระหว่างแรงที่ใช้ในการกด (L) กับความลึกในการกด (h)

ที่มา : Broitman, E. (2016). Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters*, 65(1).

การทดสอบความแข็งระดับไมโคร (Microindentation) เมื่อหัวกดนั้นสัมผัสกับวัตถุ และยกหัวกดออกไป วัตถุจะเปลี่ยนรูปร่าง หลังจากนั้นคำนวณค่าความแข็งผิวจาก แรงที่กดหาร ด้วยระยะที่ได้จากการกด⁽³³⁾ ซึ่งแตกต่างจากวิธีวัดความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation) ซึ่งจะ เริ่มวัดค่าความแข็งตั้งแต่หัวกดนั้นสัมผัสกับชิ้นตัวอย่าง ทำให้สามารถหาค่ามอดุลัสสภาพความ ยืดหยุ่นได้ตลอดช่วงความลึกของการกด ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องกว่าการทดสอบระดับไมโครที่วัดมุมี การเปลี่ยนรูปไปจากการกด

ในการทดสอบการคืนกลับแร่ธาตุด้วยการทดสอบเนื้อฟันที่ได้รับการคืนกลับแร่ธาตุ ด้วยการวัดความแข็งผิวในระดับไมโครนั้น (Microhardness) ถูกนำมาใช้ในหลายการศึกษา เช่น ในการศึกษาของ Jang และคณะในปี ค.ศ.2018 เป็นการหาค่าความแข็งผิวของเนื้อฟันภายหลัง จากการคืนกลับแร่ธาตุโดยใช้วัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของ Bioactive glass (BAG) โดยมีวิธีการศึกษาโดยค่าความแข็งผิวของเนื้อฟันโดยวิธีวัดความแข็งในระดับไมโคร โดยผู้วิจัยได้ อภิปรายข้อจำกัดจากการทดสอบไว้ว่า การทดสอบความแข็งผิวของเนื้อฟันในระดับไมโครอาจ ยังให้ผลที่ไม่ชัดเจนเท่าการใช้การทดสอบความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation tests) เนื่องจากอาจไม่ได้สะท้อนถึงผลการศึกษาในโครงสร้างระดับนาโนของผิวเนื้อฟันที่ศึกษา การใช้

การทดสอบความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation tests) อาจเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมมากกว่า⁽³⁶⁾

นอกจากนี้ ยังพบว่ามีความแตกต่างของปริมาณแร่ธาตุที่พบในเนื้อฟันในแต่ละบริเวณ โดยเนื้อฟันที่อยู่รอบท่อเนื้อฟัน (Peritubular dentin) พบว่าส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยผลึกอะพาไทต์ (Apatite crystals) และมีสารอินทรีย์ (Organic matrix) เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เนื้อฟันที่อยู่ระหว่างท่อเนื้อฟัน (Intertubular dentin) พบแร่ธาตุในปริมาณน้อยกว่า ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยคอลลาเจนชนิดรูปแบบที่ 1 (Collagen type I)⁽¹¹⁾ ดังนั้นประเมินด้วยความแข็งผิวระดับนาโนจะสามารถเลือกตำแหน่งในการประเมินได้ ซึ่งจะให้ค่าที่มีความแม่นยำกว่าการทดสอบระดับไมโคร



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง
2. การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร

ใช้ฟันกรามแท้ซี่ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ที่ไม่มีรอยผุ รอยสึก และไม่มีการบูรณะใดๆ หลังจากนั้นนำฟันไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ต้องไม่มีรอยสึก รอยร้าวใดๆ จำนวน 25 ซี่

การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ฟันที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือก จะถูกทำความสะอาด และเก็บรักษาในสารละลายไทมอล หลังจากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างโดยการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย แบ่งกลุ่มการทดลองดังนี้

1. กลุ่มทดลอง ทดสอบจากการเตรียมโพรงฟันลักษณะคลาสไฟฟ์ที่ผ่านการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุจำลองการสูญเสียแร่ธาตุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin) ด้วยวิธีวัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) แบ่งเป็น 3 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 5 ซี่ตัวอย่าง

- 1.1 โพรงฟันที่บูรณะด้วยแคลเซียมซิลิเกต ไบโอเดนทีน Biodentine (Septodont, . Saint-Maur-des-Fossés, France)

- 1.2 โพรงฟันที่บูรณะด้วยกาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดดั้งเดิม กาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ : ฟุจิไนน์ Fuji ix GP EXTRA (GC, Tokyo,Japan)

- 1.3 โพรงฟันที่บูรณะด้วยเรซินมอดิฟายด์กาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟุจิทูที่แข็งตัวด้วยแสง Fuji II LC (GC, Tokyo,Japan)

2. กลุ่มควบคุม

2.1 กลุ่มควบคุมลบ (Negative control) กลุ่มที่ผ่านการทำจำลองการสูญเสียแร่ธาตุและไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุใดๆ และเก็บแช่ในสารละลายน้ำปราศจากประจุก่อนนำมาทดสอบ

2.2 กลุ่มควบคุมบวก (Positive control) กลุ่มเนื้อฟันปกติ โดยเป็นโพรงฟันที่ผ่านการกรอเตรียมโพรงฟัน โดยที่โพรงฟันไม่ได้สัมผัสกับสารเคมีใดๆ โดยเป็นโพรงฟันที่ผ่านการกรอเตรียมโพรงฟัน และเก็บแช่ในสารละลายน้ำปราศจากประจุก่อนนำมาทดสอบ

การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

- 1.1 สารไทมอล (Thymol) ความเข้มข้น 0.1% - M Dent
- 1.2 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
- 1.3 สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4)
- 1.4 กรดอะซิติก (Acetic acid)
- 1.5 สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
- 1.6 สารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva)
- 1.7 น้ำเปล่า
- 1.9 น้ำปราศจากประจุ
- 1.10 อะคลิลิคชนิดบ่มตัวโดยไม่ใช้ความร้อน (PalaXpress®Ultra)
- 1.11 น้ำยาเคลือบเล็บ (Acid resistance varnish, nail varnish)
- 1.11 กระดาษทราย (Silicon carbide abrasive paper)
- 1.12 ท่อพีวีซี (PVC)
- 1.12 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ (Energy dispersive X-ray spectroscopy OXFORD,JSM®-5410LV,JAPAN)
- 1.13 เครื่องทดสอบความแข็งในระดับนาโน (Nano-hardness testing machine, THE FISCHERSCOPE®.HM2000,Gemany)
- 1.14 เครื่องตัดละเอียด (Isomet® 1000 Precision saw ,Buehler)
- 1.15 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Steriomicroscope,Olympus® SZ61,Tokkyo,Japan)

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

1.17 เครื่องชั่งสาร ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, BP210S, Germany)

1.18 เครื่องฉายแสง

1.19 ผงขัดเพชร (Polycrystalline diamond paste) ขนาด 3,1 และ 0.25 ไมโครเมตร

1.20 แผ่นขัดผ้าสักหลาด (Magnetron base plate) -Pace technologies, USA

1.21 แผ่นแก้ว (Glass slap)

1.22 กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดดั้งเดิม กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ : ฟุจิโนน Fuji ix GP EXTRA CAPSULE (GC, Tokyu, Japan)

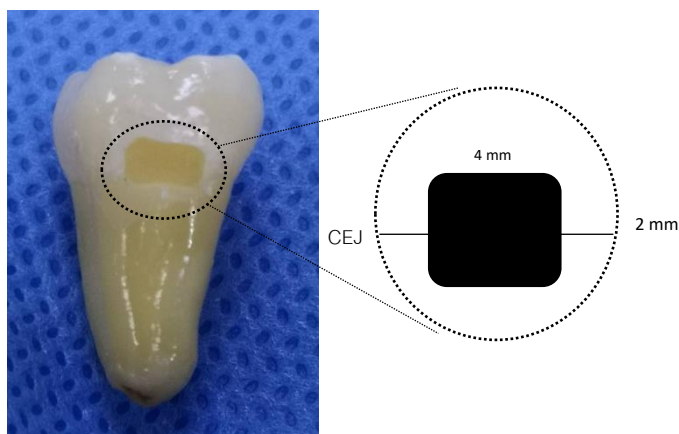
1.23 กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟุจิฟูที่ แข็งตัวด้วยแสง Fuji II LC (GC, Tokyu, Japan)

1.24 แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ไบโอเดนทิน Biodentine™ (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France)

2. การเตรียมชิ้นงาน

2.1 นำฟันกรามแท้ซี่ที่สามของมนุษย์สภาพสมบูรณ์ไม่มีรอยผุ รอยสึก และไม่มีการบูรณะ หลังจากนั้นนำฟันไปส่องดูด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์ ต้องไม่มีรอยร้าว ใดๆ ภายหลังการถอนฟัน และเก็บตัวอย่างในสารละลายไทมอลความเข้มข้นร้อยละ 0.1

2.2 ก่อนการเตรียมโพรงฟัน ทำการเคลือบผิวของฟันทั้งหมดด้วยน้ำยาเคลือบเล็บ (Acid resistance varnish, nail varnish) หลังจากนั้นเตรียมโพรงฟันบริเวณด้านแก้ม ให้มีลักษณะเป็น โพรงฟันคลาสไฟฟ์ ที่มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตร สูง 2 มิลลิเมตร และลึก 1.5 มิลลิเมตร ใช้หัวกรอทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยขอบเขตของโพรงฟัน อยู่ใต้บริเวณรอยต่อระหว่างเคลือบฟันและเนื้อฟัน (Dento-enamel junction) 1 มิลลิเมตรโดยเปลี่ยนหัวกรอเมื่อทำการเตรียมโพรงฟันครบทุก 5 โพรงฟัน โดยวัดขนาดของโพรงฟันที่ได้ด้วยเครื่องมือวัดทางทันตกรรม (Dental probe) ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงการเตรียมโพรงฟันด้านแก้ม ลักษณะเป็นโพรงฟันคลาสไฟฟ์ ที่มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตรสูง 2 มิลลิเมตร และลึก 1.5 มิลลิเมตร

3. ขั้นตอนการทดลอง

จะเป็นขั้นตอนสำหรับกลุ่มที่ทำการทดลอง ทั้งหมด 3 กลุ่ม และกลุ่มควบคุมลบ ส่วนในกลุ่มควบคุมบวกเมื่อเตรียมโพรงฟันแล้ว ทำการเก็บฟันในน้ำปราศจากประจุ จนกว่าจะนำมาทดสอบต่อไป

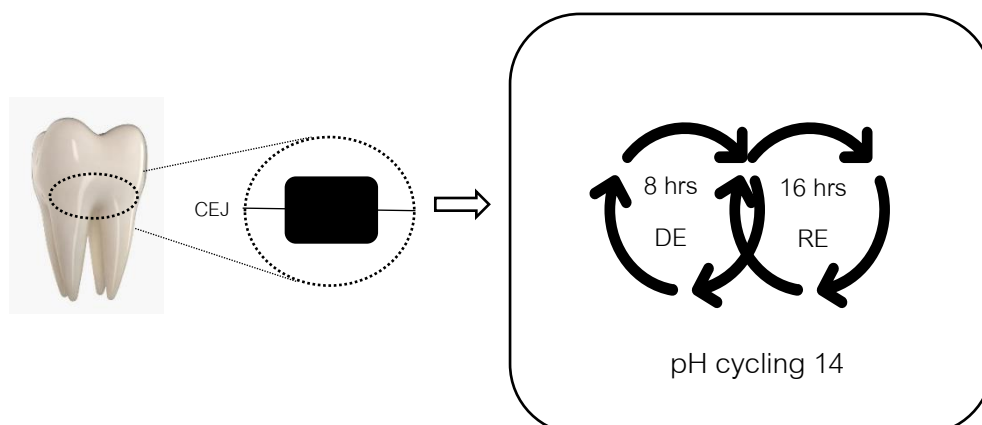
3.1 การจำลองการสูญเสียแร่ธาตุจำลองการสูญเสียแร่ธาตุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin) ด้วยวิธีวัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) โดยเตรียมสารละลายเร่งการสูญเสียแร่ธาตุ (Demineralizing solution) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 4.8 และสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ (Remineralizing solution) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 7.0 ดังแสดงตาราง 2

ตาราง 2 แสดงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้ในการจำลองรอยผุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Artificial caries affected dentin)

องค์ประกอบ	ปริมาณ
1.Demineralizing solution	10 mL
- CaCl ₂	2.2 mM
- NaH ₂ PO ₄	2.2 mM
- Acetic acid	50 mM
2.Remineralizing solution	10 mM
- CaCl ₂	1.5 mM
- NaH ₂ PO ₄	0.9 mM
- KCl	0.15 mM

ที่มา: Marquezan M, Correa FN, Sanabe ME, Rodrigues Filho LE, Hebling J, Guedes-Pinto AC, et al. Artificial methods of dentine caries induction: A hardness and morphological comparative study. Arch Oral Biol. 2009;54(12):1111-7

หลังจากนั้นนำฟันที่ผ่านการเตรียมโพรงฟัน มาแช่ในสารละลายเร่งการสูญเสียแร่ธาตุ (Demineralizing solution) 8 ชั่วโมง สลับกับแช่ในสารละลายเร่งการคืนกลับแร่ธาตุ (Remineralizing solution) 16 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาทั้งหมด 14 วัน^(16, 37) ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงการจำลองรอยผุในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ
(Artificial caries affected dentin)

3.2 นำฟันในกลุ่มทดลองมาบรูณะด้วยวัสดุในแต่ละกลุ่ม

3.2.1 กลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ บรูณะด้วยแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ได้แก่ ไบโอดেন্টิน Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France) หยดส่วนเลวจำนวน 5 หยด ลงในแคปซูลที่เป็นส่วนผงนำแคปซูลไปเข้าเครื่องผสมอะมัลกัมเป็นระยะเวลา 30 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัท จากนั้นเปิดแคปซูล ใช้พายพลาสติกตัดกั๊ววัสดุ และใช้อุปกรณ์การอุดคอมโพสิตคอมโพสิตคาฟเวอร์ (Composite carver) ในการกดวัสดุในแนบไปกับโพรงฟัน

3.2.2 กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดดั้งเดิม บรูณะด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดดั้งเดิมกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ : ฟุจิไนน์ Fuji ix GP EXTRA CAPSULE (GC, Tokyo, Japan) เตรียมผิวโพรงฟันด้วยสารปรับสภาวะเนื้อฟัน (Dentin conditioner) 10 วินาที ล้างน้ำและเป่า ในส่วนของวัสดุ กดส่วนท้ายของแคปซูลให้ผสมกับกับส่วนเลว นำแคปซูลไปปั่นด้วยเครื่องปั่นผสมอะมัลกัม 10 วินาที นำแคปซูลไปใส่ปืนฉีด ฉีดวัสดุลงในโพรงฟันให้เต็ม และเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคลือบที่บริษัทแนะนำ และทำการฉายแสง 20 วินาที

3.2.3 กลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ บรูณะด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ฟุจิทูที่แข็งตัวด้วยแสง Fuji II LC (GC, Tokyo, Japan) เตรียมผิวโพรงฟันด้วยสารปรับสภาวะเนื้อฟัน (Dentin conditioner) 10 วินาที ล้างน้ำและเป่า ในส่วนของวัสดุ กดส่วนท้ายของแคปซูลให้ผสมกับกับส่วนเลว นำแคปซูลไปปั่นด้วยเครื่องปั่นผสมอะมัลกัม 10 วินาที นำแคปซูลไปใส่ปืนฉีด ฉีดวัสดุลงในโพรงฟันให้เต็ม และทำการ

ฉายแสง 40 วินาที และเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคลือบที่บริษัทแนะนำ และทำการฉายแสง 20 วินาที

โดยทุกตัวอย่างจะดำเนินการบรูณะด้วยผู้ทำการทดลองคนเดียวกัน

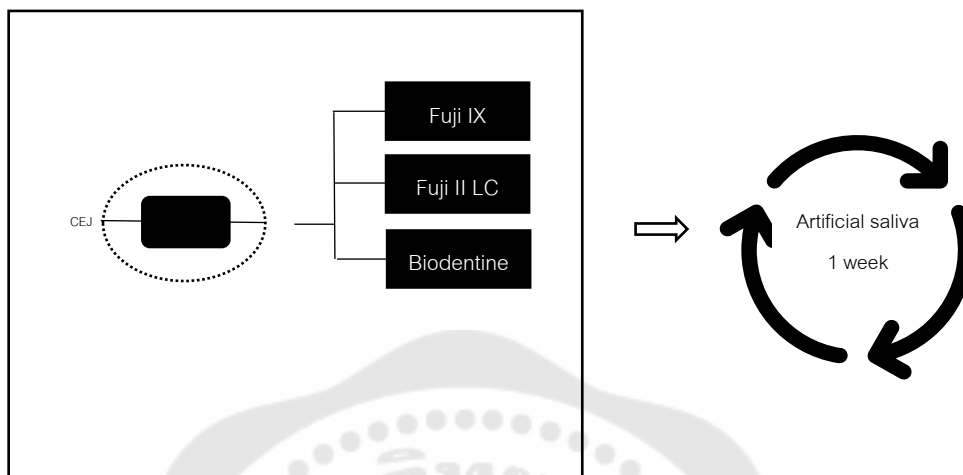
3.2.4 กลุ่มควบคุมลบ (Negative control) กลุ่มที่ผ่านการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุแต่ไม่ได้รับการบรูณะด้วยวัสดุใดๆ นำไปเก็บแช่ในน้ำปราศจากประจุ

3.3 นำฟันตัวอย่างในกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่ม แช่ในสารละลายน้ำลายเทียมโดยองค์ประกอบน้ำลายเทียมดังตาราง 3⁽³⁸⁾ โดยแยกตามกลุ่มทดลอง และเก็บแช่เป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 สัปดาห์ ดังภาพประกอบ 12

ตาราง 3 แสดงองค์ประกอบของสารละลายน้ำลายเทียม

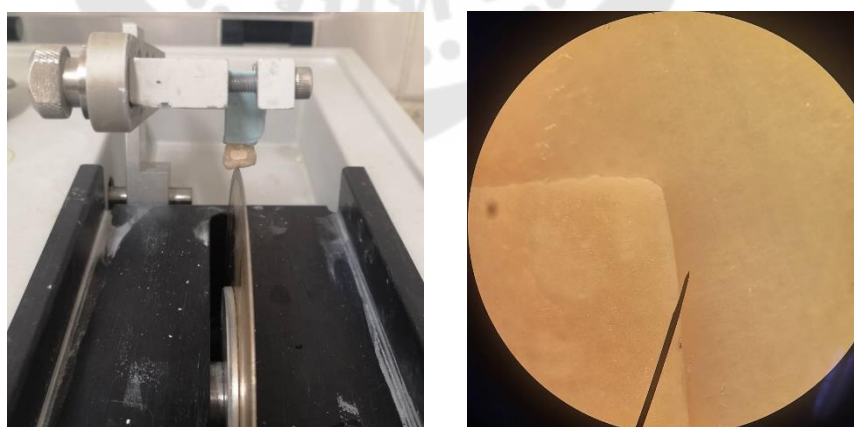
องค์ประกอบ	ปริมาณ
1.KCl	0.65 g/L
2.MgCl ₂	0.058 g/L
3.CaCl ₂	0.165 g/L
4.K ₂ HPO ₄	0.804 g/L
5.KH ₂ PO ₄	0.365 g/L
6. Sodium carboxymethyl cellulose	2 g/L
7.Deionized water to make 1 liter	

ที่มา : Besinis A, van Noort R, Martin N. Remineralization potential of fully demineralized dentin infiltrated with silica and hydroxyapatite nanoparticles. Dental Materials. 2014;30(3):249-62.



ภาพประกอบ 12 แสดงการแบ่งกลุ่มบูรณะในแต่ละกลุ่มทดลอง และการเก็บแช่ในน้ำลายเทียม

3.4 หลังจากนั้นยึดตัวอย่างลงในปูนพลาสติก และตัดฟันตามแนวยาว (Long axis) โดยผ่านกึ่งกลางของวัสดุที่อุด ด้วยเครื่องตัดละเอียดโดยมีน้ำช่วยลดความร้อน (Isomet® 1000 Precision saw ,Buehler) นำชิ้นส่วนที่ได้ดูด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ วัสดุอุดต้องมีลักษณะแน่นเต็ม ไม่มีช่องว่างในวัสดุอุดและไม่มีช่องว่างระหว่างวัสดุอุดและเนื้อฟัน ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงการตัดฟันตามแนวยาว (long axis) และภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ ชิ้นตัวอย่างวัสดุอุดต้องมีลักษณะแน่นเต็ม

3.5 นำชิ้นส่วนที่ได้จากการตัดครึ่ง ยัดเข้ากับแบบหล่อท่อพีวีซี (PVC) ด้วยอะคลิลิกชนิดบ่มตัวอะคลิลิกชนิดบ่มตัวโดยไม่ใช้ความร้อน (PalaXpress®Ultra) ใช้แผ่นแก้ววางรองบริเวณด้านใต้ก่อนยัดชิ้นงาน



ภาพประกอบ 14 แสดงการยัดชิ้นงานลงแบบหล่อท่อพีวีซี (PVC) ด้วยอะคลิลิกชนิดบ่มตัวโดยไม่ใช้ความร้อน

3.6 นำแผ่นเนื้อฟันที่ฝังในแบบหล่ออะคลิลิก ชนิดบ่มด้วยแสง 320 โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

3.7 นำแผ่นเนื้อฟันที่ฝังในแบบหล่ออะคลิลิก ชนิดบ่มด้วยแสง 600 โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

3.8 นำแผ่นเนื้อฟันที่ฝังในแบบหล่ออะคลิลิก ชนิดบ่มด้วยแสง 1200 โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

3.9 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 3 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

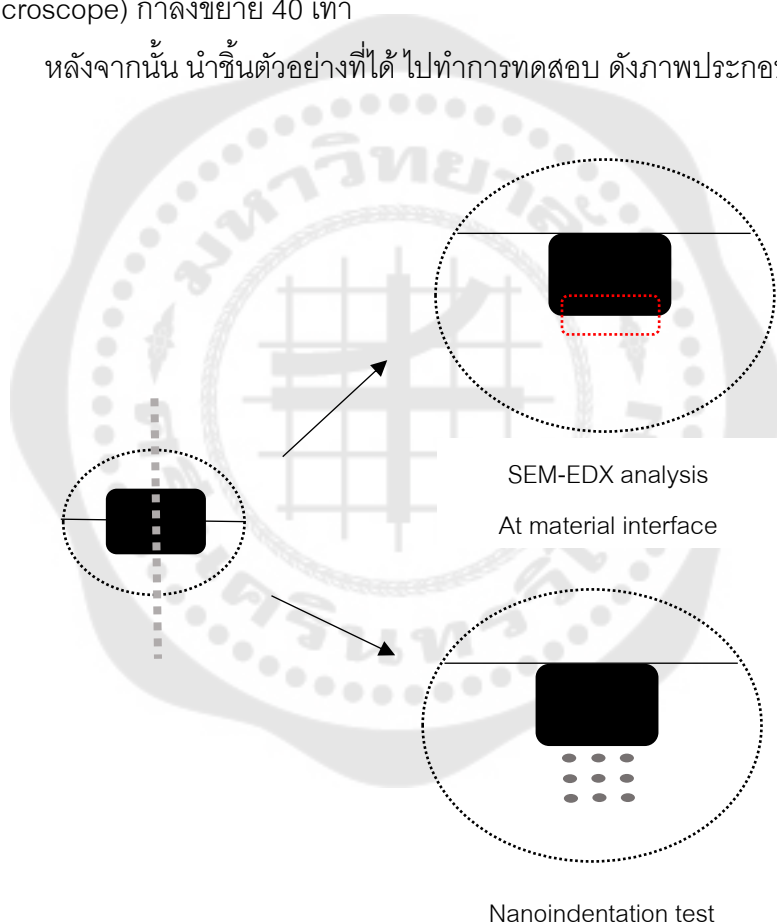
3.10 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ร่วมกับผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

กำลังขยาย 40 เท่า หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

3.11 ใช้ผงขัดเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุ ความเร็ว 150 รอบ ต่อนาที ร่วมกับผ้าสักหลาด ทำการตรวจสอบความเรียบของแผ่นเนื้อฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า หลังจากนั้นนำแผ่นเนื้อฟันไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาดผิว

3.12 ทำการตรวจสอบความเรียบของผิวฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Steriomicroscope) กำลังขยาย 40 เท่า

หลังจากนั้น นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ ไปทำการทดสอบ ดังภาพประกอบ 15



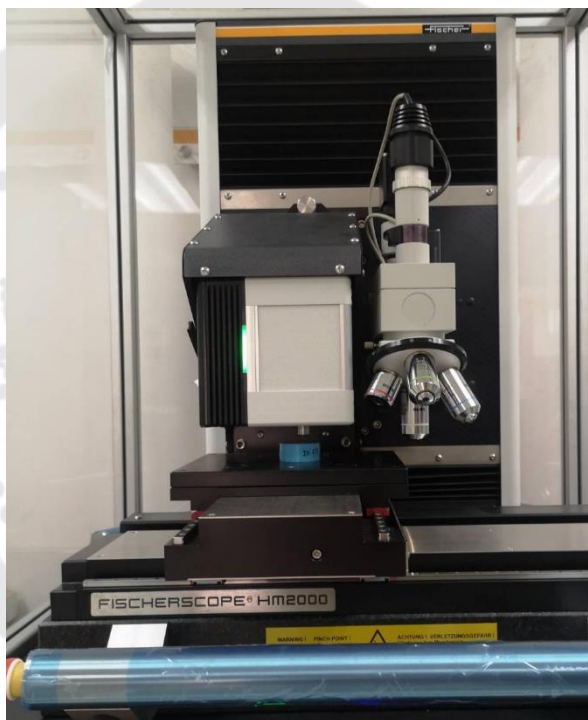
ภาพประกอบ 15 แสดงการเตรียมชิ้นงานโดยการตัดแบ่งครึ่งในฟันที่เดียวกัน ได้เป็น 2 ส่วน และนำแต่ละส่วนไปทดสอบ ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล หาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน และสุ่มตัวอย่างส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ และศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทั้งกลุ่มการทดลองและกลุ่มควบคุมมีระเบียบวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆที่เหมือนกันดังต่อไปนี้

1. ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น โดยการเก็บข้อมูลจากการทดสอบความแข็งระดับนาโน อ้างอิงการศึกษา Bertassoni⁽³¹⁾

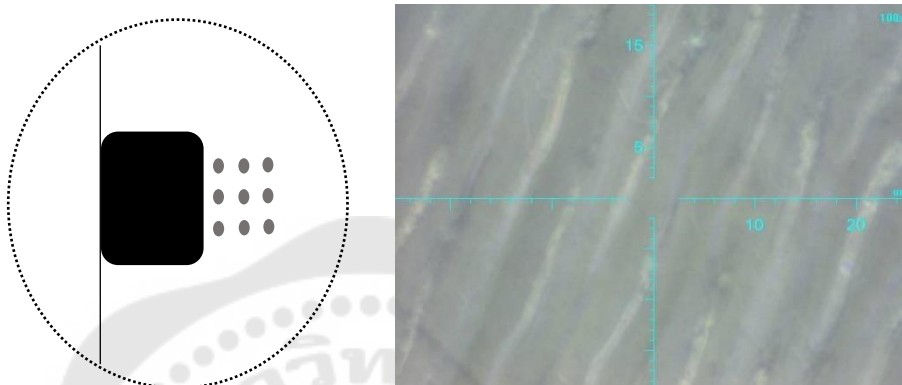
1.1 นำแผ่นเนื้อฟันที่ฝังในแบบหล่ออะคริลิกไปวางบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบความแข็งในระดับนาโน ทำการทดสอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิและทำการทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 10\%$ ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงขึ้นตัวอย่างบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน

1.2 ใช้หัวกดชนิดวิกเกอร์ (Vicker's indenter) เลือกกดเฉพาะด้านที่ตำแหน่งระหว่างท่อเนื้อฟัน ทำการเลือกบริเวณที่กดทั้งหมด 9 ตำแหน่ง โดยกำหนดที่ตำแหน่งห่างจากรอยต่อของเนื้อวัสดุและเนื้อฟันบริเวณ axial wall ที่ระยะ 10 ไมครอน 20 ไมครอน และ 30 ไมครอน ที่ระยะตำแหน่งละ 3 จุด และระยะจากขอบโพรงฟันด้านบน occlusal wall 600 ไมครอน ,1200 ไมครอน และ 1,800 ไมครอน เพื่อที่จะได้เป็นการระบุตำแหน่งการทดสอบได้ใกล้เคียงกัน

ในทุกกลุ่มเพื่อลดความแปรปรวนของการทดลอง บริเวณโดยรวมทั้งหมด 18 ตำแหน่งต่อ 1 ตัวอย่าง^(16, 31) ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงบริเวณในการทดสอบค่าความแข็งผิวระดับนาโน ที่ตำแหน่งใต้ต่อจากรอยต่อของเนื้อวัสดุและเนื้อฟันบริเวณ axial wall และแสดงตำแหน่งการกดเฉพาะบริเวณเนื้อฟันระหว่างท่อเนื้อฟัน

1.3 ในการกดของหัวกด ใน 1 รอย เริ่มจากแรง 0 จนกระทั่งถึงค่าแรงที่ทำให้เกิดร่องรอยหัวกดลงบนแผ่นเนื้อฟัน (Penetration dept) ที่ความลึก 5 ไมโครเมตร ซึ่งแรงกดสูงสุดที่ทำให้เกิดความลึกลงกล่าว คือ 6 มิลลินิวตัน (Load) ใช้ระยะเวลาจากเริ่มออกแรงกดจาก 0 ถึง 6 มิลลินิวตันทั้งสิ้น 3 วินาที (Loading rate) เมื่อถึงค่าแรง 6 มิลลินิวตันจะคงแรงนั้นเป็นเวลา 10 วินาที (Hold) เพื่อให้เกิดครีป (Creep) ให้มากที่สุด ก่อนที่จะค่อยๆ ลดแรงลงจาก 6 มิลลินิวตันจนเหลือ 0 มิลลินิวตันภายในระยะเวลา 3 วินาที (Unloading rate) เมื่อแรงกดมีค่าเป็น 0 หัวกดจะถูกยกขึ้นจากแผ่นเนื้อฟัน (Unload)

1.4 กำหนดการเริ่มต้นการทำงานของเครื่อง หลังจากตั้งค่าเรียบร้อยแล้วอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิในตัวควบคุมอุณหภูมิคงที่

1.5 กำหนดค่าปัวซอง (Poisson's) ที่ใช้ในการคำนวณ คือ 0.31

2. วิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุ และศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ

สุ่มชิ้นงานที่เตรียมไว้ จำนวน 2 ชิ้นงาน ภายหลังจากทดสอบความแข็งระดับนาโนมาศึกษาต่อ ด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่

กำลังขยาย 750 เท่า ก่อนการทดสอบจะปล่อยชิ้นงานให้แห้งอย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาฉาบผิวด้วยแพลทินัม (Platinum)

การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดลอง จะนำข้อมูลจากทั้ง 5 กลุ่มมาเปรียบเทียบกัน

1. การทดลองการกดระดับนาโน นำค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงมอดุลัสสภาพยึดหยุ่นของเนื้อพื้มาวิเคราะห์ทางสถิติ ทดสอบค่าการแจกแจงและความแปรปรวนของข้อมูล (Normality test) โดยใช้สถิติ Shapiro-Wilk test

1.1 กรณีประชากรมีการแจกแจงและความแปรปรวนปกติ จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้สถิติ Bonferroni method

1.2 กรณีประชากรมีการแจกแจงและความแปรปรวนปกติที่ไม่ปกติ จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ Kruskal-Wallis test

โดยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ จะวิเคราะห์ข้อมูล โดยด้วยการใช้การบรรยายเชิงพรรณนา (Descriptive analysis)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยฟຸຈຳลอง ด้วยวัสดุบูรณะที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม โดยวิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นขั้นตอนในการຈຳลองรอยฟຸ ในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยฟຸ โดยนำฟันกรามแท้ซึ่งที่สามไปเตรียมโพรงฟันบริเวณคอฟัน และไปผ่านกระบวนการการใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่างในการຈຳลองรอยฟຸของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยฟຸ หลังจากนั้นจะนำไปบูรณะด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม ในกลุ่มทดลอง ได้แก่ กลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ หลังจากนั้นนำไปเก็บในสารละลายน้ำลายเทียม 1 สัปดาห์และกลุ่มควบคุมอีก 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุมลบ จะเป็นกลุ่มที่ผ่านการຈຳลองโพรงฟันและຈຳลองรอยฟຸโดยการใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง แต่ไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุและสารเคมีใดๆ และกลุ่มควบคุมบวกจะเป็นกลุ่มที่เนื้อฟันมีลักษณะปกติ โดยผ่านการຈຳลองโพรงฟัน โดยไม่ผ่านกระบวนการຈຳลองรอยฟຸและไม่ได้รับสารเคมีใดๆ

และผลการศึกษาพิจารณาประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุดังนี้

1. ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน
2. ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. องค์ประกอบของแร่ธาตุในเนื้อฟัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุแบบการสแกนเชิงเส้น

1. ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน

ระดับเฉลี่ยของค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันทั้ง 5 กลุ่ม พบว่า กลุ่มควบคุมบวก มีระดับเฉลี่ยของ ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น สูงที่สุดเท่ากับ 18.37 ± 1.88 GPa รองลงมาเป็นกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ เท่ากับ 9.68 ± 1.21 GPa กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม เท่ากับ 2.61 ± 0.57 GPa กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ เท่ากับ 2.36 ± 0.25 GPa และกลุ่มควบคุมลบ เท่ากับ 2.11 ± 0.35 GPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตาราง 4 ระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น ของ 5 กลุ่มการศึกษา

	จำนวน	Mean	SD	Min	Max
กลุ่มแคลเซียมซิติลเกตซีเมนต์	5	9.68	1.21	8.35	11.53
กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม	5	2.61	0.57	2.04	3.31
กลุ่มเรซินมอดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์	5	2.36	0.25	1.96	2.63
กลุ่มควบคุมลบ	5	2.11	0.35	1.62	2.58
กลุ่มควบคุมบวก	5	18.37	1.88	15.77	20.34

จากนั้นนำข้อมูลระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น มาทดสอบการแจกแจงของข้อมูล โดยสถิติ Shapiro-Wilk test พบว่า ค่า P-value มากกว่า 0.05 หรือกล่าวได้ว่าระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน มีลักษณะการแจกแจงที่ปกติ จึงการทำวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทั้ง 5 กลุ่ม ด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ผลการศึกษาพบว่า มีค่า P-value เท่ากับ <0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หรือกล่าวได้ว่าค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ระหว่าง 5 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 5 จึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Multiple comparison) ด้วยวิธี Bonferroni ต่อไป

ตาราง 5 ผลการคำนวณสถิติ One-way ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P-value
Between groups	1005.731	4	251.433	227.816	$<0.001^*$
Within groups	22.073	20	1.104		
Total	1027.805	24			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Multiple comparison) พบว่า ค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์สูงกว่ากลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และกลุ่มควบคุมลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($P < 0.001$) โดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างเท่ากับ 7.07, 7.32 และ 7.57 GPa ตามลำดับ ขณะที่ค่าเฉลี่ยของค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($P < 0.001$) โดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างเท่ากับ 8.69 GPa

ค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กับกลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และกลุ่มควบคุมลง ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($P > 0.05$) ขณะที่ค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิมต่ำกว่ากลุ่มควบคุมบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($P < 0.001$) โดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างเท่ากับ 15.76 GPa

ค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น ในกลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์กับกลุ่มควบคุมลง ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($P > 0.05$) ขณะที่ค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ในกลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมบวก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($P < 0.001$) โดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างเท่ากับ 16.01 GPa

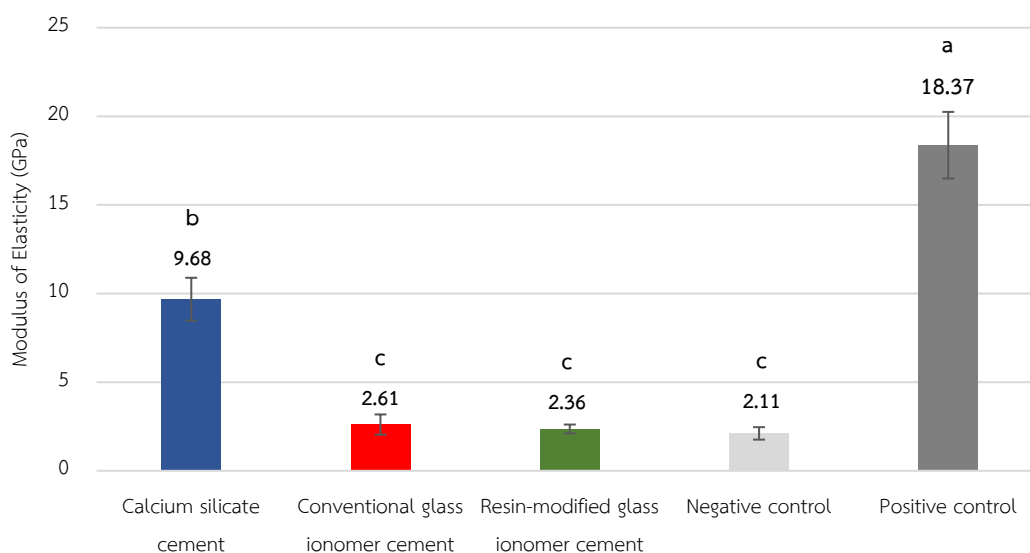
และค่าเฉลี่ยของระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น ในกลุ่มควบคุมลง ต่ำกว่ากลุ่ม ควบคุมบวก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($P < 0.001$) โดยมีค่าเฉลี่ยผลต่างเท่ากับ 16.26 GPa

ข้อมูลแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Multiple comparison) ในตารางที่ 6 และข้อมูลแผนภูมิกราฟแท่ง ในภาพประกอบ 18

ตาราง 6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น

	กลุ่มกลาสไอโอ โนเมอร์ซีเมนต์ ชนิดดั้งเดิม	กลุ่มเรซินมอดิ ไฟด์กลาสไอโอ โนเมอร์ซีเมนต์	กลุ่มควบคุมลบ	กลุ่มควบคุมบวก
กลุ่มแคลเซียมซิลิ เกตซีเมนต์	7.07 ($<0.001^*$)	7.32 ($<0.001^*$)	7.57 ($<0.001^*$)	-8.69 ($<0.001^*$)
กลุ่มกลาสไอโอโน เมอร์ซีเมนต์ชนิด ดั้งเดิม	-	0.25 (1.000)	0.50 (1.000)	-15.76 ($<0.001^*$)
กลุ่มเรซินมอดิไฟด์ กลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์	-	-	0.25 (1.000)	-16.01 ($<0.001^*$)
กลุ่มควบคุมลบ	-	-	-	-16.26 ($<0.001^*$)

ข้อมูลนำเสนอโดย mean difference (P -value), วิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Bonferroni* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพประกอบ 18 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของระดับมอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันทั้ง 5 กลุ่ม
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติ

2. ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฟัน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 750 เท่า พบลักษณะดังต่อไปนี้

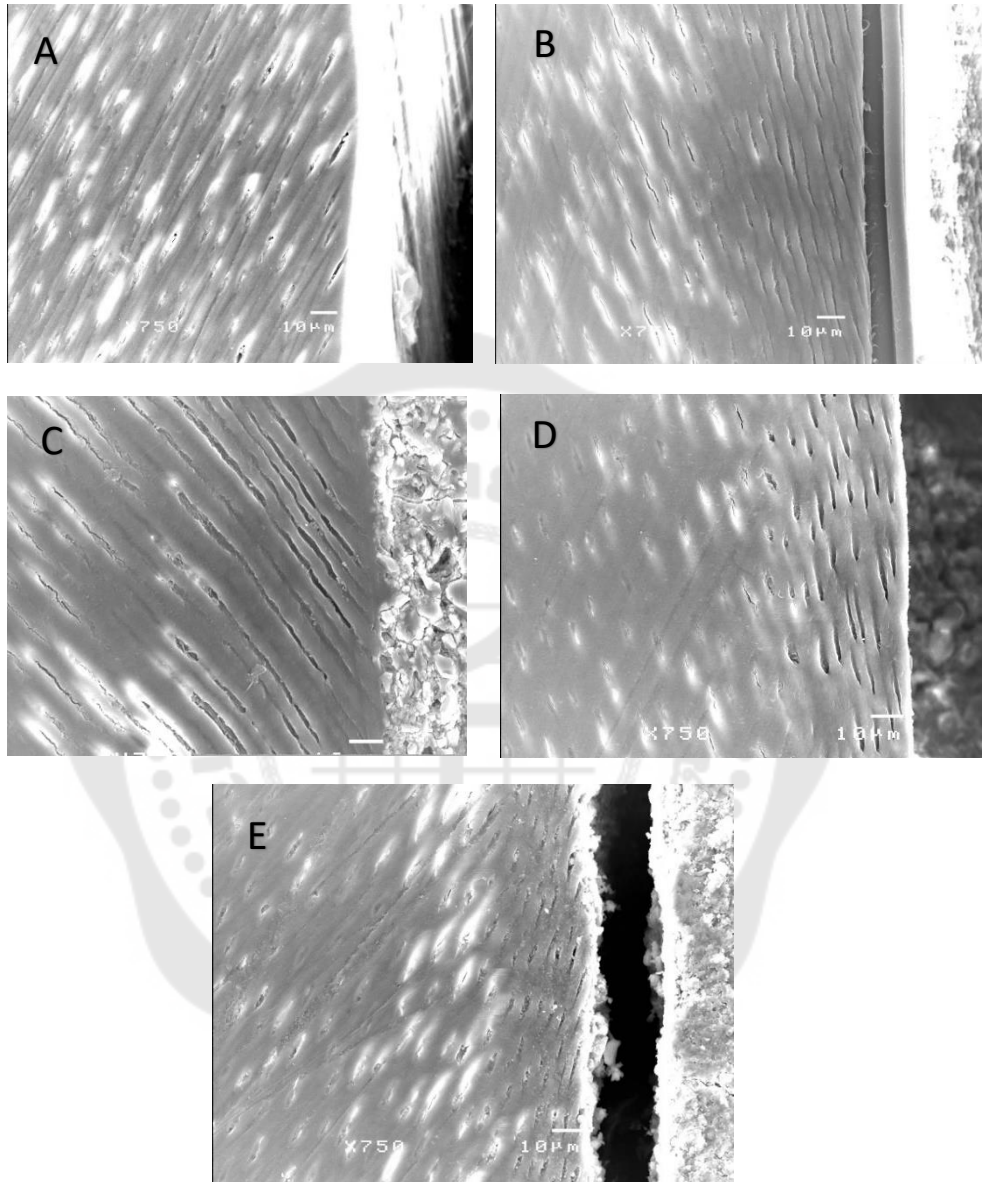
กลุ่มควบคุมบวก เป็นกลุ่มเนื้อฟันปกติที่ไม่มีการสูญเสียแร่ธาตุจะพบลักษณะของท่อเนื้อฟันที่มีขนาดและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และพบแร่ธาตุอยู่บริเวณรอบท่อเนื้อฟันและภายในท่อเนื้อฟัน

กลุ่มควบคุมลบ เป็นเนื้อฟันที่ผ่านการจำลองรอยผุโดยไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุใดๆ พบขนาดของท่อเนื้อฟันและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยเนื้อฟันที่พบในระยะจากขอบโพรงฟันเข้าไปที่ระยะประมาณ 60 ไมครอน จะพบลักษณะท่อเนื้อฟันที่กว้างขึ้น ภายในท่อเนื้อฟันมีลักษณะกลวง ไม่พบแร่ธาตुरอบท่อเนื้อฟันหรือภายในท่อเนื้อฟัน

ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และกลุ่มเรซินคอมโพสิทกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ลักษณะของเนื้อฟันใต้ต่อวัสดุ พบท่อเนื้อฟันที่มีขนาดและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยพบว่ามีความกว้างขึ้นที่ระยะจากรอยต่อของวัสดุกับเนื้อฟันไปประมาณ 60 ไมครอน และไม่พบแร่ธาตुरอบท่อเนื้อฟันหรือภายในท่อเนื้อฟัน

ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ พบว่าเนื้อฟันใต้ต่อวัสดุ พบขนาดและการกระจายตัวของท่อเนื้อฟันที่ไม่สม่ำเสมอ โดยที่ระยะจากรอยต่อของวัสดุกับเนื้อฟันไปประมาณ 60 ไมครอน พบท่อเนื้อฟันที่กว้างขึ้น และพบลักษณะของชั้นแร่ธาตุสะสมในท่อ และรอบท่อเนื้อฟัน

ดั่งภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ A.กลุ่มควบคุมบวก B.กลุ่มควบคุมลบ C.กลุ่ม
 กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม D.กลุ่มเรซินมอดิไฟกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ E.กลุ่ม
 แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์

3.องค์ประกอบของแร่ธาตุในเนื้อฟัน

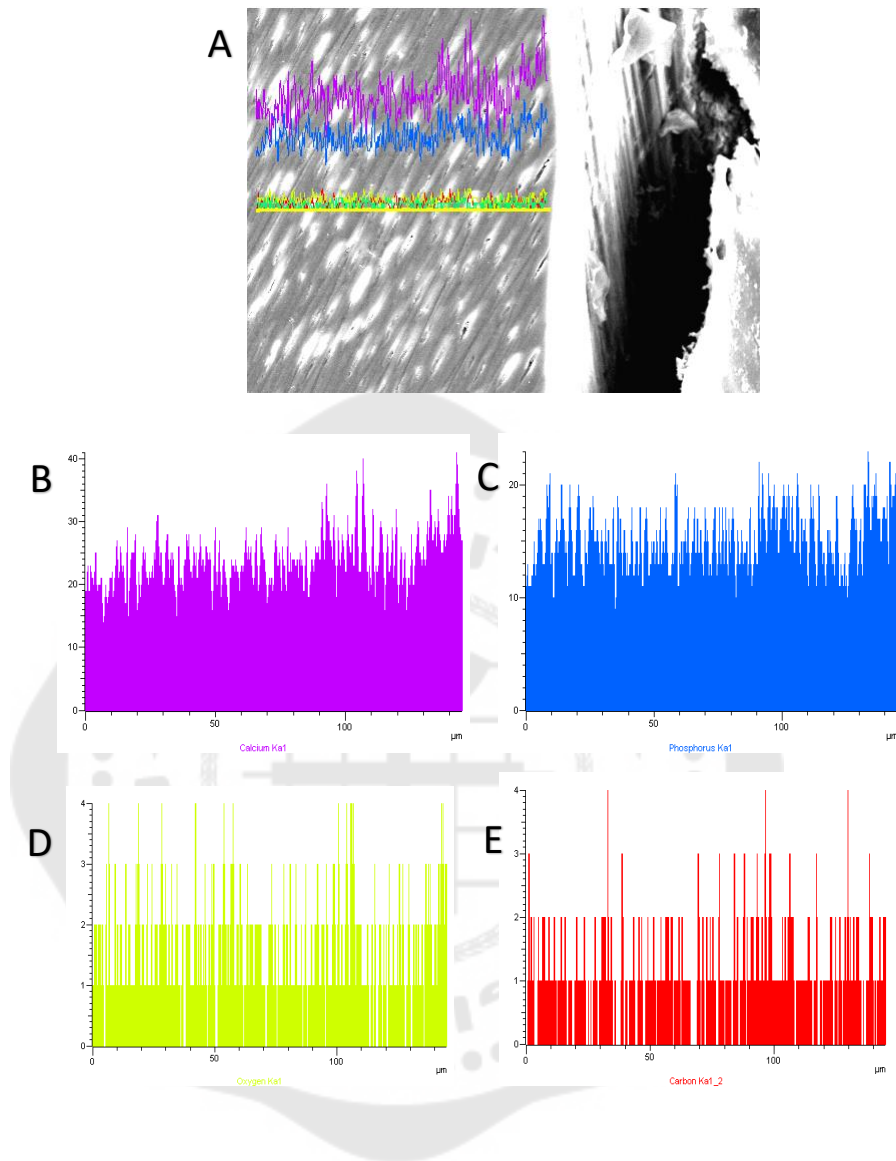
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุแบบการสแกนเชิงเส้นในทั้ง 5 กลุ่มการศึกษา พบลักษณะดังนี้

ในกลุ่มควบคุมบวก ลักษณะของเนื้อฟันปกติมีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ปริมาณมาก นอกจากนั้นยังพบแร่ธาตุพื้นฐานอื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ดังภาพประกอบที่ 20

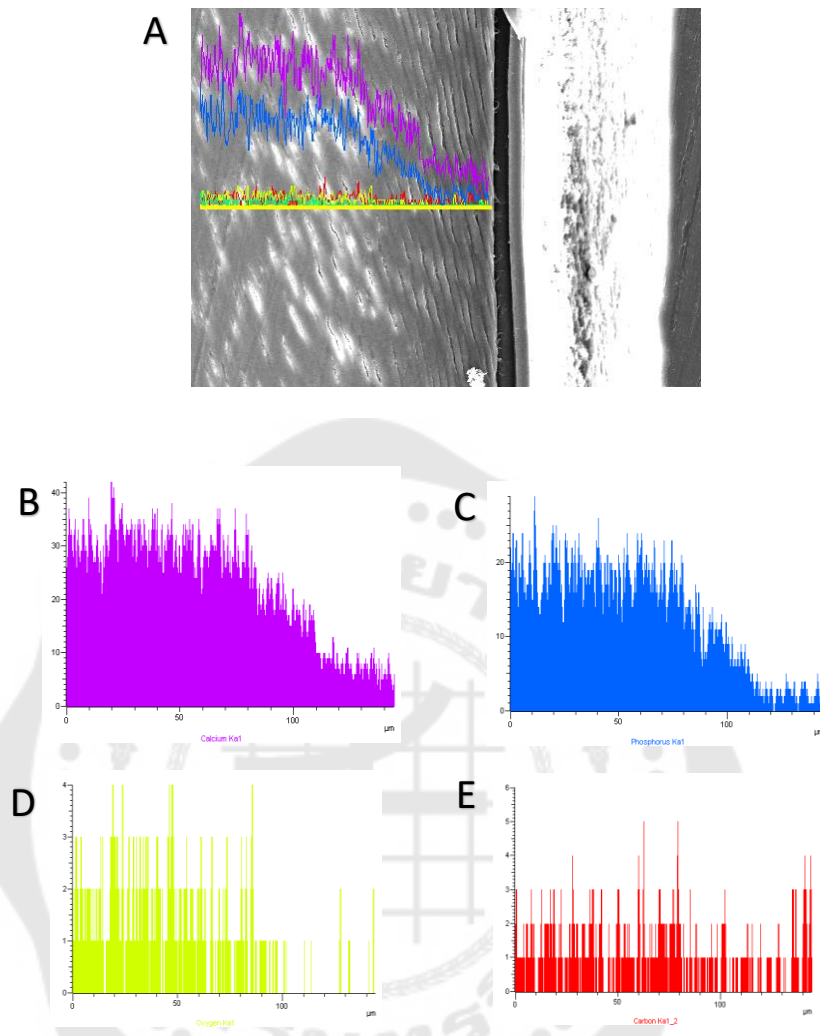
ในกลุ่มควบคุมลบ ลักษณะของเนื้อฟันที่มีการจำลองรอยผุโดยไม่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุใด ๆ พบมีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ที่ระดับต่ำกว่ากลุ่มควบคุมบวก จากขอบรอยต่อของเนื้อฟันได้วัสดุเข้าไประยะ 60 ไมครอน นอกจากนั้นยังพบแร่ธาตุพื้นฐานอื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ดังภาพประกอบที่ 21

ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และกลุ่มเรซินมอดิฟายกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ลักษณะของเนื้อฟันใต้ตัววัสดุ พบมีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ที่ระดับต่ำกว่ากลุ่มควบคุมบวก เช่นเดียวกับกลุ่มควบคุมลบ จากขอบรอยต่อของเนื้อฟันได้วัสดุเข้าไประยะ 60 ไมครอน นอกจากนั้นยังพบแร่ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน แมกนีเซียม สตรอนเทียม และฟลูออไรด์ดังภาพประกอบที่ 22 และ 23

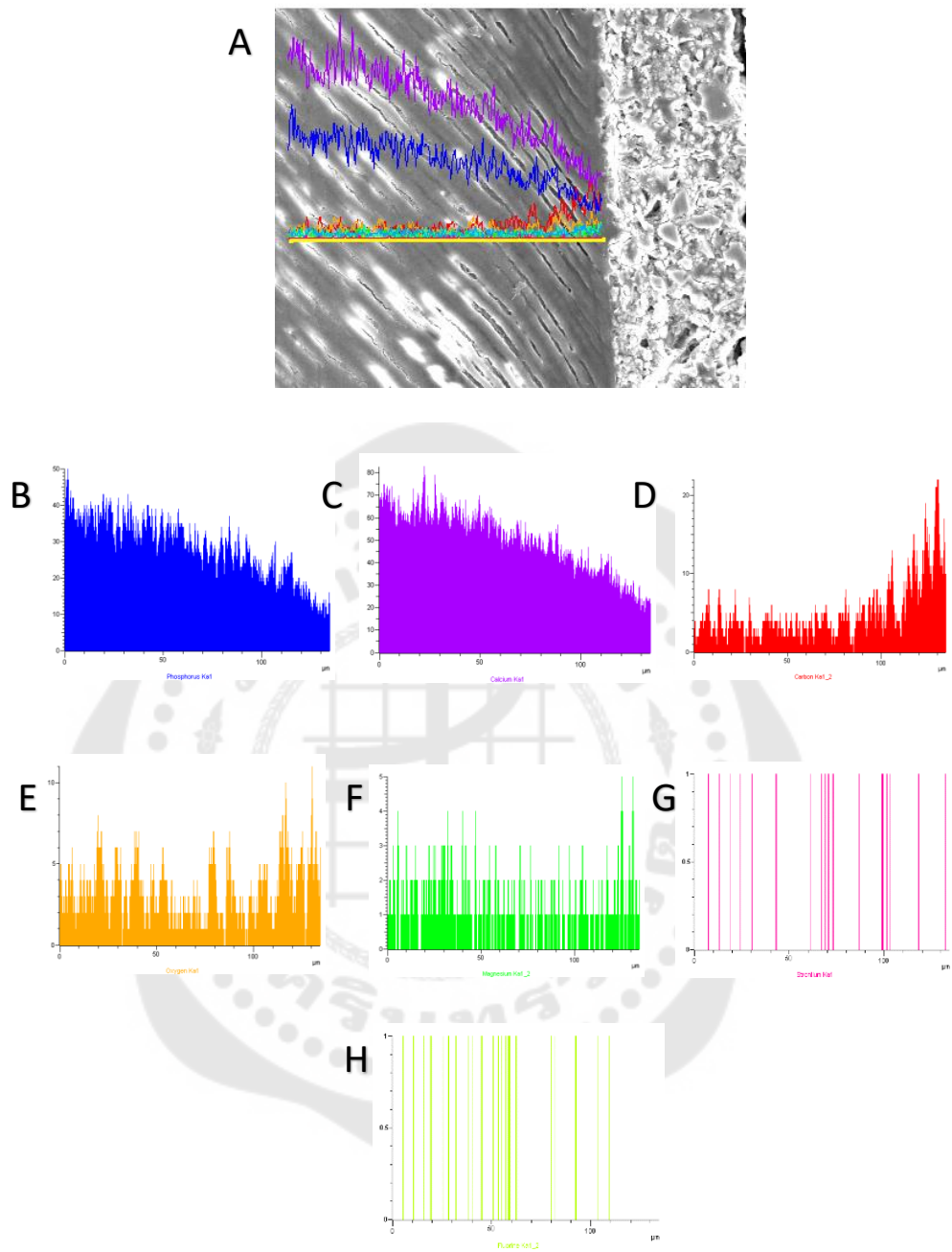
ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ลักษณะของเนื้อฟันใต้ตัววัสดุ พบมีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ที่ระดับสูงกว่ากลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิฟายกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ นอกจากนั้นยังพบแร่ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน แมกนีเซียม ซิลิกอน ดังภาพประกอบที่ 24



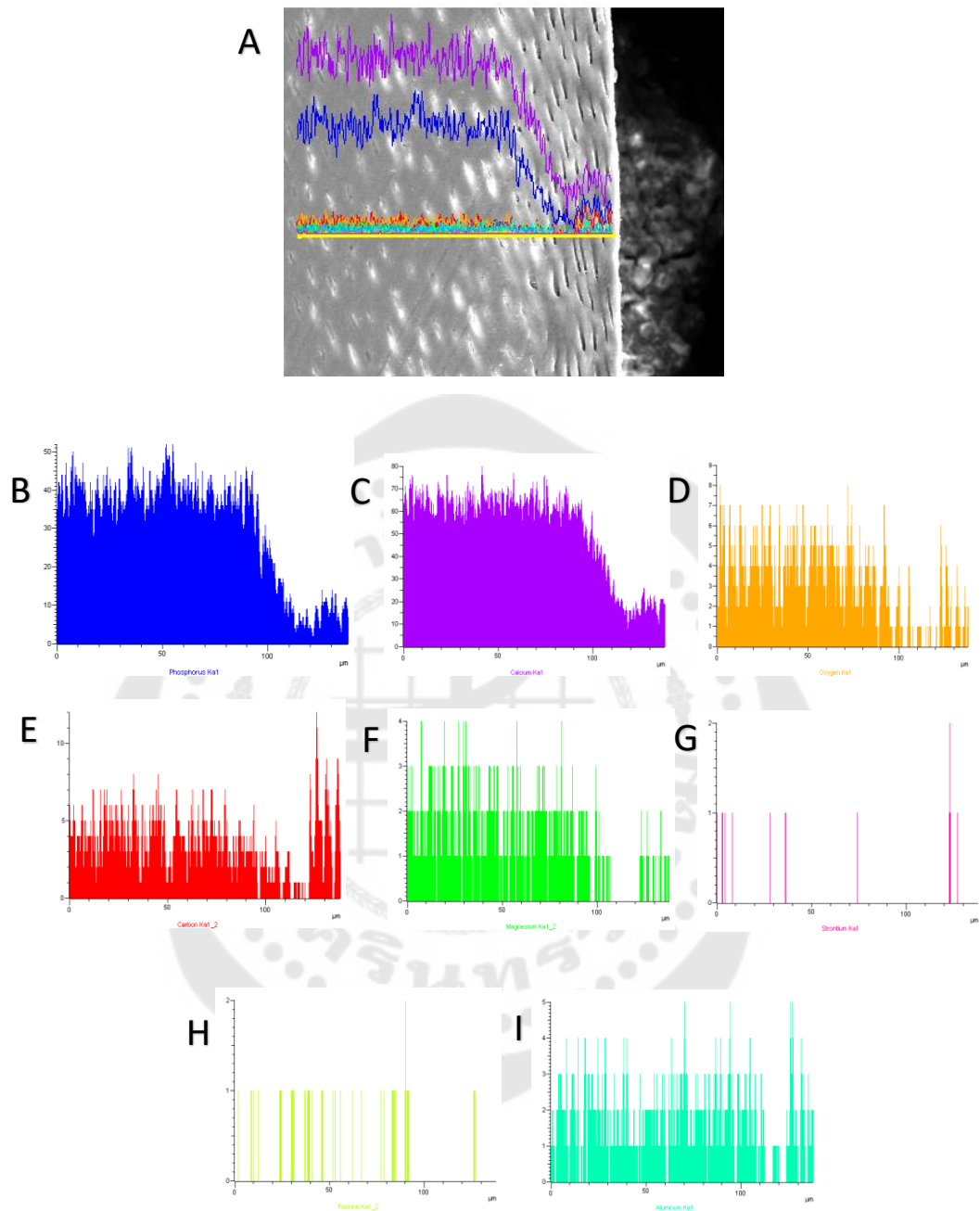
ภาพประกอบ 20 A. องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มควบคุมบวก B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C. องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D. องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E. องค์ประกอบแร่คาร์บอน



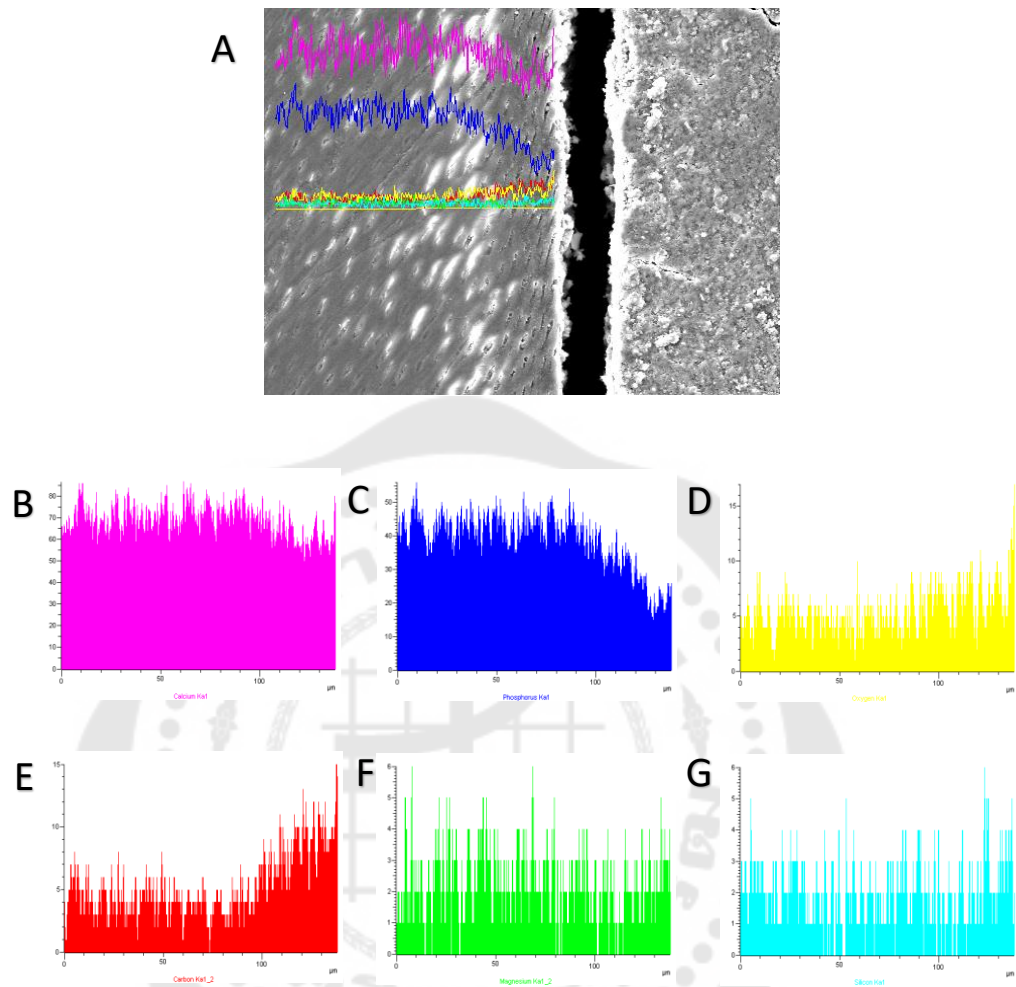
ภาพประกอบ 21 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มควบคุมลบ B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน



ภาพประกอบ 22 A.องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอริซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม B.องค์ประกอบแร่แคลเซียม C.องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D.องค์ประกอบแร่ออกซิเจน E.องค์ประกอบแร่คาร์บอน F.องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม G.องค์ประกอบแร่สตรอนเทียม H.องค์ประกอบแร่ฟลูออไรด์



ภาพประกอบ 23 A. องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มเรซินมอดิไฟด์
 กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C. องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส
 D. องค์ประกอบแร่ ออกซิเจน E. องค์ประกอบแร่คาร์บอน F. องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม
 G. องค์ประกอบแร่ สตรอนเทียม H. องค์ประกอบแร่ฟลูออไรด์ I. องค์ประกอบแร่ อะลูมิเนียม



ภาพประกอบ 24 A. องค์ประกอบของแร่ธาตุลักษณะแบบการสแกนเชิงเส้น ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ B. องค์ประกอบแร่แคลเซียม C. องค์ประกอบแร่ฟอสฟอรัส D. องค์ประกอบแร่ ออกซิเจน E. องค์ประกอบแร่คาร์บอน F. องค์ประกอบแร่แมกนีเซียม G. องค์ประกอบแร่ซิลิกอน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล

ในการศึกษาประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อพื้นที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลอง ด้วยวัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ทางผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลจากการศึกษามาประเมินและวิเคราะห์ทางสถิติ ได้มีการสรุปผลการดำเนินการ ดังหัวข้อต่อไปนี้

- 1.สรุปผลการวิจัย
- 2.อภิปรายผลการวิจัย

1.สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อพื้นที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลอง ด้วยวัสดุบุงระยะที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม ผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งแรงเชิงกล ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อพื้นที่ในกลุ่มควบคุมบวก กลุ่มเนื้อพื้นที่ปกติ มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุโดยการวิเคราะห์แบบสแกนเชิงเส้น ซึ่งพบว่ามีแร่ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณที่สูง และเมื่อดูลักษณะทางกายภาพพบว่า มีลักษณะของท่อเนื้อพื้นที่สม่ำเสมอ และพบแร่ธาตุอยู่บริเวณท่อเนื้อพื้นที่และรอบท่อเนื้อพื้นที่ ส่วนในกลุ่มควบคุมลบ กลุ่มที่มีการจำลองการสูญเสียแร่ธาตุ โดยการจำลองรอยผุ และไม่ได้รับการบุงระยะด้วยวัสดุใดๆพบว่า มีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อพื้นที่ต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากมีนัยสำคัญกับควบคุมบวก ในส่วนของแร่ธาตุ พบมีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ลดลงเป็นอย่างมากตั้งแต่เนื้อพื้นที่บริเวณขอบของโพรงพื้นที่เข้าไปเป็นระยะ 60 ไมครอน และลักษณะทางกายภาพพบว่าท่อเนื้อพื้นที่มีลักษณะกว้าง แสดงถึงการละลายแร่ธาตุออกไปจากท่อเนื้อพื้นที่ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการจำลองรอยผุด้วยกระบวนการการใช้วัฏจักรความเป็นกรดต่าง ทำให้เนื้อพื้นที่มีการสูญเสียแร่ธาตุ และสูญเสียความแข็งแรงเชิงกล ได้เหมือนกับในเนื้อพื้นที่ซึ่งพบในรอยผุตามธรรมชาติ⁽¹⁶⁾

ส่วนในกลุ่มทดลองนั้น กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม และกลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ พบว่ามีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อพื้นที่มากกว่ากลุ่มควบคุมลบ แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุพบว่ามีระดับแร่ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ลดลงเป็นอย่างมากตั้งแต่เนื้อพื้นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุเข้าไปเป็นระยะ 60 ไมครอน ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมลบ นอกจากนี้ยังตรวจพบแร่ธาตุอื่นๆ ได้แก่ สตรอนเทียมและฟลูออไรด์ เป็นต้น ในส่วนของลักษณะทางกายภาพพบลักษณะของท่อเนื้อพื้นที่มาไม่สม่ำเสมอ

โดยเนื้อฟันที่พบในระยะจากขอบโพรงฟันเข้าไปที่ระยะ 60 ไมครอน จะพบลักษณะท่อเนื้อฟันที่กว้างขึ้น ภายในท่อเนื้อฟันมีลักษณะกลวง ไม่พบแร่ธาตุรอบท่อเนื้อฟันหรือภายในท่อเนื้อฟัน

ในกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ พบว่า พบว่ามีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟันมากกว่า กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนขององค์ประกอบของแร่ธาตุพบว่า มีระดับแร่ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และกลุ่มควบคุมลบ ลักษณะทางกายภาพยังพบลักษณะของชั้นแร่ธาตุสะสมในชั้นเนื้อฟัน แสดงให้เห็นว่า แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ นั้นมีประสิทธิภาพในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุจำลองในการศึกษานี้ ได้ดีกว่ากลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม เรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

2.อภิปรายผลการวิจัย

การบูรณะในฟันที่เกิดการสูญเสียแร่ธาตุจากรอยผุในปัจจุบันนี้ มุ่งเน้นไปที่วิธีการรักษา โดยกำจัดรอยผุเท่าที่จำเป็น คงเหลือไว้ซึ่งโครงสร้างของเนื้อฟัน โดยทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อฟันน้อยที่สุด อาศัยการทำหน้าที่ของสารยึดติดเพื่อช่วยทำให้การบูรณะฟันเกิดการยึดติดที่ดี⁽¹⁾ โดยเมื่อเนื้อฟันเกิดการสูญเสียแร่ ธาตุจากรอยผุ สามารถแบ่งเนื้อฟันที่พบได้ 2 ลักษณะ คือ เนื้อฟันที่มีการติดเชื้อ (Infected dentin) จะอยู่ ภายนอก จะพบว่าเนื้อฟันในชั้นนี้มีการสูญเสียแร่ธาตุเป็นอย่างมาก ลักษณะเส้นใยคอลลาเจนที่พบจะถูกทำลายไปไม่พบลักษณะการประสานกัน (Cross-link) ของเส้นใย พบว่าเนื้อฟันในชั้นนี้ไม่สามารถเกิดการคืนกลับของแร่ธาตุในเนื้อฟันชั้นนี้ได้ ส่วนเนื้อฟันในชั้นถัดมาจะเป็นชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) จะเป็นชั้นที่มีการสูญเสียแร่ธาตุไปบางส่วน ในการกำจัดรอยผุจะยังคงเหลือชั้นเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) ไว้ซึ่งเชื่อว่าสามารถที่จะเกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุเองได้⁽¹²⁾

วัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้อย่างยาวนานในรอยโรคฟันผุ จากคุณสมบัติที่สามารถเกิดการยึดติดกับเนื้อฟันทางพันธะเคมี และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเนื้อฟัน ทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ นั้นก็มีข้อเสีย เนื่องจากเป็นวัสดุที่แตกหักได้ง่าย ความต้านทานการสึกต่า จากปัญหา ดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของกลาสไอโอโนเมอร์ โดยการเติมสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยรวมเข้ากับเรซินมอดิไฟด์ เกิดเป็นวัสดุในกลุ่มของเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เกิดขึ้น ทั้งนี้ก็มีหลายการศึกษา ที่พบว่าวัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ทั้ง แบบดั้งเดิมและ วัสดุเรซินมอดิ

ฟลายด์กลาสไอโอไอโมเมอร์ซีเมนต์ สามารถที่จะเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ โดยการปลดปล่อย ฟลูออไรด์ไอออน สตรอนเทียมไอออน เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเนื้อฟันได้ โดยมีผลการศึกษา ที่พบว่าสามารถเกิดการคืนกลับแร่ธาตุได้ โดยดูจากปริมาณแร่ธาตุที่เพิ่มขึ้นในเนื้อฟันภายหลัง จากการได้รับการบูรณะด้วยวัสดุกลาสไอโอไอโมเมอร์^(24, 39) เป็นต้น

วัสดุในกลุ่มต่อมา แคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์นั้นมีการนำมาใช้งานอย่างยาวนาน เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในงานทันตกรรมที่เกี่ยวกับการรักษารากฟัน ไม่ว่าจะใช้เป็นวัสดุอุดอุดยอน ปลายรากฟัน วัสดุซ่อมแซมการทะลุของรากฟัน เป็นต้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีความเข้า กันได้กับเนื้อเยื่อ สามารถทำให้เกิดการคืนกลับของแร่ธาตุ และสร้างผลึกอะพาไทต์ เกิดขึ้นได้ ต่อมาในปี 2009 จึงได้มีการพัฒนาวัสดุกลุ่มนี้ ในชื่อของไบโอเดนทิน (Biodentin) เป็นวัสดุทดแทน ในส่วนของเนื้อฟัน จากคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต สามารถใช้เป็นวัสดุบูรณะในส่วนของตัวฟัน แทนเนื้อฟันได้ มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับเนื้อฟัน โดยมีความแข็งแรงต่อแรงกด (Compressive strength) ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ตัวอื่น ๆ⁽⁴⁰⁾ และมีความแข็งแรงในระดับจุลภาคที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุกลาสไอโอไอโมเมอร์ซีเมนต์⁽⁴¹⁾ นอกจากนี้ในการศึกษาทางคลินิก โดย Koubi และคณะในปี ค.ศ. 2013 พบว่าวัสดุทดแทนเนื้อฟัน หรือ ไบโอเดนทินนั้น สามารถคงอยู่ในการบูรณะในฟันหลังได้นาน 6 เดือน⁽²⁷⁾ ดังนั้นแล้ววัสดุแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว อาจพิจารณานำมาใช้ในการบูรณะเป็นทางเลือกนอกเหนือจาก วัสดุกลาสไอโอไอโมเมอร์ซีเมนต์ที่มีการใช้มาอย่างยาวนาน

ในการประเมิน การคืนกลับของแร่ธาตุโดยดูที่ ปริมาณแร่ธาตุที่เกิดขึ้น หรือวัดคุณภาพ ของการแร่ธาตุที่เกิดขึ้นดูได้ด้วยหลายวิธี เช่น การดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning electron microscope) ,การใช้เทคนิคดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy) , ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุของเนื้อฟัน , การใช้กล้อง Light microscope, การใช้เครื่องถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ชนิดไมโคร (Micro-computed tomography) , การใช้วิธีฟูเรียร์ทรานฟอร์มอนฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ spectroscopic analysis FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เป็นต้นจากเทคนิค ต่างๆที่กล่าวมานั้น จะสามารถระบุสัดส่วนของแคลเซียมและฟอสเฟตที่พบในชั้นเนื้อฟันได้ ซึ่งถือ เป็นการบ่งชี้ว่า การที่มีแร่ธาตุเกิดขึ้น แสดงถึงการเกิดกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุที่เกิดขึ้น ซึ่ง อาจจะยังมีข้อจำกัด เพราะในการจะดูว่าการคืน กลับแร่ธาตุ นั้นว่ามีประสิทธิภาพ ในแง่ของ คุณภาพของเนื้อฟันนั้น มีการศึกษาที่แนะนำว่าต้องศึกษา คุณสมบัติเชิงกลของเนื้อฟัน พบว่าการ ดูคุณสมบัติเชิงกลเป็นวิธีที่ดี⁽³¹⁾ นอกจากนี้ เนื่องจากฟันเป็นอวัยวะที่มีขนาดเล็ก และมีความ

แตกต่างของแร่ธาตุในเนื้อฟัน ในแต่ละบริเวณ⁽¹¹⁾ ดังนั้นการใช้การทดสอบความแข็งระดับนาโนจะสามารถเลือกตำแหน่งในการทดสอบให้อยู่ในบริเวณของเนื้อฟันที่อยู่ระหว่างท่อเนื้อฟันได้ ซึ่งจากการที่สามารถระบุบริเวณที่ทดสอบได้นั้น ทำให้ผลมีความแม่นยำ

อีกทั้งในการศึกษาประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุ นั้นมีวิธีในการทดสอบประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุด้วยกันหลายวิธี โดยเริ่มจากการจำลองเนื้อฟันให้มีการสูญเสียแร่ธาตุ การจำลองการสูญเสียแร่ธาตุให้มีลักษณะที่คล้ายกับรอยผุที่พบในทางคลินิก ในลักษณะของเนื้อฟันที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ (Caries affected dentin) ซึ่งจะเป็นการละลายแร่ธาตุออกไปบางส่วน พบว่าการใช้เทคนิคจำลองการสูญเสียแร่ธาตุในเนื้อฟันโดยวิธีวัฏจักรความเป็นกรดต่าง (pH cycling) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นวิธีที่จำลองลักษณะทางพลวัตของการเกิดฟันผุของฟันธรรมชาติ (Dynamic process of caries formation) เพราะโรคฟันผุเป็นโรคที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งพบว่ามีความแข็งแรงผิวใกล้เคียงกับเนื้อฟันที่มีรอยผุตามธรรมชาติ⁽¹⁶⁾

ในการศึกษาที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาดูการคืนกลับค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันในระดับนาโน ที่ได้รับผลกระทบจากรอยผุ เมื่อบูรณะด้วยวัสดุกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ทั้งชนิดดั้งเดิม และชนิดเรซินมอดิฟายด์กระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยดูที่ระยะเวลา 7 วัน และ 30 วัน โดยจากการศึกษา พบว่าเนื้อฟันสามารถคืนกลับค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันได้เมื่อเวลาผ่านไป โดยที่ระยะเวลา 7 วัน นั้นยังไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่เวลา 30 วัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ⁽⁴²⁾ ซึ่งผลการศึกษาที่พบสอดคล้องกับการศึกษาในที่พบว่า ค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันที่ระยะเวลา 7 วัน เนื้อฟันในกลุ่มที่ได้รับการบูรณะด้วยวัสดุกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ทั้ง 2 กลุ่ม มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มเนื้อฟันในกลุ่มที่ไม่ได้รับการบูรณะ ซึ่งในการศึกษานี้หากเพิ่มระยะเวลาในการศึกษา อาจส่งผลให้มีความแตกต่างของผลการคืนกลับแร่ธาตุในกลุ่มกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ได้

เมื่อดูผลประสิทธิภาพการคืนกลับแร่ธาตุระหว่างวัสดุเคลือบซีเมนต์และวัสดุกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ในรอยผุจำลอง จากการศึกษานี้พบว่าเคลือบซีเมนต์สามารถทำให้เกิดการคืนกลับแร่ธาตุ และคืนกลับค่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟันได้ เพียงกลุ่มเดียวสอดคล้องกับการศึกษาของ Schwendicke และคณะ โดยมีวิธีการศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุ โดยดูปริมาณแร่ธาตุที่พบในเนื้อฟันใต้วัสดุบูรณะด้วยวิธี Transverse microradiography และดูคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อฟันด้วยการวัดค่าความแข็งแรงระดับจุลภาค พบว่าทั้งกลุ่มกระจกไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และเคลือบซีเมนต์ นั้นมีปริมาณแร่ธาตุเพิ่มขึ้น แต่มีเพียงกลุ่มเคลือบซีเมนต์ได้แก่ เอ็มทีเอ และไปโอเดนทีน ที่สามารถคืนกลับค่าความแข็งแรงของเนื้อฟันได้⁽⁴³⁾

นอกจากนี้ในอีกการศึกษา โดยดูการคืนกลับแร่ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค Two-photon fluorescence และ Lifetime imaging พบว่า กลุ่มแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์พบแร่ธาตุในปริมาณที่มากกว่าและลึกกว่า กลุ่มของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (18) และในการศึกษาเปรียบเทียบ การเลียนแบบกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุตามธรรมชาติ (Biomimetic remineralization) พบว่ากลุ่มของกลาสไอโอโนเมอร์นั้นไม่สามารถที่จะคืนกลับแร่ธาตุด้วยวิธีการคืนกลับในแนวคิดนี้ โดยจากการศึกษาของ Kim และคณะในปี 2010 ศึกษาการคืนกลับแร่ธาตุ ในพื้นที่ที่มีการจำลองให้มี การสูญเสียแร่ธาตุทั้งหมด (Complete demineralization) โดยใช้วัสดุ คือ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ : พูจีไนน์ Fuji ix GP EXTRA (GC, Tokyo, Japan) และใช้สารเพื่อเลียนแบบทางชีวภาพ (Biomimetic analog) ได้แก่ Polyacrylic acid และ polyvinylphosphonic acid เพื่อให้เกิดการเลียนแบบคืนกลับแร่ธาตุ โดยดูพื้นผิวทางกายภาพด้วยกล้อง Transmission Electron Microscopy ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุ พบว่ามีปริมาณแร่ธาตุ เพิ่มมากขึ้น แต่ไม่พบลักษณะของอะพาไทต์ (Apatite) เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์⁽²⁰⁾

จากการศึกษาที่ผ่านมาและในการศึกษานี้ที่พบว่าแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์ มีคุณสมบัติ การคืนกลับแร่ธาตุที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวัสดุในกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ อาจ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุในการคืนกลับแร่ธาตุที่แตกต่างกันของ 2 วัสดุกล่าวคือ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์นั้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเนื้อฟัน และ แคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์จะเป็นใน ส่วนของการสร้างสะสมสร้างผลึกแร่ธาตุเกิดขึ้นระหว่างชั้นเนื้อฟันติดต่อวัสดุ และมีคุณสมบัติที่สามารถกักตัวคาร์บอนอะตอมระหว่างวัสดุและเนื้อฟัน^(5, 43-45) สอดคล้องกับการศึกษานี้ที่พบว่าในกลุ่มของแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ พบว่ามีแร่ธาตุ แคลเซียม และฟอสฟอรัส สูงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมและกลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และลักษณะทางกายภาพที่พบลักษณะของชั้นแร่ธาตุสะสมในท่อเนื้อฟัน นอกจากนี้ด้วย คุณสมบัติความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกันของทั้ง 2 วัสดุ โดยกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์นั้นมี คุณสมบัติเป็นกรด โดยองค์ประกอบที่เป็นกรด ได้แก่ กรดโพลีแอลคีนอิก (Polyalkenoic) ส่วน วัสดุแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์นั้นมีคุณสมบัติความเป็นด่าง ปฏิกริยาการกักตัวจะปล่อยไฮดรอกซิล ไอออน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นด่างของวัสดุแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์ อาจจะเป็นสภาวะที่เหมาะสม กว่าในการคืนกลับแร่ธาตุในเนื้อฟัน⁽¹⁸⁾ ด้วยปัจจัยดังกล่าวจึงทำให้กลุ่มแคลเซียมซิติลิกेटซีเมนต์มี การคืนกลับแร่ธาตุที่ดีกว่าในด้านขององค์ประกอบของแร่ธาตุที่พบ และ การคืนกลับค่าความ แข็งแรงเชิงกลของเนื้อฟัน

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาในห้องปฏิบัติการ เนื่องด้วยในการลดความหลากหลายของตัวแปร การใช้การจำลองรอยผู้ด้วยวิธีกระบวนการความเป็นกรดต่างนั้น อาจไม่สามารถจำลองลักษณะของรอยผู้ได้เหมือนกับพันธุกรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งในการศึกษานี้ไม่สามารถระบุได้ว่าแร่ธาตุที่เกิดขึ้นนั้น เกิดบริเวณใดของโครงสร้างในเนื้อฟัน เป็นลักษณะของแร่ธาตุภายในเส้นใยคอลลาเจน หรือภายนอกเส้นใยคอลลาเจน



บรรณานุกรม

1. Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, et al. Managing carious lesions: Consensus recommendations on carious tissue removal. *Advances in dental research*. 2016;28(2):58-67.
2. Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, De Stefano Dorigo E. Dental adhesion review: Aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater*. 2008;24(1):90-101.
3. Nakajima M, Kunawarote S, Prasansuttiporn T, Tagami J. Bonding to caries-affected dentin. *Japanese Dental Science Review*. 2011;47(2):102-14.
4. Sirichan C, Kwanchanok Y. The effect of dentine quality to adhesive at dentine bonding interface. *CM Dent J*. 2013;34(1):23-33.
5. Jefferies SR. Bioactive and biomimetic restorative materials: A comprehensive review. Part i. *Journal of esthetic and restorative dentistry*. 2014;26(1):14-26.
6. Gao W, Smales R, Yip H. Demineralisation and remineralisation of dentine caries, and the role of glass-ionomer cements. *International dental journal*. 2000;50(1):51-6.
7. da Mata C, McKenna G, Burke FM. Caries and the older patient. *Dental update*. 2011;38(6):376-81.
8. Gandolfi MG SF, Botero T, Bossù M, Riccitiello F, Prati C. Calcium silicate and calcium hydroxide materials for pulp capping: biointeractivity, porosity, solubility and bioactivity of current formulations. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2015;13:43-60.
9. Pairokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: A comprehensive literature review—part iii: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *Journal of endodontics*. 2010;36(3):400-13.
10. Tay FR, Pashley DH. Guided tissue remineralisation of partially demineralised human dentine. *Biomaterials*. 2008;29(8):1127-37. eng.
11. Marshall GW Jr MS, Kinney JH, Balooch M. The dentin substrate: structure and properties related to bonding. *J Dent*. 1997 Nov;25(6):441-58.

12. Bertassoni LE, Habelitz S, Kinney JH, Marshall SJ, Marshall GW, Jr. Biomechanical perspective on the remineralization of dentin. *Caries Res.* 2009;43(1):70-7. 2009/02/12.
13. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Yoshida Y, Mine A, De Munck J, Van Landuyt KL. State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater.* 2011;27(1):17-28. 2010/11/27.
14. Niu LN, Zhang W, Pashley DH, Breschi L, Mao J, Chen JH, et al. Biomimetic remineralization of dentin. *Dent Mater.* 2014;30(1):77-96.
15. Yu OY, Zhao IS, Mei ML, Lo EC, Chu CH. A review of the common models used in mechanistic studies on demineralization-remineralization for cariology research. *Dent J (Basel).* 2017;5(2).
16. Marquezan M, Correa FN, Sanabe ME, Rodrigues Filho LE, Hebling J, Guedes-Pinto AC, et al. Artificial methods of dentine caries induction: A hardness and morphological comparative study. *Arch Oral Biol.* 2009;54(12):1111-7.
17. Lenzi TL, Soares FZ, Tedesco TK, de Oliveira Rocha R. Is it possible to induce artificial caries-affected dentin using the same protocol to primary and permanent teeth? *J Contemp Dent Pract.* 2015;16(8):638-42. eng.
18. Watson TF, Atmeh AR, Sajini S, Cook RJ, Festy F. Present and future of glass-ionomers and calcium-silicate cements as bioactive materials in dentistry: Biophotonics-based interfacial analyses in health and disease. *Dent Mater.* 2014;30(1):50-61. 2013/10/12.
19. He L, Hao Y, Zhen L, Liu H, Shao M, Xu X, et al. Biomineralization of dentin. *J Struct Biol.* 2019;207(2):115-22.
20. 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. eng. 2010/01/28.
21. Gu LSK, Y.K.; Liu, Y.; Takahashi, K.; Arun, S.; Wimmer, C.E.; Osorio, R.; Ling, J.Q.; , Looney SWP, D.H.; et al. Immobilization of a phosphonated analog of matrix , biomimetic pwc-lcaatmf, mineralization. *Acta Biomater.* 2011, 268–277.

22. Liu YM, S.; Li, N.; Yiu, C.K.Y.; Mao, J.; Pashley, D.H.; Tay, F.R. Differences between , top-down and bottom-up approaches in mineralizing thick pdc, scaffolds. *Acta Biomater.* 2011, 1742–1751.
23. Francois P, Fouquet V, Attal J-P, Dursun E. Commercially available fluoride-releasing restorative materials: A review and a proposal for classification. *Materials.* 2020;13(10):2313.
24. Kitasako Y, Nakajima M, Foxton R, Aoki K, Pereira P, Tagami J. Physiological remineralization of artificially demineralized dentin beneath glass ionomer cements with and without bacterial contamination. *Operative dentistry.* 2003;28:274-80.
25. Koubi S, Raskin R, Dejou J, About I, Tassery H, Camps J, et al. Effect of dual cure composite as dentin substitute on marginal integrity of class ii open-sandwich restorations. *Operative dentistry.* 2009;35:165-71.
26. Malkondu Ö, Karapinar Kazandag M, Kazazoglu E. A review on biodentine, a contemporary dentine replacement and repair material. *Biomed Res Int.* 2014;2014:160951. eng.
27. Koubi G, Colon P, Franquin JC, Hartmann A, Richard G, Faure MO, et al. Clinical evaluation of the performance and safety of a new dentine substitute, biodentine, in the restoration of posterior teeth - a prospective study. *Clin Oral Investig.* 2013;17(1):243-9. eng.
28. Raskin A EG, Dejou J, About I. In vitro microleakage of Biodentine as a dentin substitute compared to Fuji II LC in cervical lining restorations. *J Adhes Dent.* 2012 Dec;14(6):535-42.
29. About I. Biodentine: From biochemical and bioactive properties to clinical applications. *Giornale Italiano di Endodonzia.* 2016;30(2):81-8.
30. Gandolfi MGT, P.; Siboni, F.; Modena, E.; de Stefano, E.D.; Prati, C. Biomimetic , “smart” rohdpic-sh, materials. *Dent. Mater.* 2011, 1055–1069.
31. Bertassoni LE, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. Mechanical recovery of dentin following remineralization in vitro--an indentation study. *J Biomech.* 2011;44(1):176-81.

32. Taha AA FP, Hill RG, Patel MP. Enamel Remineralization with Novel Bioactive Glass Air Abrasion. *Journal of Dental Research*. 2018;97(13):1438-1444.
33. Ryge G, Foley DE, Fairhurst CW. Micro-indentation hardness. *Journal of Dental Research*. 1961;40(6):1116-26.
34. Broitman E. Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: A critical overview. *Tribology Letters*. 2016;65(1).
35. Chuang SF, Lin SY, Wei PJ, Han CF, Lin JF, Chang HC. Characterization of the elastic and viscoelastic properties of dentin by a nanoindentation creep test. *J Biomech*. 2015;48(10):2155-61. 2015/04/26.
36. Jang JH, Lee MG, Ferracane JL, Davis H, Bae HE, Choi D, et al. Effect of bioactive glass-containing resin composite on dentin remineralization. *J Dent*. 2018;75:58-64. 2018/05/29.
37. Sadoon NY FS, Osman MF. Effect of Using Biomimetic Analogs on Dentin Remineralization with Bioactive Cements. *Braz Dent J*. 2020 Jan-Feb;31(1):44-51.
38. Besinis A, van Noort R, Martin N. Remineralization potential of fully demineralized dentin infiltrated with silica and hydroxyapatite nanoparticles. *Dental Materials*. 2014;30(3):249-62.
39. Massara ML, Alves JB, Brandão PR. Atraumatic restorative treatment: Clinical, ultrastructural and chemical analysis. *Caries Res*. 2002;36(6):430-6. eng. 2002/12/03.
40. Kayahan M, Nekoofar M, McCann A, Sunay H, Kaptan RF, Meraji N, et al. Effect of acid etching procedures on the compressive strength of 4 calcium silicate-based endodontic cements. *Journal of endodontics*. 2013;39:1646-8.
41. Camilleri J. Investigation of biodentine as dentine replacement material. *J Dent*. 2013;41(7):600-10. eng. 2013/05/21.
42. Maneenut C NT, Foxton RM, Tagami J. Effect of glass ionomer cements on nanohardness of caries-affected dentin. *International Chinese Journal of Dentistry*. 2003; 3(4):122-30.

43. Schwendicke F, Al-Abdi A, Pascual Moscardó A, Ferrando Cascales A, Sauro S. Remineralization effects of conventional and experimental ion-releasing materials in chemically or bacterially-induced dentin caries lesions. *Dent Mater.* 2019;35(5):772-9. eng. 2019/03/12.
44. Jefferies S. Bioactive and biomimetic restorative materials: A comprehensive review. Part ii. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry.* 2014;26(1):27-39.
45. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: Calcium silicates and polyalkenoates. *J Dent Res.* 2012;91(5):454-9. eng. 2012/03/23.





ตารางแสดง ระดับค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่น ของ 5 กลุ่มการศึกษาทั้งหมด 25 ตัวอย่าง

	ตัวอย่างที่	Modulus (GPa)	Mean	SD
กลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์	1	10.12	9.68	1.21
	2	9.31		
	3	8.35		
	4	11.53		
	5	9.10		
กลุ่มกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดั้งเดิม	1	2.34	2.61	0.57
	2	3.13		
	3	2.23		
	4	3.31		
	5	2.04		
กลุ่มเรซินมอดิไฟด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์	1	2.35	2.36	0.25
	2	2.44		
	3	2.63		
	4	2.43		
	5	1.96		
กลุ่มควบคุมลบ	1	2.26	2.11	0.35
	2	1.62		
	3	2.58		
	4	1.97		
	5	2.13		
กลุ่มควบคุมบวก	1	17.17	18.37	1.88
	2	15.77		
	3	18.83		
	4	20.34		
	5	19.74		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อรรวรา อัครธรรม
วัน เดือน ปี เกิด	2 กรกฎาคม 2535
สถานที่เกิด	สระบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ.2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	170/19 ม.5 ต.ถนนใหญ่ อ.เมือง จ.ลพบุรี 15000

