



การเปรียบเทียบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน และ ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่
รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันระหว่างสารยึดติดที่แตกต่างกัน



ธีรพันธ์ นราแก้ว

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาทันตแพทยศาสตร์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การเปรียบเทียบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน และ ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่
รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันระหว่างสารยึดติดที่แตกต่างกัน



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาทันตแพทยศาสตร์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การเปรียบเทียบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน และ ลักษณะของพื้นที่ต้านทาน
กรด-ด่างที่รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันระหว่างสารยึดติดที่แตกต่างกัน"

ของ อีร์พันธ์ นราแก้ว

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตแพทยศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. ดร.สิทธิกร คุณวโรตม์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ดร.มยุรชฎี พิพัฒภัสกร)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. ดร.ธนพล ศรสวรรณ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ดร.กรชนก วยัคฆานนท์)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การเปรียบเทียบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน และ ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันระหว่างสารยึดติดที่แตกต่างกัน
ผู้วิจัย	ธีรพันธ์ นราแก้ว
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ดร.มยุรชฎี พิพัฒภาสกร
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. ดร.ธนพล ศรสุวรรณ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. ทันตแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง, สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์, การรั่วซึมระดับนาโน, สารยึดติดที่มีส่วนผสมของเอ็มดีพี, การทดสอบสภาวะกรด-ต่าง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง และ การรั่วซึมระดับนาโนจากการใช้สารยึดติดที่แตกต่างกัน โดยใช้ฟันกราม 40 ซี่ มาตัดทำขึ้นเนื้อฟันหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นแบ่งเป็น 4 กลุ่มๆละ 10 ซี่ ทาด้วยสารยึดติดที่แตกต่างกันคือ เคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ เคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล ซิงเกิลบอนด์ ยูนิเวอร์แซล และ ซิงเกิลบอนด์ทู หลังจากบูรณะด้วยวัสดุอุดเรซิน คอมโพสิตแล้วจึงนำไปทดสอบที่สภาวะแตกต่างกัน 4 กลุ่ม ได้แก่ 1. หาพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง 2. ทดสอบการรั่วซึมระดับนาโน หลังจากการแช่น้ำ 24 ชม. 3. ทดสอบการรั่วซึมระดับนาโนหลังการทำเทอโมไซคลิง 5000 รอบ 4. ทดสอบการรั่วซึมระดับนาโนหลังการแช่สารละลายกรดและด่าง เป็นเวลา 8 วัน จากนั้นตัดชิ้นงานในแนวตั้งแล้วขัดด้วยกระดาษทราย สองดูที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด คำนวนความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างและความลึกของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวและใช้การทดสอบเอชเอสดี ของทูกีย์ เพื่อหาคู่ของข้อมูลที่แตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า เคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างมากที่สุด (0.90 ± 0.49 ไมโครเมตร) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากกลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การทดสอบระดับการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในกลุ่มทดลองที่แช่น้ำ 24 ชม. และกลุ่มที่ผ่านกระบวนการเทอโมไซคลิง 5000 รอบ แต่พบว่ากลุ่มซิงเกิลบอนด์ทู เมื่อผ่านกระบวนการแช่สารละลายกรด-ต่างเกิดการรั่วซึมระดับนาโนมากกว่ากลุ่มอื่นๆ

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (241.05 ± 39.25 ไมโครเมตร) จากผลการทดลองพบว่าชนิดของสารยึดติดส่งผลต่อการเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างและการรั่วซึมระดับนาโนหลังการแช่สารละลายกรดและด่าง



Title	COMPARISON OF NANOLEAKAGE AND THE CHARACTERIZATION OF THE ACID-BASE RESISTANT ZONE AT THE ADHESIVE-DENTIN INTERFACE BETWEEN THE DIFFERENT ADHESIVES.
Author	TEERAPHAN NARA-KAEW
Advisor	Assistant Professor Mayurach Pipatphatsakorn, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Tanapon Sornsuwan, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Master of Sciences in Dentistry (Operative Dentistry) - Type A 2, Naresuan University, 2021
Keywords	Acid-base resistant zone, Self etch adhesive, Nanoleakage, MDP containing adhesive, Acid-base challenge

ABSTRACT

The study aimed to evaluate the thickness of the acid-base resistant zone (ABRZ) and nanoleakage of four different adhesives. For specimen preparation, forty extracted human molars were sliced to remove enamel and to be a piece of 1-mm dentin disc. Then all discs were randomly assigned into four groups, according to the four different dentin bonded conditions with either Clearfil SE bond (SE), Clearfil Tri-s universal (S3), Single bond universal (SU), or Single bond2 (TE) (n= 10). After building up resin composite (Filtek Z350) restoration on top, four assays were performed. Those assays were 1. finding ABRZ by acid-base challenge, 2. nanoleakage test after 24 hours of submerging in water, 3. nanoleakage test after 5000 cycles of thermocycling, and 4. nanoleakage test after 8 days of pH cycling. The prepared samples were sectioned vertically and polished to expose the bonding interface between the dentin and the adhesive, which then be examined under a scanning electron microscopy (SEM) (JSM-5310LV, JEOL, Tokyo, Japan). The average layer thickness of ABRZ for each group was measure using ImageJ. All data were statistically analyzed using one-way ANOVA and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). The thickness of ABRZ ($0.90 \pm 0.49 \mu\text{m}$) obtained in the SE group was statistically significant highest ($p < 0.05$). For nanoleakage tests, no significant difference was found in 24 hours of submerging in water assay and 5000 cycles of

thermocycling assay. While TE group after 8 days of pH cycling showed the significantly highest value ($241.05 \pm 39.25 \mu\text{m}$). Different type of adhesive has an influence on thickness of ABRZ and nanoleakage after pH cycling.



ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพญ. มยุรชฎี พิพัฒภัสกร อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทพ.ธนพล ศรสวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ทั้งสองท่านได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย ให้ข้อเสนอแนะ ความรู้ ข้อคิด ช่วยการวางแผนการทำงาน ติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจน ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง จนกระทั่งงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อย ด้วยดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจและเอาใจใส่ของอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทพ. สิทธิกร คุณวโรตม์ ที่สละเวลามาเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ได้ให้ข้อเสนอแนะ ปรับปรุงแก้ไข ตลอดจนให้แนวคิดต่างๆ ที่เป็น ประโยชน์ในการทำงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร คณาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ นักวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย อบรมสั่งสอน ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยและให้การช่วยเหลือจน ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับการช่วยเหลือและกำลังใจจากบิดา มารดา พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมาก ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนาม ได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบ ขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

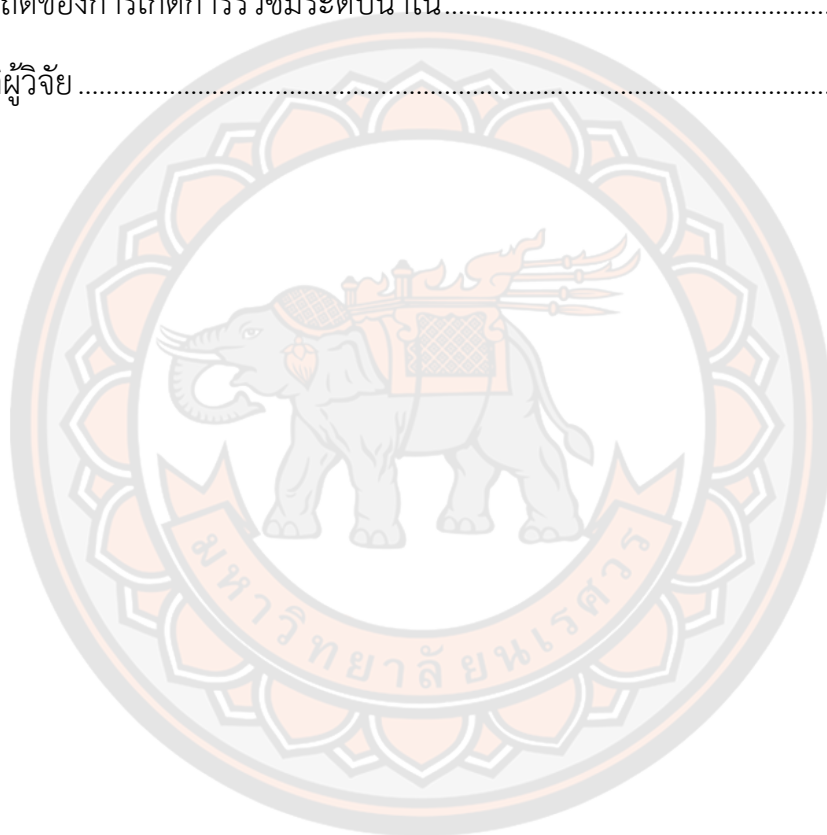
ธีรพันธ์ นราแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
สมมติฐานของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
สารยึดติดที่ใช้ในงานทันตกรรม.....	4
สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์.....	5
สารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล.....	7
พื้นที่ต้านทานกรด-ต่าง.....	9
โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือโมโนเมอร์ที่มีความเป็นกรด (Acidic monomer/Functional monomer).....	13

ฟลูออไรด์	14
การร่วซึมระดับนาโน	15
เทอร์มอไซคลิง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	17
การเตรียมกลุ่มตัวอย่าง.....	17
ขั้นตอนการทาสารยึดติดและการบูรณะ.....	18
การทดสอบหาพื้นที่ด้านทานกรดต่าง	22
การทดสอบเพื่อหาระดับการเกิดการร่วซึมระดับนาโน.....	22
การทำเทอร์มอไซคลิง.....	23
การแช่สารละลายกรดและต่าง.....	23
การประเมินค่าการร่วซึม และ ความหนาของพื้นที่ด้านทาน.....	23
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	25
การเก็บรวบรวมข้อมูล	26
การกำหนดตำแหน่งของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง	26
การวิเคราะห์ข้อมูล	31
บทที่ 4 ผลการวิจัย	32
บทที่ 5 บทสรุป	39
สรุปผลการวิจัย.....	39
อภิปรายผล	39
บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก ก รายการวัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และการเตรียมสารต่างๆ.....	52

รายการวัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และการเตรียมสารต่างๆ	53
การเตรียมสารเคมี.....	53
ภาคผนวก ข ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ สำหรับความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง และการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน	56
ค่าสถิติของความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง.....	57
ค่าสถิติของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน.....	58
ประวัติผู้วิจัย	60



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงตัวอย่างของของสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์	5
ตาราง 2 ตัวอย่างสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์.....	6
ตาราง 3 ตัวอย่างสารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล.....	7
ตาราง 4 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้.....	18
ตาราง 5 ส่วนประกอบและการใช้งานของสารยึดติดในงานศึกษานี้	19
ตาราง 6 ส่วนประกอบของสารละลายดีมินเนอไรซิ่งและสารละลายรีมินเนอไรซิ่ง.....	23
ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างจากสารยึดติดทั้ง 4 ชนิด.....	33
ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะเวลาเกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่ รอยต่อระหว่างสารยึดติดชนิดต่างๆ กับเนื้อฟัน (ไมโครเมตร).....	36

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ในชั้น เนื้อฟัน (กำลังขยาย 3500 เท่า) และ เคลือบฟัน (กำลังขยาย 2000 เท่า).....	9
ภาพ 2 ลักษณะของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นคล้ายกับชั้นเนื้อ ฟันของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดด้วย กำลังขยายที่สูง.....	10
ภาพ 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดด้วยกำลังขยาย 3500 เท่าที่ บริเวณรอยต่อของชั้นเนื้อฟัน และสารยึดติด หลังจากการผ่านกระบวนการทดสอบ ด้วยกรดและด่าง	10
ภาพ 4 ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟัน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน	11
ภาพ 5 ลักษณะการเกิดการละลายของเนื้อฟันจากการทดสอบด้วยกรด-ด่าง.....	11
ภาพ 6 ภาพจำลองของการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างจากการใช้สารยึดติดต่างชนิดกัน.....	13
ภาพ 7 ลักษณะของพื้นที่ถูกยึดด้วยอีพ็อกซี เรซินที่รากฟัน	17
ภาพ 8 การตัดฟันในแนวอน.....	18
ภาพ 9 ชั้นเนื้อฟันที่ถูกตัดออกมา.....	18
ภาพ 10 ลักษณะของชั้นเนื้อฟันหลังจากบурณะด้วยวัสดุเรซิน คอมโพสิตหนา 1 มิลลิเมตร	20
ภาพ 11 ชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยอีพ็อกซี เรซิน	21
ภาพ 12 ทิศทางการตัดชิ้นงาน ตามแนวเส้นประ เพื่อแบ่งชั้นเนื้อฟันออกเป็น 4 ชั้น.....	21
ภาพ 13 ชิ้นงานหลังจากตัดแบ่ง.....	22
ภาพ 14 ลักษณะการตัดฟันในแนวด้านหน้า.....	24

ภาพ 15 บริเวณที่ต้องการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (กรอบสีแดง).....	24
ภาพ 16 ตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคอีดีเอส.....	26
ภาพ 17 สเปกตรัมที่ 27	27
ภาพ 18 สเปกตรัมที่ 28	27
ภาพ 19 สเปกตรัมที่ 26	28
ภาพ 20 สเปกตรัมที่ 22.....	28
ภาพ 21 สเปกตรัม 23.....	29
ภาพ 22 สเปกตรัมที่ 24	29
ภาพ 23 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลของการศึกษานี้ โดยภาพจะจำลองลักษณะการเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างและการรั่วซึมระดับนาโนที่บริเวณส่วนนอกของรอยต่อระหว่างสารยึดติดและเนื้อฟัน โดยดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	30
ภาพ 24 บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 เท่า (A คือ สารยึดติด, C คือ วัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิต, D คือเนื้อฟัน).....	32
ภาพ 25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มแช่น้ำ 24 ชั่วโมง	34
ภาพ 26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มแช่สารละลายกรดและต่าง.....	35
ภาพ 27 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มเทอโมไซคลิง 5000 รอบ	36

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันการบูรณะฟันด้วยวัสดุอุดฟันชนิดเรซิน คอมโพสิต มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งในฟันหน้า และฟันหลัง เนื่องจากมีความสวยงาม แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ของการบูรณะฟันด้วยวัสดุอุดเรซิน คอมโพสิตก็คือการเกิดการผุซ้ำ ซึ่งจะต้องแก้ไขด้วยการเปลี่ยนวัสดุอุดใหม่ (1)

การเกิดการผุซ้ำเกิดจากการสูญเสียสมดุลระหว่างแร่ธาตุที่ผิวฟัน หรือ รอยต่อของวัสดุ กับฟิล์มชีวภาพ (biofilms) โดยปฏิกิริยาการสูญเสียแร่ธาตุ (demineralization) เกิดขึ้นมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาการคืนแร่ธาตุ (remineralization) ซึ่งมีสาเหตุจากกรดที่ผลิตออกมาจากเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต (2) ทำให้สภาวะสิ่งแวดล้อมรอบผิวฟันมีค่าความเป็นกรด (pH) เพิ่มขึ้น เพื่อปรับสภาวะแวดล้อมให้มีค่าความเป็นกรดลดลง จึงเกิดการละลายของแร่ธาตุจำพวกแคลเซียม และ ฟอสเฟต ทั้งในชั้นเคลือบฟัน และชั้นเนื้อฟัน นำไปสู่การเกิดฟันผุ (3)

อีกหนึ่งสาเหตุของการเกิดฟันผุซ้ำคือการเกิดการรั่วซึมระหว่างรอยต่อของวัสดุอุดเรซิน คอมโพสิตและผิวฟัน สามารถเกิดได้ 2 ระดับคือ ระดับไมโคร (microleakage) และ ระดับนาโน (nanoleakage) (4) ซึ่งเมื่อส่องรอยต่อของวัสดุอุดเรซิน คอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จะพบช่องว่างระหว่างฟันและวัสดุบูรณะระดับไมโครเมตรซึ่งเกิดจากการหดตัวขณะเกิดพอลิเมอไรเซชันของวัสดุเรซิน คอมโพสิต หรือ ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของวัสดุบูรณะและฟันเป็นต้น (5) ในขณะที่การเกิดการรั่วซึมในระดับนาโน มักเกิดจากการที่เรซินของสารยึดติด ไม่สามารถแพร่ลงไปยึดกับเนื้อฟันได้อย่างสมบูรณ์ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จึงเกิดเป็นช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุอุดและฟัน หรืออาจเกิดจากการที่สารยึดติดมีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะทำให้มีการดึงน้ำเข้าสู่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เกิดเป็นช่องทางที่น้ำสามารถผ่านในบริเวณนี้ได้ ช่องว่างในระดับนาโนที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้โมเลกุลของน้ำ เชื้อแบคทีเรีย และไอออนต่างๆ สามารถแพร่เข้าสู่ช่องว่าง และทำให้เกิดความล้มเหลว (failure) ระหว่างสารยึดติดและเนื้อฟันซึ่งจะนำไปสู่การผุซ้ำของวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิต (6)

ระบบการยึดติดของวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตกับผิวฟันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการปรับสภาพของชั้นเสมียร์ คือ สารยึดติดระบบโททอลเอทช์ (total-etch) ที่กำจัดเอาส่วนของชั้นเสมียร์ (smear layer) ออกจนหมด และ สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ (self-

etch) ที่จะคงเหลือส่วนของชั้นเซมิยอร์ไว้เพื่อทำปฏิกิริยาการเคมีกับสารยึดติด (7) และเมื่อไม่นานมานี้ ก็ได้มีการพัฒนาสารยึดติดชนิดใหม่ที่สามารถใช้ทั้งในระบบโททอลเอทซ์ และ เซลฟ์เอทซ์ได้ เรียกว่า สารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล (universal adhesive)

มีหลายการศึกษาได้ทำการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ยัดระหว่างวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตกับเนื้อฟัน แล้วนำไปผ่านกระบวนการทดสอบสภาวะกรด-ด่าง (acid-base challenge) จากนั้นส่องดูที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของสารยึดติดและเนื้อฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบบริเวณที่มีความสามารถในการต้านทานการละลายตัวจากกรด เรียกว่า พื้นที่ต้านทานกรด-ด่าง (Acid base resistant zone, ABRZ) (8) โดย Tsuchiya และคณะ ได้ทำการทดลองพบว่า บริเวณนี้สามารถช่วยต้านทานการเกิดฟันผุซ้ำรอบๆ วัสดุอุดได้เนื่องจากสามารถต้านทานการละลายตัวจากกรด (1)

การศึกษาของ Nikaido และคณะ พบว่าอัตราการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ต่างชนิดกัน มีระดับการรั่วซึมที่แตกต่างกัน สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของโมโนเมอร์ (functional monomer) ที่เป็นส่วนประกอบในสารยึดติดนั้น (9)

แม้ว่าการรั่วซึมระดับนาโนจะเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นที่มีขนาดเล็กและพบภายในชั้นของสารยึดติด แต่ก็สามารถส่งผลในทางคลินิกได้จากการเป็นช่องทางให้น้ำไหลผ่านเข้า-ออก ภายในชั้นของสารยึดติด ส่งผลให้การยึดอยู่ของวัสดุต่ำลงได้ ดังนั้นการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของการยึดอยู่ของสารยึดติด และจากงานศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเกิดฟันที่ต้านทานกรด-ด่าง สามารถต้านทานการละลายตัวจากกรดที่บริเวณรอยต่อของฟันและสารยึดติดได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาใดที่ทดสอบว่าการปรากฏของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างจะมีความสัมพันธ์การรั่วซึมระดับนาโนหรือไม่ จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลของสารยึดติดที่แตกต่างกันต่อความกว้างของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่าง และระดับของการรั่วซึมในระดับนาโนระหว่างบริเวณเนื้อฟันที่เกิดฟันที่ต้านทานกรด-ด่างและบริเวณรอยต่อของวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตที่ผ่านการทดสอบสภาวะที่เป็นกรด-ด่าง

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความหนาของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างที่บริเวณรอยต่อของวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตและเนื้อฟันจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ต่างชนิดกัน
2. เพื่อศึกษาระดับการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่รอยต่อของวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตและเนื้อฟันจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ต่างชนิดกัน

ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ทำการทดลองโดยใช้ฟันกรามล่างของมนุษย์ซี่สุดท้ายที่ถูกถอน ไม่มีรอยผุ ไม่มีรอยแตก และ ไม่ถูกบูรณะ เพื่อจำลองลักษณะที่เกิดขึ้นจริงทางคลินิก

ในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบระหว่างผลของการใช้สารยึดติด 4 ชนิดบนผิวฟันตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2562 ถึง มีนาคม 2563

นิยามศัพท์เฉพาะ

พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง, สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์, การรั่วซึมระดับนาโน, สารยึดติดที่มีส่วนประกอบของเอ็มดีพี, การทดสอบสถานะกรด-ต่าง

สมมติฐานของการวิจัย

1. ชนิดของสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง
2. ชนิดของสารยึดติดที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความลึกของการรั่วซึมระดับนาโน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารยึดติดที่ใช้ในงานทันตกรรม

ในปัจจุบันการบูรณะด้วยวัสดุบูรณะเรซิน คอมโพสิตจะมีการใช้สารยึดติด 2 ระบบ คือ ระบบโททอลเอทซ์ และ ระบบเซลฟ์เอทซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดอยู่ระหว่างวัสดุบูรณะเรซิน คอมโพสิตกับผิวฟัน ในระยะแรกสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์จัดเป็นระบบที่ถูกแนะนำ เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงยึดที่สูง (bond strength) กับทั้งชั้นเคลือบฟัน และเนื้อฟัน โดยการใช้งานของสารยึดติดระบบนี้จะใช้กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้นร้อยละ 30 ถึง 40 กัดกร่อนที่พื้นผิวฟันที่ต้องการบูรณะ จากนั้นล้างน้ำเพื่อกำจัดเอาชั้นเสมียร์ออกไป เป็นการเปิดท่อเนื้อฟัน การกัดกร่อนด้วยกรดชนิดนี้ ชั้นเคลือบฟันจะเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของแร่ธาตุสูง ทำให้กรดฟอสฟอริกกำจัดแร่ธาตุที่พื้นผิวออกไปประมาณ 10 ไมโครเมตร และทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กถึงประมาณ 5 ถึง 50 ไมโครเมตร (10) จากนั้นก็ทาไพรเมอร์ (primer) เป่าลม และ ทาสารบอนด์ดิ้ง (bonding agent) หรืออาจใช้สารไพรเมอร์และบอนด์ดิ้งในขั้นตอนเดียวกัน (11, 12) จากนั้นสารบอนด์ดิ้งจะแทรกซึมลงไปตามรูพรุน และเมื่อฉายแสง เรซินที่อยู่ในสารยึดติดจะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน กลายเป็นสายเรซิน (resin tag) ซึ่งช่วยในการยึดติดกับชั้นเคลือบฟัน (13) ในชั้นเคลือบฟันจะเป็นส่วนที่เกิดแรงในการยึดติดดีที่สุด ส่วนในชั้นเนื้อฟันจะมีส่วนประกอบจำพวกอนินทรีย์ (inorganic component) น้อยกว่าชั้นเคลือบฟัน ในขณะที่มีสารอินทรีย์ เช่น น้ำ และโปรตีนเป็นส่วนประกอบมากกว่า กรดฟอสฟอริกจะละลายแร่ธาตุออกประมาณ 5 ถึง 8 ไมโครเมตร (14) หลังจากละลายผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ออกไปแล้ว จะเกิดการเผยผิวของเส้นใยคอลลาเจน หลังทาสารบอนด์ดิ้งวัสดุจะแทรกซึมไปตามเส้นใยคอลลาเจน จากนั้นการฉายแสงจะเกิดปฏิกิริยาเพอริเมอไรเซชันระหว่างชั้นของเนื้อฟันและเรซินเกิดเป็นชั้นไฮบริด (hybrid layer) ในปี 1985 Nakabayashi และคณะ ได้ค้นพบชั้นของโพลิเมอร์ระหว่างวัสดุอุดฟันกับชั้นเนื้อฟัน จากการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของเรซินที่แทรกตัวเข้ามาอยู่บริเวณเส้นใยคอลลาเจน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เรียกว่า ชั้นไฮบริด ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เห็นว่ามีเกิดการเกิดปฏิกิริยาการยึดอยู่ที่ติระหว่างวัสดุและเนื้อฟัน (15, 16) แต่ข้อดีของการใช้สารยึดติดระบบนี้คือวิธีการใช้งานที่ยุ่งยาก และใช้เวลานานเพราะมีหลายขั้นตอน ซึ่งถ้ามีข้อผิดพลาดระหว่างที่ใช้งาน เช่น การปนเปื้อนของน้ำหรือน้ำลายจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงยึดต่ำลง รวมถึงหากเป่าลมที่ชั้นเนื้อฟันให้แห้งเกินไป จะทำให้เส้นใยคอลลาเจนเกิดการพับตัว (collapse) ลดความสามารถในการแทรกซึมของสารยึดติดส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างวัสดุบูรณะฟันกับฟัน และเกิดการรั่วซึมของวัสดุบูรณะฟัน (7, 12, 16)

ตาราง 1 แสดงตัวอย่างของของสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
Adper™ Single Bond 2	3M ESPE, Germany	Etchant: 35% H3PO4 Adhesive: dimethacrylates, HEMA, polyalkenoid acid copolymer, 5 nm silane treated colloidal silica, ethanol, water, photoinitiator	Apply Etchant for 15 sec; rinse for 15 sec; gently air blow to moist surface; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.
Clearfil Photobond	Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan	Catalyst liquid: MDP, HEMA, Bis-GMA, hydrophobic dimethacrylate, BPO, CQ Universal liquid: N,N0 - diethanol p-toluidine, sodium benzen sulfinate, ethanol	Apply Etchant for 15 sec; rinse for 10 sec; gently air blow to moist surface; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.

สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์

ในระยะหลังๆ ได้มีการพัฒนาสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ขึ้นมาเพื่อลดข้อด้อยของสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ คือ สารยึดติดระบบนี้ได้รวมขั้นตอนการกัดกร่อนผิวฟันและการให้ความชุ่มชื้นของท่อเนื้อฟันไว้ด้วยกัน ทำให้ลดขั้นตอนการล้างน้ำ จึงไม่มีปัญหาในเรื่องของการควบคุมความชื้นลดปัญหาการเกิดอาการเสียวฟันลง และลดขั้นตอนการใช้งานลง (17) แต่สารยึดติดระบบนี้มีข้อด้อยคือ ค่าความแข็งแรงยึดจะต่ำกว่าสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ (18, 19) สารยึดติดชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักๆ 2 ส่วนคือ 1.ไพรเมอร์ 2.บอนด์ติง และสารยึดติดระบบนี้จะมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่ากรดฟอสฟอริก

ในปัจจุบันสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ถูกแบ่งตามการใช้งานทางคลินิกแบ่งเป็นสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ชนิดขั้นตอนเดียว (one-step self-etch adhesive) และ สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ชนิดสองขั้นตอน (two-step self-etch adhesive) โดยตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างของของสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์ ส่วนประกอบทางเคมีและวิธีการใช้ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต (17)

ตาราง 2 ตัวอย่างสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทช์

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
Clearfil SE Bond	Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan	Primer: MDP, HEMA, hydrophilic dimethacrylate, photo- initiators, water Bond liquid: MDP, bis-GMA, HEMA, hydrophobic dimethacrylate, photo- initiators, filler	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.
Clearfil S ³ Bond	Kuraray Co Lts, Osaka, Japan	Water, MDP, bis-GMA, HEMA, hydrophobic DMA, CQ, ethyl alcohol, silanated colloidal silica	Apply adhesive for 20 sec; vigorously air blow for 5 sec, and light cure for 10 sec.
OptiBond XTR	Kerr, Orange, CA, USA	Primer : GPDM, Various methacrylate monomers, HEMA, Acetone, Ethanol, Water, CQ Initiator Adhesive : GPDM, Tri-functional monomer, HEMA, Ethanol, Disodium hexafluorosilicate, Methoxyphenol (MEHQ)	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.

สารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล

ในปัจจุบันเนื่องจากได้มีการพยายามรวมสารยึดติด ที่มีหลายๆ ชนิดให้รวมเป็นชนิดเดียวแล้ว สารยึดติดระบบนี้สามารถใช้งานได้ทั้งในระบบโททอลเอทซ์ และ เซลฟ์เอทซ์ นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มคุณสมบัติการยึดติดเข้ากับพื้นผิวอื่นๆ อีกด้วย เช่น โลหะ หรือ เซรามิก จึงเกิดเป็นสารยึดติดอีก ระบบหนึ่ง คือ สารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล

ตาราง 3 ตัวอย่างสารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
Clearfil Universal Bond	Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan	10-MDP, Dimethacrylate resins, HEMA, Ethanol, Water, Silane, Fillers, Initiators	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.
Scotchbond Universal Adhesive or Single Bond Universal	3M ESPE, St. Paul, MN, USA	10-MDP, Dimethacrylate resins, HEMA, Ethanol, Water, Polyacrylic acid copolymer, Silane, Fillers, Initiators	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.
Optibond Universal	Kerr, Orange, CA, USA	Monomers: (GPDM) – self-etching adhesive monomer - Co-monomers including mono- and di-functional methacrylate monomers Solvents: water, acetone and	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
		alcohol Photo-initiator: (CQ)- based photo-initiator system Fillers – three nano-sized fillers Fluoride-releasing fillers – sodium hexafluorosilicate and ytterbium fluoride	light cure for 10 sec.

ความสามารถในการกัดกร่อนพื้นผิวของฟันนั้นจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของโมโนเมอร์ ซึ่งได้มีการแบ่งประเภทของสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ตามค่าความเป็นกรดต่างออกเป็น “กรดแก่ (20) (pH<1), “กรดปานกลาง (Intermediate strong)” (pH~1.5), “กรดอ่อน (mild)” (pH~2) and “กรดอ่อนมาก (ultra-mild)” (pH>2.5) (20)” และการใช้สารยึดติดระบบที่มีความเป็นกรดมากกว่า จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียแร่ธาตุบนผิวฟันได้ลึกกว่าระบบที่มีความเป็นกรดน้อยกว่า (17)

ในชั้นเนื้อฟันสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดมากจะทำหน้าที่คล้ายกับการใช้กรดฟอสฟอริกในการละลายชั้นเคลือบและผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์รอบๆ เส้นใยคอลลาเจน ซึ่งการละลายผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์และชั้นเคลือบออกไปจนหมดแบบนี้จะทำให้เกิดการเผยผิ (exposed) ของเส้นใยคอลลาเจน แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่เสถียร ส่งผลให้ความทนทาน (durability) ของฟันลดลงในระยะยาว

สารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดอ่อนจะกำจัดเอาชั้นเคลือบออกไปบางส่วน โดยจะเหลือผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์รอบๆ เส้นใยคอลลาเจน ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก หรือ หมู่ฟอสเฟตของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน

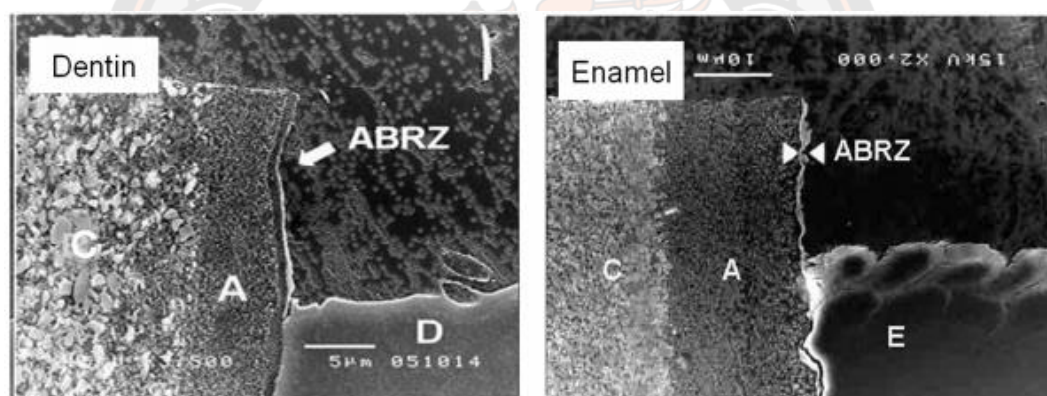
สารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดปานกลางจะให้ผลในการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวฟันอยู่ระหว่างสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดมาก กับกรดอ่อน

สารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดอ่อนมากจะให้ผลในการละลายพื้นผิวแค่ระดับผิวเผิน (superficially) และ ประสิทธิภาพการยึดอยู่ของฟันระที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่แน่นอน

โดยการศึกษาของ Tay และ Pashley ในปี 2000 ทำการทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านศึกษาที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อฟันที่ถูกบูรณะด้วยสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ ที่มีค่าความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน พบชั้นไฮบริดในทุกๆ กลุ่มที่ทำการศึกษา แต่ความหนาของชั้นไฮบริดนั้นจะแตกต่างกันตามค่าความเป็นกรดต่างของสารยึดติด โดยในกลุ่มที่มีค่าความเป็นกรดน้อยจะมีความกว้างของชั้นไฮบริดที่กว้างกว่ากลุ่มที่มีค่าความเป็นกรดสูงกว่า (21)

พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง

ในปี 2004 Tsuchiya และคณะ ได้ค้นพบบริเวณที่อยู่ใต้ต่อชั้นไฮบริดภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จากการสำรวจบริเวณชั้นเนื้อฟันที่ถูกบูรณะด้วยวัสดุเรซิน คอมโพสิต ร่วมกับการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ แล้วนำไปผ่านกระบวนการทดสอบด้วยกรดและต่าง เพื่อจำลองลักษณะการเกิดฟันผุซ้ำที่รอบๆ วัสดุอุดฟันจากการถูกละลายของชั้นเนื้อฟันจากกรด โดยเรียกบริเวณนี้ว่า “พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง” (22) ซึ่งบริเวณนี้เป็นส่วนที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจากชั้นไฮบริด เมื่อมองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าบริเวณนี้มีการเรียงตัวของผลึกคริสตัลโดยต่อออกมาจากชั้นเนื้อฟันมีความกว้างประมาณ 0.5-1.0 ไมโครเมตร โดยพบทั้งชั้นเคลือบฟัน และ เนื้อฟัน ดังภาพที่ 1 เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้น (30000 – 60000 เท่า) พบว่าบริเวณนี้จะประกอบไปด้วยผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นคล้ายกับชั้นเนื้อฟัน และสามารถต้านทานการเกิดฟันผุได้ดีกว่าเนื้อฟันปกติ (23) ดังภาพที่ 2

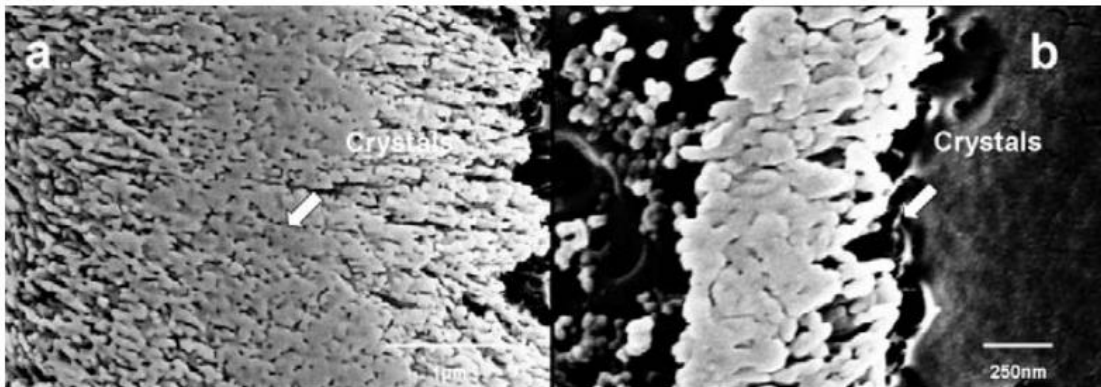


ภาพ 1 ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดในชั้น

เนื้อฟัน (กำลังขยาย 3500 เท่า) และ เคลือบฟัน (กำลังขยาย 2000 เท่า)

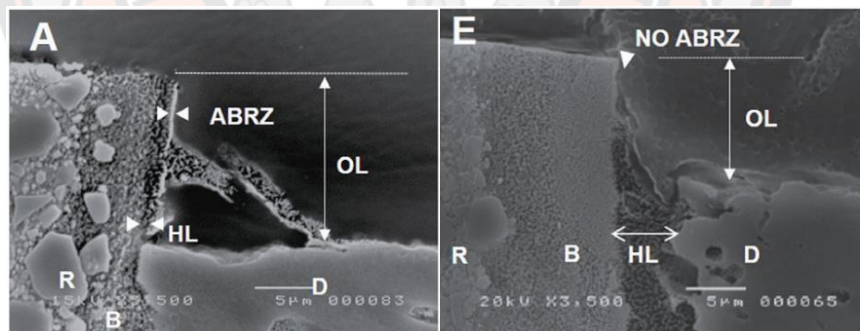
A คือ สารยึดติด, C คือ วัสดุอุดเรซิน คอมโพสิต, D คือ เนื้อฟัน, E คือ เคลือบฟัน, ABRZ คือ พื้นที่

ด้านทานกรด-ต่าง (23)



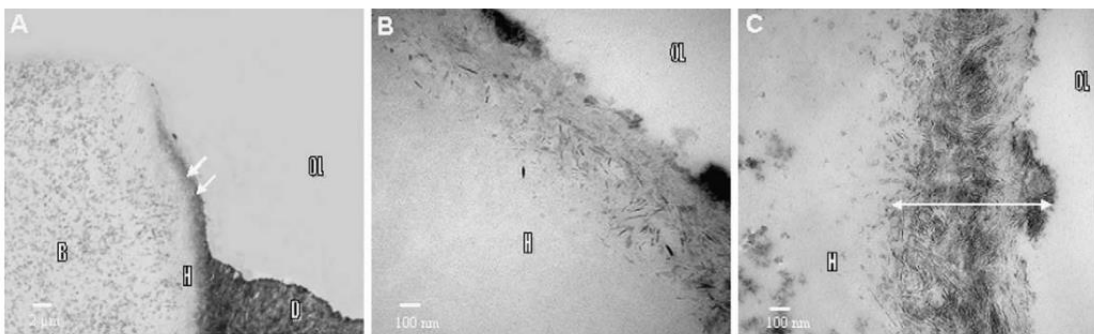
ภาพ 2 ลักษณะของผลึกไฮดรอกซีอะซิเตตที่เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นคล้ายกับชั้นเนื้อฟันของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดด้วยกำลังขยายที่สูง
ภาพ a (ซ้าย) กำลังขยาย 30000 เท่า, ภาพ b (ขวา) กำลังขยาย 60000 เท่า (23)

การศึกษาของ Guan และ คณะ ในปี 2016 เปรียบเทียบลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างของชั้นเนื้อฟัน จากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิดสองชั้นตอน ชั้นตอนเดียว และ สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ ไม่พบพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างในกลุ่มที่ใช้สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ ในขณะที่พบพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างในสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ทุกกลุ่ม (ภาพที่ 3) (24)



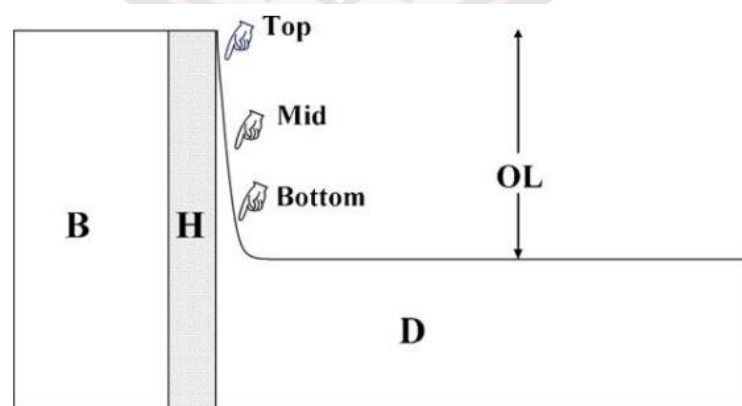
ภาพ 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดด้วยกำลังขยาย 3500 เท่าที่บริเวณรอยต่อของชั้นเนื้อฟัน และสารยึดติด ภายหลังจากการผ่านกระบวนการทดสอบด้วยกรดและด่าง
ภาพ A (ซ้าย) เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์, ภาพ E (ขวา) ไม่พบพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างจากการใช้สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ ; ABRZ พื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง, OL ชั้นผิวด้านนอก, HL ชั้นไฮบริด, D ชั้นเนื้อฟัน, B สารยึดติด, R วัสดุบูรณะฟันเรซิน คอมโพสิต (24)

Waidyasekera ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ศึกษาความหนาแน่นของผลึกคริสตัลที่บริเวณพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างพบว่า ที่บริเวณด้านล่างของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง จะประกอบไปด้วยผลึกคริสตัลเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณส่วนบน และกลาง (ภาพที่4) โดยให้เหตุผลไว้ว่าเนื่องจากการละลายตัวของผลึกคริสตัลออกไปบางส่วนจากกระบวนการทดสอบด้วยกรดและด่างที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของเนื้อฟันที่ถูกทดสอบ ทำให้ส่วนบนและกลางมีผลึกคริสตัลที่บางกว่า โดยจะเหลือส่วนของบริเวณด้านล่างที่มีผลึกคริสตัลหนากว่า จึงเป็นสาเหตุให้เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างนั้นสามารถช่วยต้านทานการละลายจากกรดได้ สามารถเพิ่มความหนาของวัสดุ เพิ่มอายุการใช้งาน รวมถึงสามารถป้องกันฟันผุได้ ดังภาพที่ 5 (25)



ภาพ 4 ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟันภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

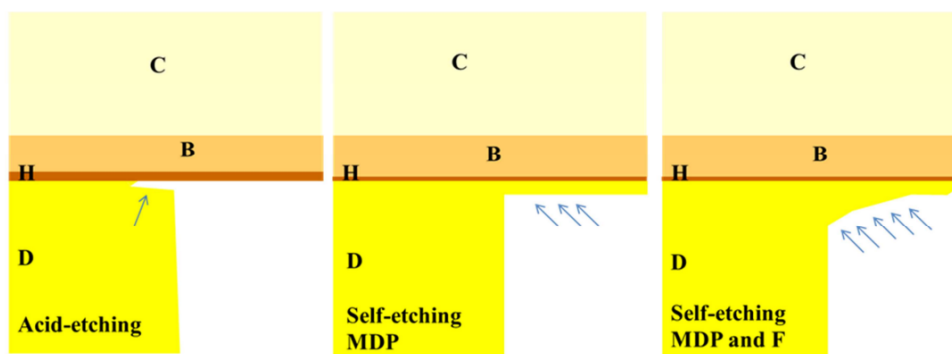
ภาพ A (ซ้าย) ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่กำลังขยายต่ำ, ภาพ B (กลาง) พื้นผิวด้านนอกส่วนบน, ภาพ C (ขวา) พื้นผิวด้านนอกส่วนกลาง (25)



ภาพ 5 ลักษณะการเกิดการละลายของเนื้อฟันจากการทดสอบด้วยกรด-ด่าง
B คือ สารยึดติด, H คือ ชั้นไฮบริด, D คือ ชั้นเนื้อฟัน, OL คือ พื้นผิวด้านนอก (25)

พื้นผิวส่วนนอกเกิดจากการสูญเสียแร่ธาตุจากการทดสอบด้วยสภาวะกรด โดยการศึกษาของ Nikaido และคณะในปี 2011 นำเนื้อฟันและเคลือบฟันมาบดด้วยสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทดสอบด้วยสภาวะกรด พบว่าความกว้างของพื้นผิวส่วนนอกของทุกกลุ่มมีความกว้างประมาณ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร (26) รวมถึงการศึกษาของ Kirihara และคณะ ทำการทดลองโดยการบดเนื้อฟันกับวัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิตด้วยสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ และ ไม่มีฟลูออไรด์ แล้วนำไปผ่านกระบวนการทดสอบด้วยสภาวะกรด พบว่าความกว้างของพื้นผิวส่วนนอกของเนื้อฟันกว้าง 10 ถึง 15 ไมโครเมตร (27)

สำหรับกลไกการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างนั้นยังไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีหลายๆ การศึกษาได้ทดสอบหาปัจจัยที่จะส่งผลต่อการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างพบว่า หากใช้สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์จะไม่พบพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างในเนื้อฟันจากการใช้สารยึดติดระบบนี้ โดยให้เหตุผลไว้ว่า ในสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ จะใช้กรดฟอสฟอริกในการกัดกร่อนพื้นผิว ซึ่งกรดชนิดนี้มีความสามารถในการละลายผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ในชั้นเนื้อฟันออกไปได้หมด (25) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ในระดับอ่อน (mild) ถึงปานกลาง (moderate) จะเป็นการละลายเอาผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ออกไปบางส่วน ทำให้ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เหลืออยู่สามารถเป็นต้นแบบ (template) ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ ดังภาพที่ 6 โดยตัวอย่างของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันได้แก่ โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มเอ็มดีพี (10-methacryloyloxydecyl dihydrogenphosphate (MDP)), โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มฟีนิลพี (2-(methacryloyloxyethyl)phenyl hydrogenphosphate (Phenyl-P)) หรือ โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มเมต้า (4-methacryloyloxyethyl trimellitic acid (4-META)) ซึ่งจะไปจับกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เหลืออยู่เกิดเป็นเกลือแคลเซียม (calcium salt) ที่ไม่ละลายน้ำชั้นไฮบริด (2,3) ส่วนการศึกษาของ Kirihara และคณะ พบว่าสารยึดติดที่มีการปลดปล่อยฟลูออไรด์ส่งผลให้เกิดการสร้างพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างได้กว้างกว่าสารยึดติดที่ไม่ปลดปล่อยฟลูออไรด์ (27) ดังภาพที่ 6



ภาพ 6 ภาพจำลองของการเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดต่างชนิดกัน ผังซ้ายจำลองการใช้สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ซึ่งใช้กรดฟอสฟอริกในการกัดกร่อนผิวฟัน จะไม่พบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างและเกิดช่องว่างที่รอยต่อของเนื้อฟันและชั้นไฮบริดที่บริเวณลูกศรชี้จากการละลายจากกรด ตรงกลางจำลองการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์กัดกร่อนพื้นผิวจะเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างที่รอยต่อของเนื้อฟันและวัสดุบูรณะฟัน ผังขวาจำลองการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์กัดกร่อนพื้นผิวเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างที่รอยต่อของเนื้อฟันและวัสดุบูรณะฟันที่มีขนาดกว้างกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารยึดติดที่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์ (1)

โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือโมโนเมอร์ที่มีความเป็นกรด (Acidic monomer/Functional monomer)

โครงสร้างของโมโนเมอร์กลุ่มนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่มีความจำเพาะต่างกัน คือ กลุ่มโพลีเมอไรเซชัน (polymerization group), กลุ่มสเปเซอร์ (spacer group) และ หมู่ฟังก์ชัน (functional group) (17)

หมู่ฟังก์ชันในโมโนเมอร์ที่มีความเป็นกรด (acidic monomers) มีหน้าที่ในการกัดกร่อนโครงสร้างของฟัน เพื่อให้โมโนเมอร์แพร่เข้าไปในเนื้อฟันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิวของฟันได้ดีขึ้น สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับผลิตภัณฑ์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (28) ซึ่งจะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารหมู่คาร์บอกซิลิก, หมู่ฟอสฟอริก หรือ หมู่ฟอสเฟต เช่น กลุ่มเอ็มดีพี (10-MDP), กลุ่มฟีนิลพี (Phenyl-P) และกลุ่มเมต้า (4-META)

โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มฟีนิลพี จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับผลิตภัณฑ์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่ำ และให้ผลผลิตที่สามารถละลายน้ำได้ง่ายออกมา (17) ตัวอย่างของวัสดุ เคลียร์ฟิลไลน์เนอร์บอนด์ทู (Clearfil Liner Bond 2; Kurary Medical Inc, Tokyo, Japan) (29)

โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มเมต้า มีความสามารถในการเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) กับแคลเซียมในผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ความสามารถในการเกิดนั้นยังต่ำกว่า กลุ่มเอมีดีพี นอกจากนี้เกลือแคลเซียมที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยานี้ (Ca-4MET) มีความสามารถในการละลายสูง และเกิดพันธะที่ไม่เสถียร เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเอมีดีพี (17) ตัวอย่างของวัสดุ ไฮบริดบอนด์ (Hybrid bond; Sun Medical Co Ltd, Shiga, Japan), ไอบอนด์ (iBond; Heraeus Kulzer, Hanan, Germany) (29)

โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มเอมีดีพี มีความสามารถในการเกิดพันธะไอออนิกกับแคลเซียมในผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่แข็งแรง ผลผลิตที่เป็นเกลือแคลเซียมนั้นมีคุณสมบัติในการละลายต่ำ (17, 30) และพันธะที่เกิดขึ้นนั้นมีความแข็งแรง และเสถียรมากกว่าโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดอื่นๆ (17, 31) ซึ่งจะสอดคล้องกับอีกหลายๆการศึกษาที่กล่าวไว้ว่า การใช้โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีดีพี หมู่ฟอสเฟตที่อยู่ในโมโนเมอร์นั้นจะทำปฏิกิริยากับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ดี และเสถียรที่สุด (32, 33) ตัวอย่างของวัสดุ เคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ (Clearfil SE Bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan), เคลียร์ฟิลไตรเอสบอนด์ (Clearfil S3 bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan) (29)

ฟลูออไรด์

รอยโรคฟันผุจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสูญเสียแร่ธาตุที่บริเวณผิวฟันจากกรดที่เกิดขึ้นในช่องปาก และฟลูออไรด์มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดฟันผุ โดยการเพิ่มความต้านทานการเกิดการสูญเสียแร่ธาตุ โดยการซึมซับเข้าไปในผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ และป้องกันการละลายของผลึกเหล่านี้ อีกทั้งฟลูออไรด์ยังสามารถลดกระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis) หรือกระบวนการย่อยสารถูโคสของเชื้อแบคทีเรียในช่องปาก ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถผลิตกรดที่ทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุของผิวฟันได้ (34) ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำฟลูออไรด์มารวมกับวัสดุบูรณะฟัน เช่น การใส่เข้าไปในสารยึดติด ซึ่งสามารถต้านทานการเกิดฟันผุซ้ำได้ต่อวัสดุอุดฟันได้ (27) ตัวอย่างของวัสดุ รีแอกเมอร์ บอนด์ (Reactmer Bond; Shofu Inc, Kyoto, Japan), เคลียร์ฟิลยูนิเวอร์แซล บอนด์ ควิก (Clearfil™ Universal Bond Quick; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan) (29) มีหลายๆ การศึกษาได้รายงานถึงข้อดีของการใช้สารยึดติดที่มีคุณสมบัติปลดปล่อยฟลูออไรด์ไว้ว่าจะเกิดพื้นที่ที่สามารถต้านทานการเกิดฟันผุที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารยึดติดและเนื้อฟันหลังจากผ่านกระบวนการทำให้เกิดฟันผุ (35)

Waidyasakera และคณะ พบพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างของกลุ่มที่ใช้สารยึดติดชนิดที่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์ โดยขนาดของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างมีขนาดที่กว้างกว่ากลุ่มที่ใช้สารยึดติดที่ไม่ปลดปล่อยฟลูออไรด์ และพบว่ามีอาการเรียงตัวของผลึกคริสตัลอย่างหนาแน่นที่บริเวณส่วนกลาง (25) ในปี 2013 Kirihara ได้รายงานว่ารูปร่างของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างจะมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มที่ใช้สารยึดติดที่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์กับกลุ่มที่ไม่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์ ความชันของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่าง และ ความกว้างของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่างจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อใช้สารยึดติดที่มีปริมาณฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของฟลูออไรด์ที่สามารถป้องกันการเกิดการละลายของแร่ธาตุที่ฟันได้ซึ่งเมื่อฟลูออไรด์ได้แพร่เข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีการสร้างฟันที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ จึงทำให้บริเวณนี้สามารถต้านทานการละลายจากกรดลงได้ (27) สอดคล้องกับการศึกษาของ Yasuhiro และ คณะที่ทดสอบการเกิดฟันที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกันพบว่าเมื่อสารยึดติดมีการปลดปล่อยฟลูออไรด์จะทำให้เกิดฟันที่ด้านทานกรด-ต่างที่มีขนาดกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีปลดปล่อยฟลูออไรด์ (36)

จากการศึกษาของ Shinohara และคณะ ในปี 2009 พบว่าสารยึดติดที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์ (fluoride-containing adhesive) จะมีค่าความแข็งแรงยึดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ และ สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ที่ไม่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ แต่เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงยึดที่สามเดือนพบว่าในกลุ่มที่ใช้สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์จะมีค่าความแข็งแรงยึดที่ต่ำลง ในขณะที่สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์มีการยึดอยู่เท่าเดิม และ สารยึดติดที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์มีค่าความแข็งแรงยึดเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากว่าการใช้สารยึดติดที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์นั้นนอกจากช่วยป้องกันการละลายของแร่ธาตุที่ผิวฟันจากการส่งเสริมกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุแล้ว วัสดุชนิดนี้ยังสามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์ต่อไปยังชั้นเนื้อฟันในบริเวณที่ลึกขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (degrees of conversion) สูงขึ้นในช่วงหนึ่งเดือนแรกจึงทำให้กลุ่มของสารยึดติดที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์มีค่าความแข็งแรงยึดที่สูงขึ้น (37) แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาของ Deeb ในปี 2013 พบว่า การใช้สารยึดติดที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์นั้นจะไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีฟลูออไรด์ผสม แต่การใช้สารยึดติดชนิดขั้นตอนเดียว (single-step adhesive) จะมีค่าความแข็งแรงยึด และความเสถียรของพันธะที่ต่ำกว่ากลุ่มที่เป็นแบบหลายขั้นตอน (multistep adhesive) (38)

การรั่วซึมระดับนาโน

Sano และคณะ ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า “การรั่วซึมระดับนาโน” ไว้ในปี 1995 ว่าเป็นการรั่วซึมที่มีความจำเพาะที่เกิดขึ้นภายในชั้นไฮบริดโดยที่ไม่พรอวยแยกที่ขอบของวัสดุ การตรวจเพื่อหาการรั่วซึมระดับนาโนจะใช้การแพร่ของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (silver nitrate) ที่แทรกซึมเข้าไปในชั้นไฮบริด (6) การรั่วซึมระดับนาโนเกิดจากการที่โมโนเมอร์ไม่สามารถแพร่ลงไปได้สมำเสมอกับท่อเนื้อฟันที่เกิดการสูญเสียแร่ธาตุจากการใช้กรดกัดกร่อน ทำให้เกิดรูขนาดเล็กๆ ในระดับนาโนเมตรในชั้นไฮบริด (4) โดยการแพร่ของโมโนเมอร์หรือเรซินไปตามเส้นใยคอลลาเจนจะไม่สมบูรณ์ หรือ เกิดจากการที่สารยึดติดมีความชอบน้ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะมีการดึงน้ำเข้ามาที่บริเวณรอยต่อ เมื่อมีน้ำหลงเหลืออยู่ในท่อเนื้อฟันทำให้เกิดการยุบตัว (collapse) ของโครงสร้างคอลลาเจน (collagen network) ขัดขวางการแพร่ของเรซินที่ไม่สมบูรณ์ หรือเกิดกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ที่ไม่

สมบูรณ์ (11) Tay และคณะ ได้รายงานไว้ว่าการประเมินผลการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนโดยการแช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เห็นข้อบกพร่องของการแพร่ของเรซินในระดับไมโครเมตร หรือ การเกิดกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ที่ไม่สมบูรณ์ (39, 40) โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิด การเสื่อมของชั้นไฮบริดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation) ระหว่างสารยึดติด และ คอลลาเจนภายในชั้นไฮบริด เนื่องจากการลุกลามของกรดที่ผลิตจากแบคทีเรีย หรือ สารน้ำในท่อ เนื้อฟัน ส่งผลให้ลดความเสถียรของพันธะที่ยึดระหว่างเนื้อฟันและวัสดุอุดฟัน (41)

เทอร์มอไซคลิก

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในช่องปาก เกิดจากอาหาร เครื่องดื่ม หรือการหายใจ ซึ่ง การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดพยาธิสภาพ กับสารยึดติดและเนื้อฟันได้เช่นกัน (42) โดยจะเกิด 1.การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้วัสดุและเนื้อฟันเกิดการขยายตัว ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้น (mechanical stresses) และไปเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน 2. เมื่อมีช่องว่าง (gap) เกิดขึ้น จะส่งเสริมให้สารน้ำในช่องปากผ่านเข้า-ออกบริเวณช่องว่างที่เกิดขึ้น และทำให้เกิดการเสื่อมของรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน

การทำเทอร์มอไซคลิก คือการจำลองการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วที่ใช้ในการทำนายความทนทานของวัสดุ (43)

องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO) ได้กำหนดไว้ว่าการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุในช่องปาก จะให้แช่ด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สลับกับน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส หลายๆ ครั้ง เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ และฟัน (44)

จากการศึกษาของ Gale และ Darvell ในปี 1999 พบว่าเมื่อทำเทอร์มอไซคลิกโดยการแช่น้ำร้อน สลับเย็น เป็นจำนวน 10000 รอบ จะเป็นการจำลองการใช้งานในช่องปากเป็นเวลา 1 ปี (42)

การแช่สารละลายกรดและด่าง

การแช่สารละลายกรดและด่างเป็นการจำลองการเกิดฟันผุ โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยา การสูญเสียแร่ธาตุ และปฏิกิริยาการคืนกลับแร่ธาตุ เพื่อทำให้เกิดการเสื่อมของวัสดุบูรณะฟัน จากนั้นก็นำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฟัน และวัสดุบูรณะฟัน (43)

การทดสอบวัสดุด้วยการแช่สารละลายกรดและด่างโดยจะพบการเสื่อมสภาพ (deterioration) และ การสึกกร่อน (erosion) บริเวณรอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟันได้ (45)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

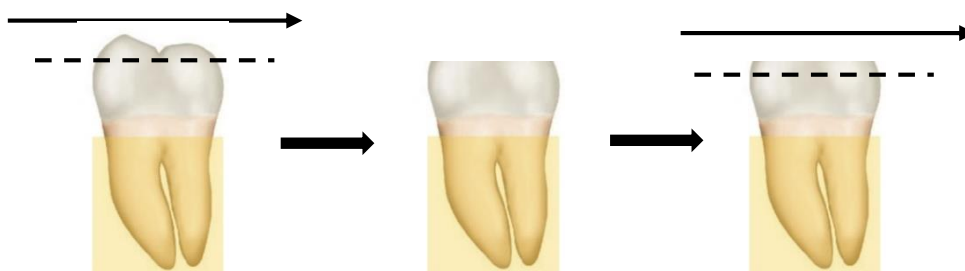
การเตรียมกลุ่มตัวอย่าง

การเตรียมกลุ่มตัวอย่างจะใช้ฟันกรามล่างของมนุษย์ซี่สุดท้ายที่ไม่มีรอยผุ รอยแตก ไม่ถูกบูรณะ มีความยาวด้านบดเคี้ยวในแนวใกล้กลางถึงไกลกลางไม่ต่ำกว่า 8 มิลลิเมตร ถูกถอนออกมาจำนวน 40 ซี่ ฟันจะถูกเก็บโดยการแช่สารละลายไทมอล (thymol) เข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิห้อง และฟันจะถูกนำทำความสะอาด กำจัดหินปูนและเนื้อเยื่อปริทันต์ และใช้ในการทดลองภายใน 3 เดือนหลังจากที่ถอน

นำฟันทั้งหมดมายึดด้วยอีพ็อกซี เรซิน (epoxy resin) ที่บริเวณรากฟัน ใต้รอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน (cemento-enamel junction) ดังภาพ 7 จากนั้นเตรียมชิ้นเนื้อฟันโดยตัดด้านสบฟันด้วยใบมีดเพชร (diamond saw blade) ร่วมกับน้ำออกประมาณ 2.0 มิลลิเมตรเพื่อกำจัดชั้นเคลือบฟัน โดยกำหนดระยะจากยอดปุ่มฟันที่สูงที่สุด (ภาพที่ 8) เพื่อจำลองเนื้อฟันระดับต้น (superficial dentin) จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 (600-grid SiC paper) เพื่อจำลองการเกิดชั้นเสมีียร์ หลังจากนั้นตัดฟันด้วยใบมีดเพชรให้ได้ชิ้นเนื้อฟันมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตรดังภาพที่ 9



ภาพ 7 ลักษณะของฟันที่ถูกยึดด้วยอีพ็อกซี เรซินที่รากฟัน



ภาพ 8 การตัดฟันในแนวนอน



ภาพ 9 ชั้นเนื้อฟันที่ถูกตัดออกมา

ขั้นตอนการทาสารยึดติดและการบูรณะ

แบ่งฟันออกเป็น 4 กลุ่มด้วยวิธีสุ่มตามตารางที่ 4 ให้แต่ละกลุ่มมีฟันจำนวน 10 ซี่ (n=10) สารยึดติดที่ทำการทดสอบได้แก่ สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ เคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ (Clearfil SE Bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan), เคลียร์ฟิลยูนิเวอร์แซล ไตรเอสบอนด์ (Clearfil universal Tri-S Bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan) และ ซิงเกิลบอนด์ ยูนิเวอร์แซล (Singlebond universal; 3M ESPE, Germany) และ กำหนดให้สารยึดติดระบบโททอล-เอทซ์ แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ ทู (Adper™ Single Bond 2, 3M ESPE, Germany) เป็นกลุ่มควบคุม ในการทดลองนี้จะใช้สารยึดติดตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตดังตารางที่ 5

ตาราง 4 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่มที่	ชื่อกลุ่ม	รูปแบบการใช้งาน	โมโนเมอร์ ที่ มีหมู่ฟังก์ชัน	ชื่อการค้า
1	SE	ระบบเซลฟ์เอทซ์ 2 ขั้นตอน	เอ็มดีพี	เคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์
2	S3	ระบบเซลฟ์เอทซ์ 1 ขั้นตอน	เอ็มดีพี	เคลียร์ฟิลยูนิเวอร์แซล ไตรเอสบอนด์
3	SU	ระบบเซลฟ์เอทซ์ 1 ขั้นตอน	เอ็มดีพี	ซิงเกิลบอนด์ ยูนิเวอร์แซล

กลุ่มที่	ชื่อกลุ่ม	รูปแบบการใช้งาน	โมโนเมอร์ ที่มีหมู่ฟังก์ชัน	ชื่อการค้า
4	TE (Con)	ระบบโททอล-เอทซ์ 2 ขั้นตอน	-	แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ ทู

ตาราง 5 ส่วนประกอบและการใช้งานของสารยึดติดในงานศึกษาชิ้นนี้

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
Clearfil SE Bond	Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan	Primer: MDP, HEMA, hydrophilic dimethacrylate, photo- initiators, water Bond liquid: MDP, bis-GMA, HEMA, hydrophobic dimethacrylate, photo- initiators, filler	Apply primer for 20 sec; gently air blow to dry solvent; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.
Clearfil S ³ Bond	Kuraray Co Lts, Osaka, Japan	Water, MDP, bis-GMA, HEMA, hydrophobic DMA, CQ, ethyl alcohol, silanated colloidal silica	Apply adhesive for 20 sec; vigorously air blow for 5 sec, and light cure for 10 sec.
Scotchbond Universal Adhesive or Single Bond Universal	3M ESPE, St. Paul, MN, USA	10-MDP, Dimethacrylate resins, HEMA, Ethanol, Water, Polyacrylic acid copolymer, Silane, Fillers, Initiators	Apply adhesive for 20 sec; vigorously air blow for 5 sec, and light cure for 10 sec.
Adper™ Single Bond 2	3M ESPE, Germany	Etchant: 35% H ₃ PO ₄ Adhesive: dimethacrylates, HEMA, polyalkenoid acid	Apply Etchant for 15 sec; rinse for 15 sec; gently air

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ส่วนประกอบ	การใช้งาน
		copolymer, 5 nm silane treated colloidal silica, ethanol, water, photoinitiator	blow to moist surface; apply adhesive; gently blow again and light cure for 10 sec.

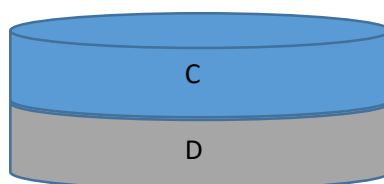
กลุ่มที่ 1 SE เตรียมพื้นผิวฟันด้วยการทาเคลียร์ฟิลเอส อี ไพรมเมอร์ 20 วินาที เป่าลม 5 วินาทีเพื่อกำจัดตัวทำละลาย จากนั้นทาเคลียร์ฟิลเอส อี บอนด์และเป่าลมเป็นเวลา 5 วินาที ฉายแสงด้วยเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดีเป็นเวลา 10 วินาที

กลุ่มที่ 2 S3 เตรียมพื้นผิวฟันด้วยการทาเคลียร์ฟิลยูนิเวอร์แซล ไตรเอสบอนด์ 20 วินาที จากนั้นเป่าลมให้เป็นฟิล์มบางๆ และฉายแสง 10 วินาที ด้วยเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดี

กลุ่มที่ 3 SU เตรียมพื้นผิวฟันด้วยการทาซิงเกิลบอนด์ ยูนิเวอร์แซล 20 วินาที จากนั้นเป่าลมให้เป็นฟิล์มบางๆ และฉายแสง 10 วินาที ด้วยเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดี

กลุ่มที่ 4 TE เตรียมพื้นผิวฟันด้วยการทากรดฟอสฟอริก 10 วินาที ล้างน้ำ 15 วินาที เป่าลมให้แห้ง จากนั้นทาด้วย แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ ทู เป่าลมให้เป็นฟิล์มบางๆ และฉายแสง 10 วินาที ด้วยเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดี

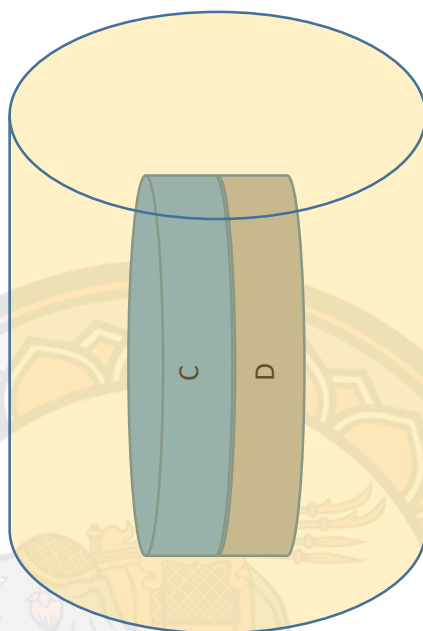
หลังจากนั้น ทำการบูรณะด้วยวัสดุเรซิน คอมโพสิต (Filtek Z350 - 3M ESPE, St. Paul, MN, USA) โดยบูรณะให้มีความหนาประมาณ 1.0 มิลลิเมตรตั้งภาพที่ 10 แล้วฉายแสงด้วยเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดี เป็นเวลา 20 วินาที (DemiTM L.E.D., Kerr Co., USA)



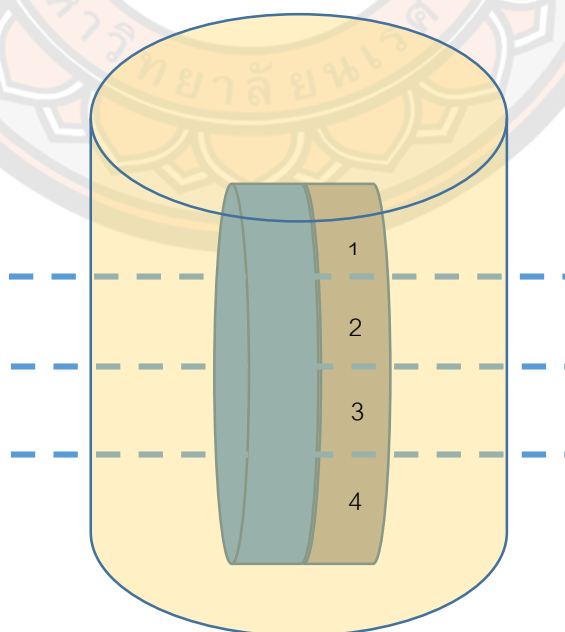
ภาพ 10 ลักษณะของชิ้นเนื้อฟันหลังจากบูรณะด้วยวัสดุเรซิน คอมโพสิตหนา 1 มิลลิเมตร

C คือ วัสดุบูรณะเรซิน คอมโพสิต D คือ ชิ้นเนื้อฟัน

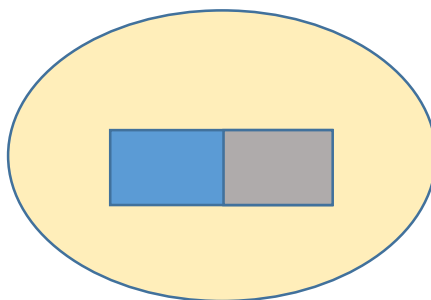
เมื่อฉายแสงเสร็จแล้วนำชิ้นงานทั้งหมด มาแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นยึดชิ้นงานด้วย อีพ็อกซี เรซิน ตามภาพที่ 11 จากนั้นนำมาตัดแบ่งชิ้นเนื้อฟันทอกเป็น 4 ส่วน ด้วยใบมีดเพชร ร่วมกับน้ำ ดังภาพที่ 12 และ 13



ภาพ 11 ชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยอีพ็อกซี เรซิน



ภาพ 12 ทิศทางการตัดชิ้นงาน ตามแนวเส้นประ เพื่อแบ่งชิ้นเนื้อฟันทอกเป็น 4 ชิ้น



ภาพ 13 ชิ้นงานหลังจากตัดแบ่ง

จากนั้นนำชิ้นเนื้อฟืนที่ได้จากการตัดแบ่งไปทำการทดสอบต่างๆ โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 นำไปทดสอบการเกิดฟืนที่ด้านทานกรด-ต่าง กลุ่มที่ 2 นำไปทดสอบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน กลุ่มที่ 3 นำไปผ่านกระบวนการเทอร์มอไซคลิง แล้วทดสอบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน กลุ่มที่ 4 นำไปแช่สารละลายกรดและต่าง (pH cycling) จากนั้นนำไปทดสอบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน โดยที่ชิ้นงานแต่ละชิ้นจะมีการเขียนตัวอักษรตามชื่อกลุ่ม

การทดสอบหาฟืนที่ด้านทานกรดต่าง

นำชิ้นในกลุ่มที่ 1 มาทดสอบด้วยกรดและต่างโดยนำไปแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ คีมีนเนอโรซิง (Buffered demineralizing solution) (pH 4.5, 2.2 mmol/L CaCl_2 , 2.2 mmol/L NaH_2PO_4 , 50 mmol/L acetic acid) เป็นเวลา 90 นาที เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดรอยผุซ้าที่วัสดุและเนื้อฟืน จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 (5% sodium hypochlorite, NaClO) เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับนำไปเขย่าด้วยเครื่องสั่นด้วยคลื่นความถี่อัล-ตราโซนิค (ultrasonic vibration) เพื่อกำจัดเอาส่วนของคอลลาเจนไฟบรินที่ถูกแปลงสภาพ (denature) ออก จากนั้นล้างน้ำเป็นเวลา 30 วินาที (27)

การทดสอบเพื่อหาระดับการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน

นำกลุ่มตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ไปแช่ในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานมาทาด้วยน้ำยาทาเล็บที่ชิ้นงานโดยเว้นเฉพาะบริเวณรอยต่อของสารยึดติดและฟืนที่ต้องการให้ผลึกซิลเวอร์แทรกซึมลงไป นำไปแช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (50 wt% ASN solution) ในห้องมืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างน้ำกลั่น 5 นาที และแช่ในสารละลายน้ำยาล้างภาพ (photo-developing solution) เป็นเวลา 8 ชั่วโมงในห้องมืด (9)

การทำเทอร์มอไซคลิง

นำกลุ่มตัวอย่างในกลุ่มที่ทำเทอร์มอไซคลิง (กลุ่มที่ 3) ไปเข้าเครื่องแช่สลับน้ำร้อนเย็นหรือเทอร์มอไซคลิง (thermocycling machine, Ethik Technology, Sao Paulo, Brazil) โดยแช่ในน้ำร้อน 55 องศาเซลเซียสสลับกับน้ำเย็น 5 องศาเซลเซียส ครั้งละ 30 วินาที และช่วงเวลาที่สลับระหว่างถังน้ำ จะใช้เวลา 2 วินาที จำนวน 5000 รอบ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่รอยต่อระหว่างสารยึดติดและผิวฟัน (42) จากนั้นนำไปทดสอบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน

การแช่สารละลายกรดและด่าง

นำกลุ่มตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 ไปแช่ในสารละลายดีมินเนอไรซิ่ง (pH = 5.0) 30 นาที และ แช่ในสารละลายรีมินเนอไรซิ่ง (pH = 7.0) 10 นาที ทำทั้งหมด 6 ครั้ง ต่อ 1 วัน เป็นเวลา 8 วันโดยระหว่างที่เปลี่ยนสารละลาย กลุ่มตัวอย่างจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น และ ชิ้นงานจะถูกเก็บในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ไม่ได้ทำการทดลอง (46) ส่วนประกอบของสารละลายแสดงในตารางที่ 5 จากนั้นนำไปทดสอบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน

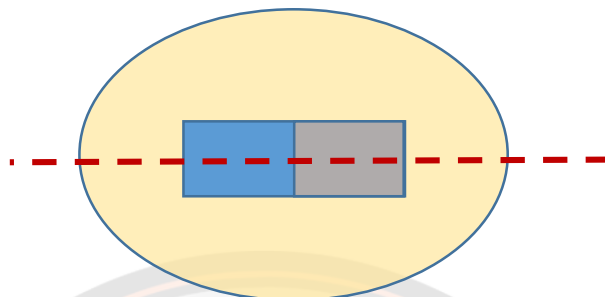
ตาราง 6 ส่วนประกอบของสารละลายดีมินเนอไรซิ่งและสารละลายรีมินเนอไรซิ่ง

สารละลายดีมินเนอไรซิ่ง	ปริมาณ (mM)
CaCl ₂	1.5
KH ₂ PO ₄	0.9
acetate	50
สารละลายรีมินเนอไรซิ่ง	ปริมาณ (mM)
HEPES	20
CaCl ₂	1.5
KH ₂ PO ₄	0.9
KCL	150

การประเมินค่าการรั่วซึม และ ความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง

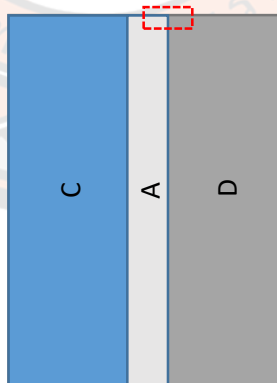
นำกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดมาตัดชิ้นงานแนวด้านหน้า (frontal plane) ดังภาพที่ 14 เพื่อจะใช้ดูรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและสารยึดติด จากนั้นก็ขีดที่พื้นผิวที่จะทดสอบด้วย ครีมนขัดกากเพชร

(diamond paste (Struers; Copenhagen, Denmark)) ด้วยผงขัดขนาด 6.0 ไมโครเมตร, 3.0 ไมโครเมตร, 1 ไมโครเมตร และ 0.25 ไมโครเมตร ตามลำดับ (27)



ภาพ 14 ลักษณะการตัดฟันในแนวด้านหน้า

กลุ่มตัวอย่างจะถูกนำไปไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) เพื่อให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เคลือบด้วยทองและส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดโดยใช้โหมดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron mode) (JSM-5310LV, JEOL, Tokyo, Japan) จากนั้นนำภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดมาคำนวณหาความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง และการรั่วซึมระดับนาโนด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (Image J (LOCI, University of Wisconsin)) บริเวณที่ต้องการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะแสดงดังภาพที่ 15



ภาพ 15 บริเวณที่ต้องการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (กรอบสีแดง)

C วัสดุอุดเรซิน คอมโพสิต, A ชั้นของสารยึดติด, D ชั้นเนื้อฟัน

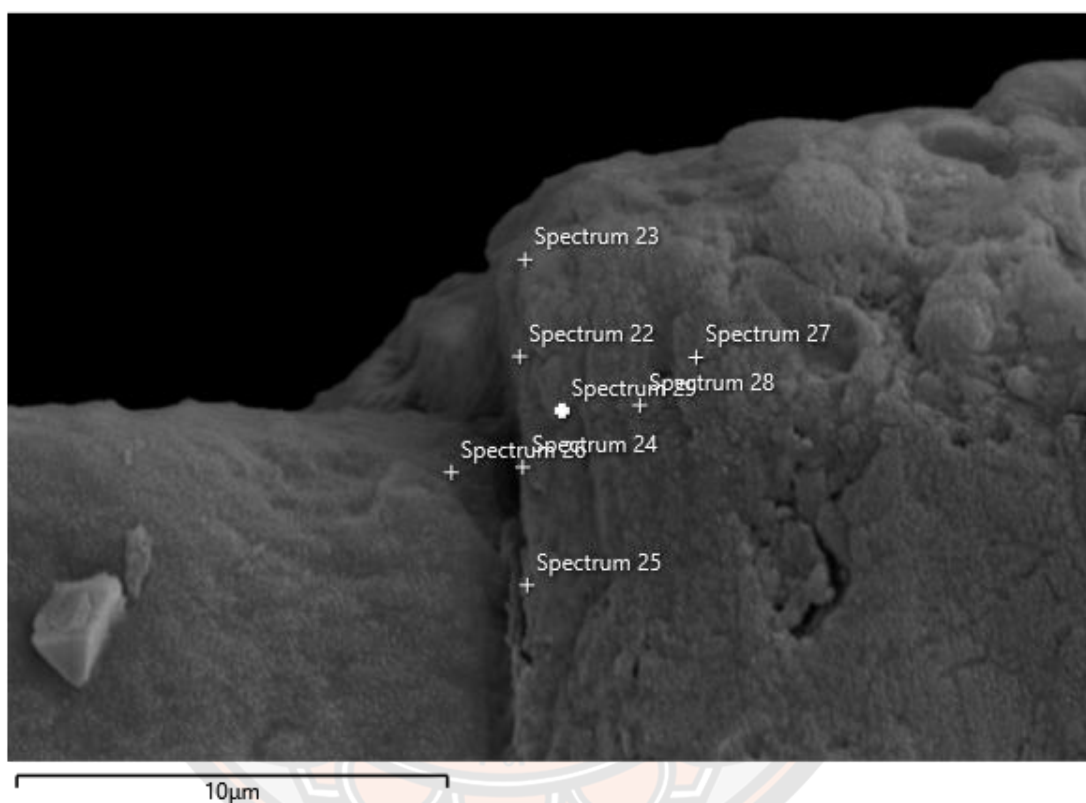
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เข็มกรอฟันกนกเพชรทรงกระบอกชนิดกรอเร็ว
2. ฟันกรامل่างซี่ในสุด
3. สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์:
 - 3.1 เคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ (Clearfil SE Bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan)
 - 3.2 เคลียร์ฟิลไตรเอสบอนด์ (Clearfil S3 bond; Kuraray Co Ltd, Osaka, Japan)
 - 3.3 แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล (Singlebond universal; 3M ESPE, Germany)
4. สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์
 - 4.1 กรดฟอสฟอริก เข้มข้นร้อยละ 35 (Scotchbond™ Etchant, 3M ESPE, Germany))
 - 4.2 แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู (Adper™ Single Bond 2, 3M ESPE, Germany)
5. คอมโพสิต เรซิน (Filtek Z350 - 3M ESPE, St. Paul, MN, USA)
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (50%wt ASN solution) (pH 9.5)
7. สารละลายบัฟเฟอร์ ดีมินเนอโรซิง (pH 4.5, 2.2 mmol/l CaCl₂, 2.2 mmol/l NaH₂PO₄, 50 mmol/l acetic acid)
8. สารละลายไทมอลเข้มข้นร้อยละ 0.1 (0.1% thymol solution)
9. เครื่องแช่สลับน้ำร้อนเย็น (thermocycling, SDC20, Yamatake Honeywell, HWB332R)
10. น้ำยาทาเล็บ
11. เครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดี (Demi™ L.E.D., Kerr Co., USA)
12. ด้ามหัวกรอความเร็วสูง (High speed hand piece)
13. เครื่องมือตรวจปริทันต์ (Periodontal probe)
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JSM-5310LV, JEOL, Tokyo, Japan)
15. เครื่องสั่นด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิค
16. ครีมหัดกนกเพชร (Diamond paste (Struers; Copenhagen, Denmark))
17. สารละลายน้ำยาล้างภาพ (photo-developing solution)
18. สารละลายรีมินเนอโรซิง (CaCl₂: 1.5 mmol/L, KH₂PO₄: 0.9 mmol/L, KCL 150 mmol, HEPES: 20 mmol/L, pH 7)
19. สารละลายดีมินเนอโรซิง (CaCl₂: 1.5 mmol/L, KH₂PO₄: 0.9 mmol/L, acetate: 50 mmol/L, pH 5.0)
20. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 (5% sodium hypochlorite, NaClO)

การเก็บรวบรวมข้อมูล

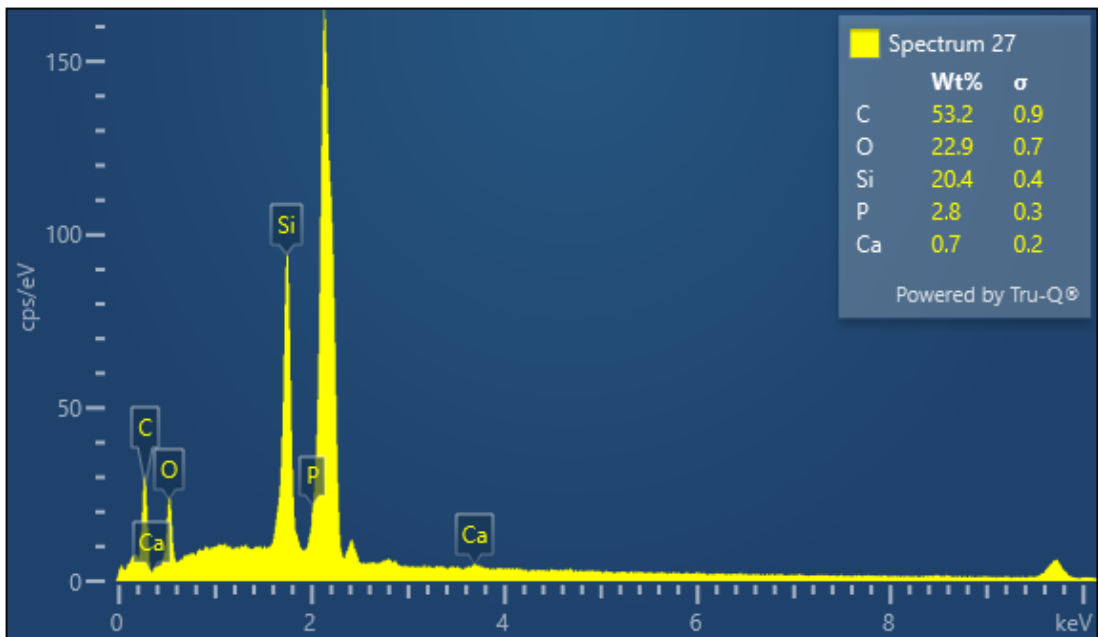
การกำหนดตำแหน่งของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง

ในการกำหนดขอบเขตของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง จะใช้การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคอีดีเอส (EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) โดยให้ตำแหน่งที่มีธาตุแคลเซียมในชั้นไฮบริด เป็นบริเวณที่เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง

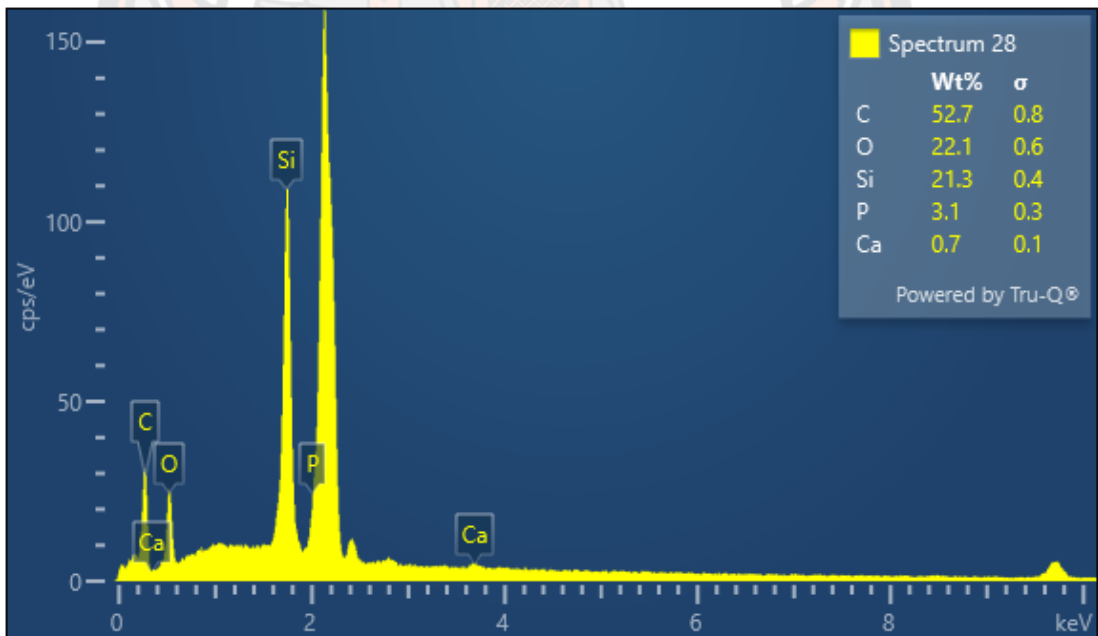


ภาพ 16 ตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคอีดีเอส

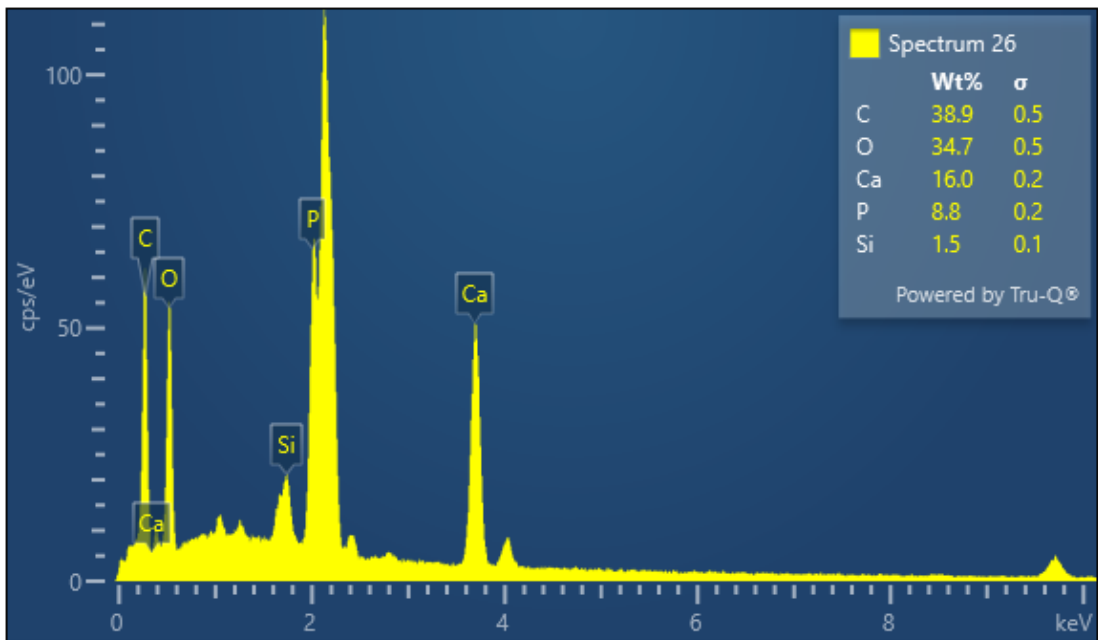
จากภาพที่ 16 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคอีดีเอส พบว่าในบริเวณสเปคตรัม 27 (ภาพที่ 17) และ 28 (ภาพที่ 18) จะเป็นตำแหน่งของสารยึดติด เมื่อตรวจสอบแร่ธาตุจะไม่พบธาตุแคลเซียมที่บริเวณนี้ และเมื่อดูที่ตำแหน่งสเปคตรัม 26 (ภาพที่ 19) ซึ่งเป็นตำแหน่งของเนื้อฟันจะพบธาตุแคลเซียมในบริเวณนี้ ในตำแหน่งของสารยึดติดที่เป็นบริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน ได้แก่ สเปคตรัมที่ 22 (ภาพที่ 20) 23 (ภาพที่ 21) และ 24 (ภาพที่ 22) พบว่ามีธาตุแคลเซียมอยู่ในชั้นของสารยึดติด จึงกำหนดให้จุดดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่เริ่มเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง



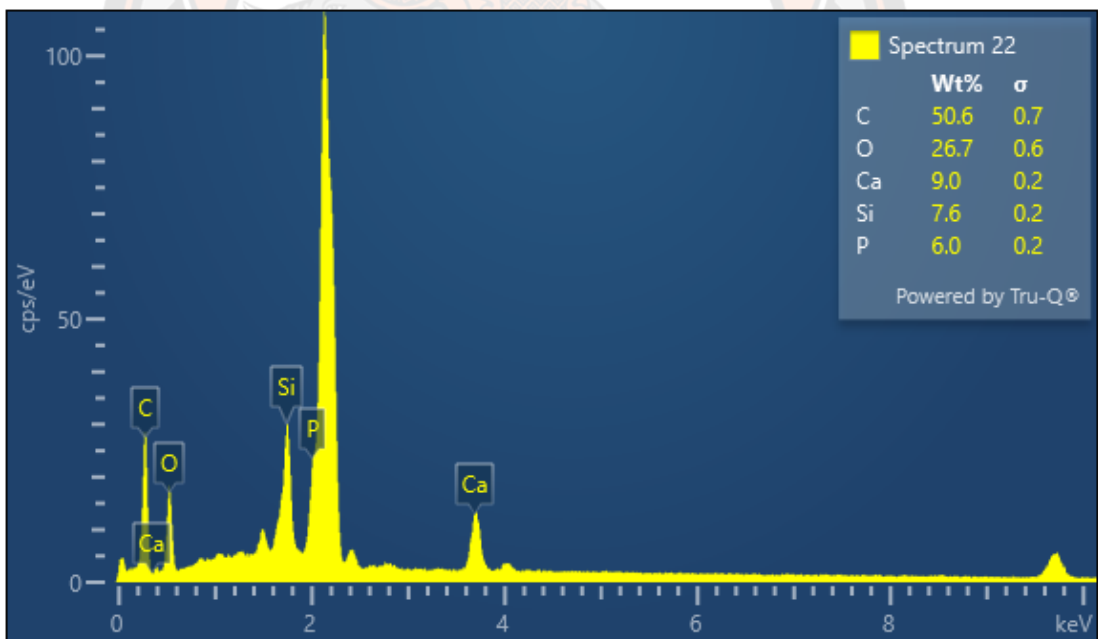
ภาพ 17 สเปคตรัมที่ 27



ภาพ 18 สเปคตรัมที่ 28

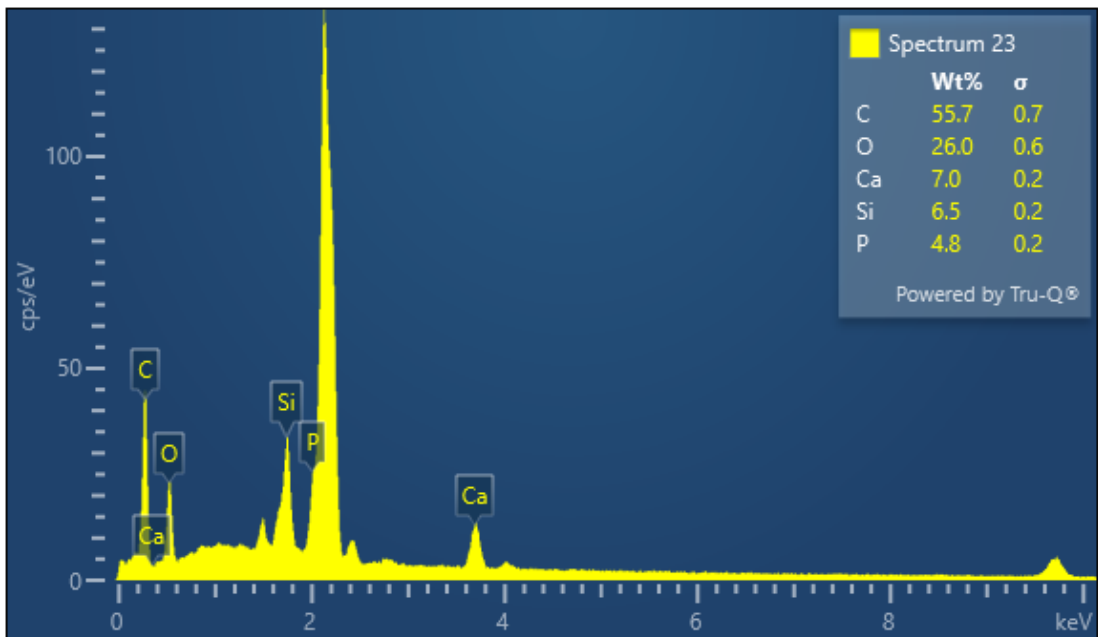


ภาพ 19 สเปคตรัมที่ 26

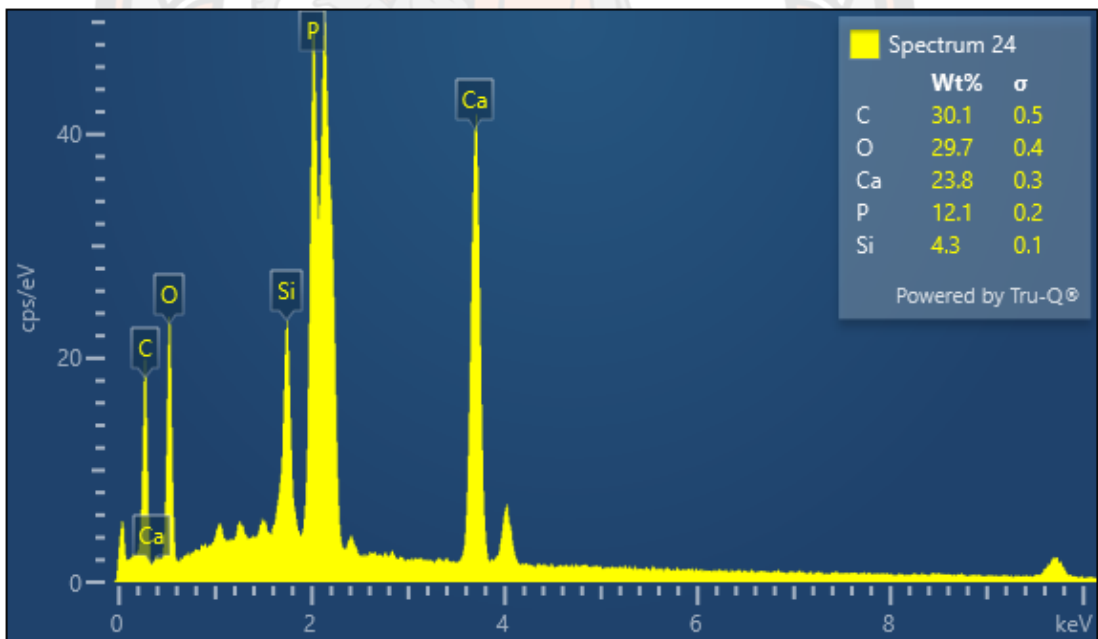


ภาพ 20 สเปคตรัมที่ 22

ส



ภาพ 21 สเปกตรัม 23

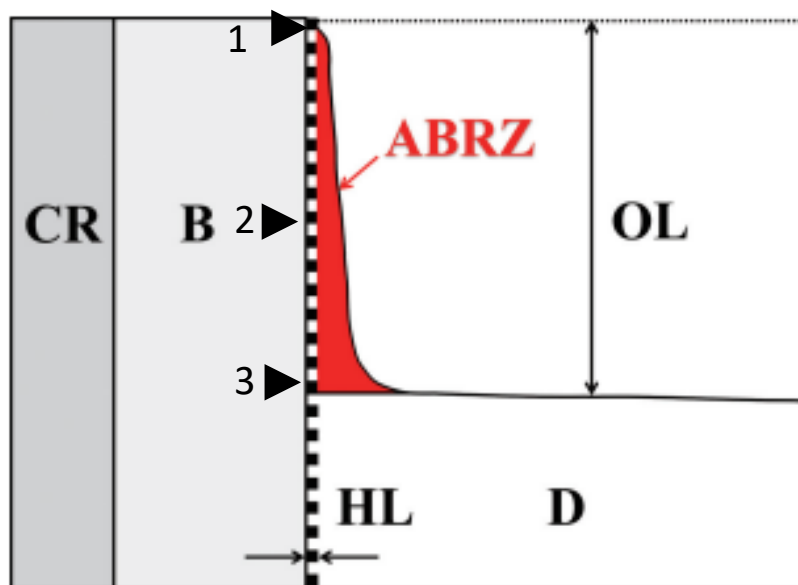


ภาพ 22 สเปกตรัมที่ 24

เมื่อกำหนดตำแหน่งที่เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง ด้วยการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ ด้วยเทคนิคไอเอสได้แล้ว จากนั้นวัดความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างจะเก็บข้อมูลจาก ค่าเฉลี่ย ความกว้างของ พื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่วัดได้จากภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ที่ระดับความลึก 3 ตำแหน่ง ได้แก่บริเวณขอบด้านนอกสุดของพื้น บริเวณกึ่งกลางของความยาวของ พื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง และบริเวณด้านล่างสุดของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง ดังภาพ 23

ระดับของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนจะเก็บข้อมูลความลึกที่สุดที่ซิลเวอร์ไนเตรตแพร่เข้าไปเกาะระหว่างชั้นของสารยึดติด โดยวัดจากภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

สำหรับการเก็บข้อมูลทั้งความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง และ การเกิดการรั่วซึมระดับนาโนจะเก็บข้อมูลโดยทันตแพทย์ 2 คน จากนั้นจะนำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มอีกครั้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ



ภาพ 23 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลของการศึกษา นี้ โดยภาพจะจำลองลักษณะการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างและการรั่วซึมระดับนาโนที่บริเวณส่วนนอกของรอยต่อระหว่างสารยึดติดและเนื้อฟัน โดยดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

CR คอมโพสิต เรซิน, B ชั้นของสารยึดติด, HL ชั้นไฮบริด, D เนื้อฟัน, ABRZ พื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง, OL พื้นผิวด้านนอก, 1 ตำแหน่งวัดที่ขอบนอกสุด, 2 ตำแหน่งวัดที่กึ่งกลาง, 3 ตำแหน่งวัดที่ด้านในสุด (27)

การวิเคราะห์ข้อมูล

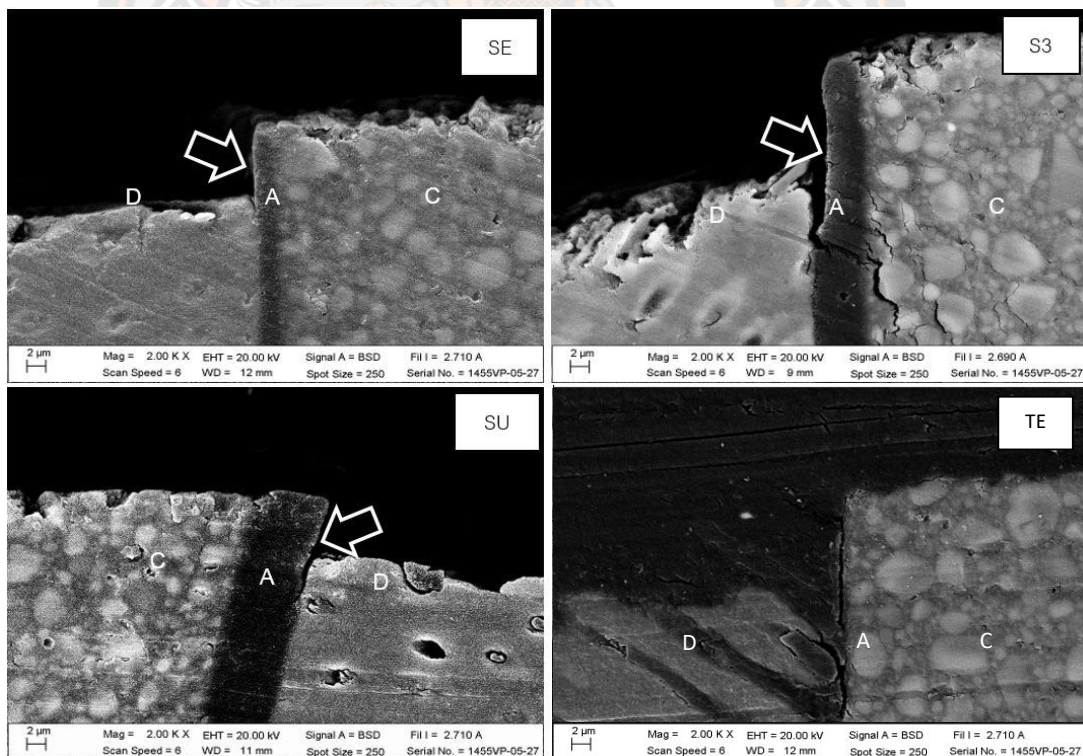
การวิเคราะห์หาความแตกต่างของความกว้างของพื้นที่ต้านทานกรด-ด่าง และการรั่วซึมระดับนาโน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเอสพีเอสเอส (SPSS version 23) เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยโคโมโกรอฟ สเมอรนอฟ (Kolmogorov-Smirnov test) เมื่อข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อทดสอบว่า ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากัน และใช้การทดสอบเอชเอสดี ของทูกีย์ (Tukey Honestly Significant Difference (HSD)) เพื่อหาคู่ของข้อมูลที่แตกต่างกัน



บทที่ 4 ผลการวิจัย

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันพบว่า ในชั้นของสารยึดติดส่วนที่ติดกับเนื้อฟันมีบริเวณที่ไม่ถูกละลายจากกรด (บริเวณที่ลูกศรชี้) เรียกว่า “พื้นที่ต้านทานกรด-ต่าง”

ในการศึกษานี้พบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันหลังจากที่แช่ด้วยสารละลายที่มีความเป็นกรดในกลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์, เคลียร์ฟิลไทรเอส ยูนิเวอร์แซล และ แอดเปอร์ ซึ่งเกิดบอนด์ยูนิเวอร์แซล ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้การยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์และมีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันผสมอยู่ ส่วนในกลุ่มแอดเปอร์ ซึ่งเกิดบอนด์ทู ที่ใช้การยึดติดระบบโบททอลเอทซ์จะไม่พบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างในทุกกลุ่มทดลอง



ภาพ 24 บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 เท่า

(A คือ สารยึดติด, C คือ วัสดุอุดฟันเรซิน คอมโพสิต, D คือ เนื้อฟัน)

จากภาพที่ 24 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่บริเวณลูกศรชี้สารยึดติดเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ (SE) สารยึดติดเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล (S3) สารยึดติดแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล (SU) วัดค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างได้ดังตารางที่ 6

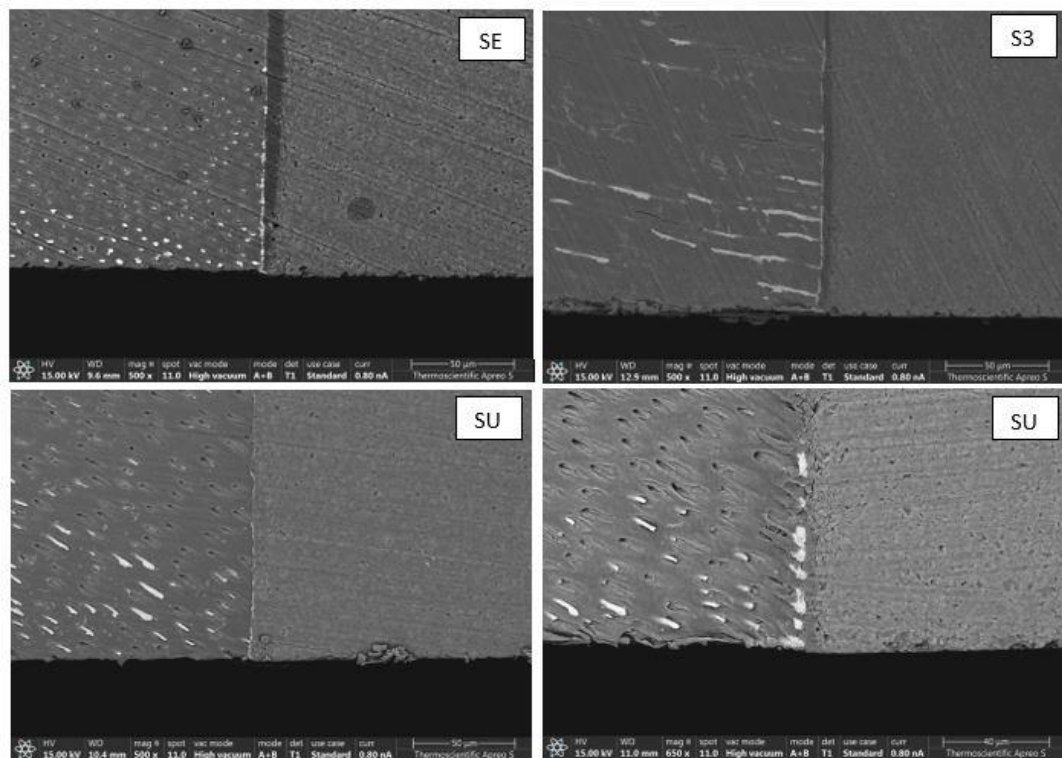
ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจากสารยึดติดทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของสารยึดติด	พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง (ไมโครเมตร)
สารยึดติดเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ (SE)	0.90 ± 0.49^a
สารยึดติดเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล (S3)	0.43 ± 0.24^b
สารยึดติดแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล (SU)	0.37 ± 0.09^b

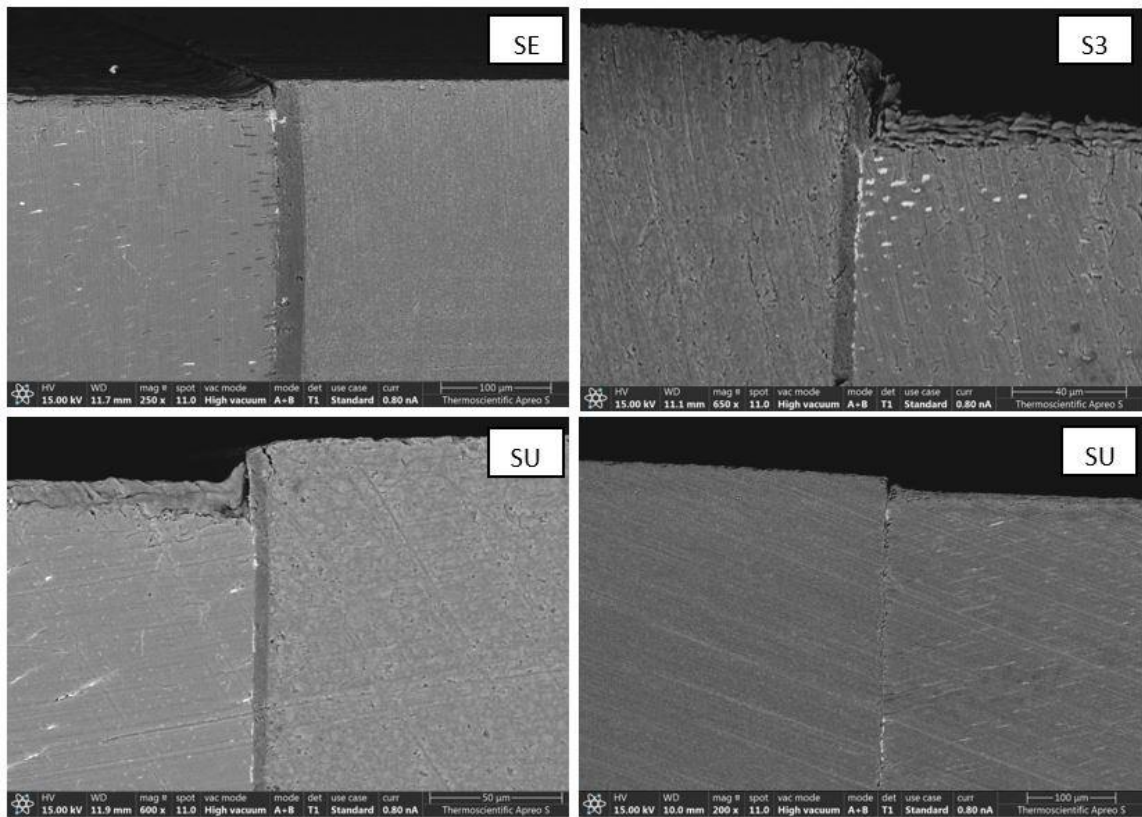
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวสทมภ์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p\text{-value} > 0.05$)

จากตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันของสารยึดติดทั้ง 3 ชนิด พบว่าสารยึดติดเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ มีค่ากลางของการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างอยู่ที่ 0.90 ± 0.49 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่ากลุ่มเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล และซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซลอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) สารยึดติดเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล และ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล มีค่ากลางของความกว้างของการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างอยู่ที่ 0.43 ± 0.24 ไมโครเมตร และ 0.37 ± 0.09 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าค่ากลางของความหนาพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันทางสถิติ

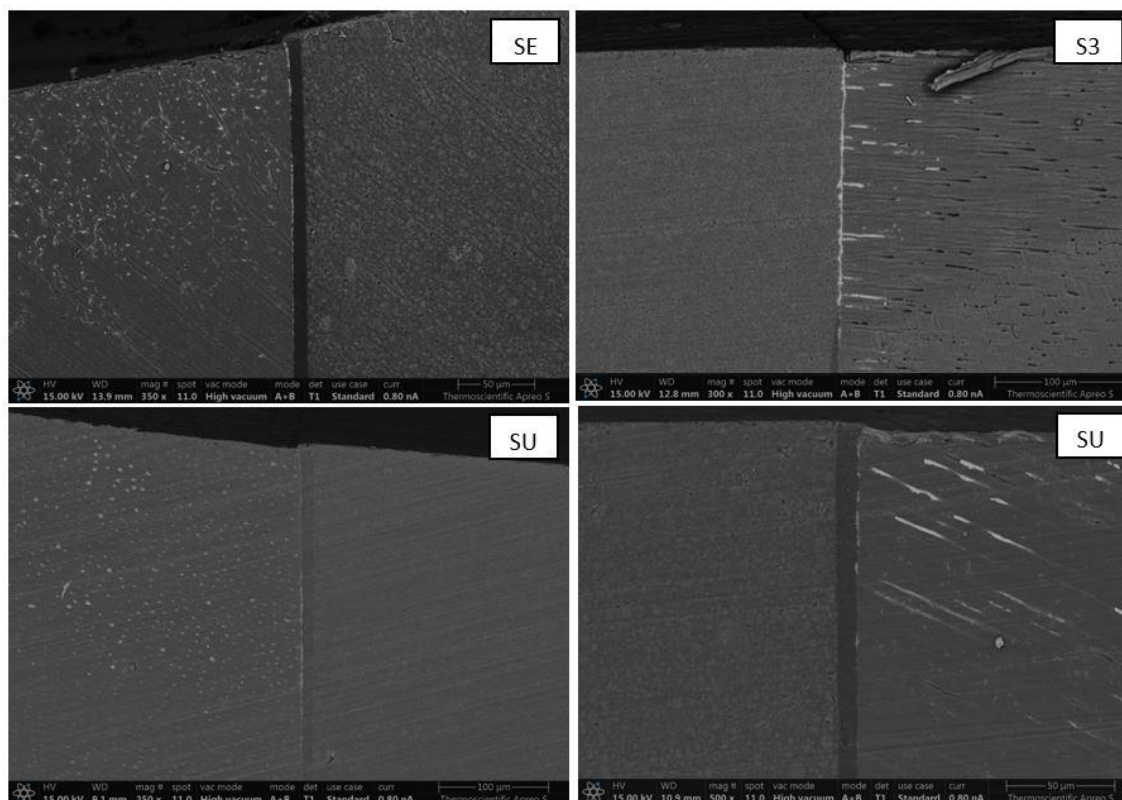
ในการศึกษาการรั่วซึมระดับนาโนที่รอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบการแพร่ของฟลักซิลเวอร์ไนเตรตที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน (ภาพที่ 25 26 และ 27) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบฟลักซิลเวอร์ไนเตรตซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาวที่บรัสสีปรากฏอยู่ในชั้นไฮบริดและฟลักซิลเวอร์ไนเตรตสามารถแทรกซึมไปยังช่องว่างที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันหรือเรียกว่าการรั่วซึมระดับนาโน ทำการวัดความลึกของฟลักซิลเวอร์ไนเตรตดังกล่าวโดยวัดจากผิวนอกสุดไปถึงจุดที่ลึกที่สุดที่ฟลักซิลเวอร์ไนเตรตแพร่เข้าไปเพื่อหาระดับการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน พบว่ามีการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันในทุกกลุ่มทดลอง โดยการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของฟลักซิลเวอร์ไนเตรตแสดงเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในตารางที่ 7



ภาพ 25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มแช่น้ำ 24 ชั่วโมง



ภาพ 26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มแร่สารละลายกรดและ
ต่าง



ภาพ 27 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลุ่มเทอร์โมโซลิ่ง 5000 รอบ ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะการเกิดการรั้วซึมระดับนาโนที่รอยต่อระหว่างสารยึดติดชนิดต่างๆ กับเนื้อฟืน (ไมโครเมตร)

สารยึดติด	แช่น้ำ 24 ชม.	แช่สารละลายกรดและต่าง	เทอร์โมโซลิ่ง
เคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ (SE)	61.31±31.13 ^B	188.23±33.43 ^{A,b}	236.63±144.84 ^A
เคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล (S3)	84.18±33.91 ^B	127.14±32.91 ^{A,c}	200.83±84.80 ^A
ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล (SU)	98.76±35.25 ^B	118.41±49.27 ^{B,c}	221.53±76.71 ^A
แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู (TE)	78.90±24.74 ^C	241.05±39.25 ^{A,a}	182.59±107.47 ^B

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งและแนวนอน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p\text{-value} > 0.05$)

จากตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่รอยต่อของสารยึดติดกับชั้นเนื้อฟันของสารยึดติดทั้ง 4 ชนิด พบว่า การทดสอบการแช่น้ำ 24 ชม. กลุ่มแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล เกิดการรั่วซึมระดับนาโนมากที่สุด คือ 98.76 ± 35.26 ไมโครเมตร รองลงมาคือกลุ่มเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล (84.18 ± 33.91 ไมโครเมตร) และ แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู (78.90 ± 24.75 ไมโครเมตร) ส่วนกลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ เกิดการรั่วซึมระดับนาโนน้อยที่สุด 61.31 ± 31.13 ไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่าการรั่วซึมเฉลี่ยระดับนาโนทั้ง 4 กลุ่ม

การทดสอบการแช่สารละลายกรด-ด่าง พบว่ากลุ่มแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู มีค่าเฉลี่ยการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนสูงที่สุดที่ 241.05 ± 39.26 ไมโครเมตร กลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ มีค่าเฉลี่ยรองลงมาอยู่ที่ 188.23 ± 33.43 ไมโครเมตร และ กลุ่มเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล และ แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล พบค่าเฉลี่ยของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนน้อยที่สุดอยู่ที่ 127.14 ± 32.91 และ 118.41 ± 49.27 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยกลุ่มแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทูมีค่าเฉลี่ยการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติและเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล และ แอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล

เมื่อนำชิ้นงานมาทำการทดสอบด้วยเทอร์มอไซคลิง 5000 รอบ กลุ่มที่เกิดการรั่วซึมระดับนาโนมากที่สุดคือกลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ (236.63 ± 144.84 ไมโครเมตร) รองลงมาคือ กลุ่มแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ยูนิเวอร์แซล (221.53 ± 76.72 ไมโครเมตร) และกลุ่มเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล (200.83 ± 84.80 ไมโครเมตร) ส่วนกลุ่มที่เกิดการรั่วซึมระดับนาโนน้อยที่สุดคือกลุ่มแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู อยู่ที่ 182.59 ± 107.48 ไมโครเมตร แต่เมื่อทดสอบทางสถิติไม่พบความแตกต่างทางสถิติของการรั่วซึมเฉลี่ยระดับนาโนทั้ง 4 กลุ่ม

การเปรียบเทียบระยะการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดแต่ละชนิดจากการทดลองที่แตกต่างกันพบว่า ในกลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ค่าเฉลี่ยของระยะการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนจากการทดสอบเทอร์มอไซคลิงมากที่สุดที่ 236.63 ± 144.84 ไมโครเมตร รองลงมาคือกลุ่มที่แช่สารละลายกรด-ด่างพบการรั่วซึมระดับนาโน 188.23 ± 33.43 ไมโครเมตร และกลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม. พบการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนต่ำสุด 61.31 ± 31.13 ไมโครเมตร และเมื่อทดสอบทางสถิติพบว่ากลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์ที่แช่น้ำ 24 ชม. มีการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ทำเทอร์มอไซคลิง และ กลุ่มที่แช่สารละลายกรดและด่าง ($p\text{-value} > 0.05$) และเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ทำเทอร์มอไซคลิงและกลุ่มที่แช่สารละลายกรดและด่าง

สารยึดติดเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล พบว่าการทดสอบชิ้นงานด้วยการแช่น้ำ 24 ชม. เพื่อดูการรั่วซึมระดับนาโนมีค่าการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 84.18 ± 33.91 ไมโครเมตร ($p < 0.05$) ส่วนการทดสอบด้วยการแช่สารละลายกรด-ด่าง และเทอร์มอไซคลิงเกิดการรั่วซึมระดับนาโน สูงกว่าการแช่น้ำ 24 ชม. (127.14 ± 32.91 ไมโครเมตร และ 200.83 ± 84.80 ไมโครเมตร) จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละคู่หรือการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons) ด้วยวิธีการทูกีย์ (Tukey method) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ย 2 กลุ่มนี้

การทดสอบชิ้นงานเพื่อทดสอบการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดแอดเปอร์ ซึ่งเกลบอนด์ยูนิเวอร์แซล ด้วยการทำเทอร์มอไซคลิงพบว่าสารยึดติดชนิดนี้เกิดการรั่วซึมระดับนาโนสูงที่สุด (221.53 ± 76.72 ไมโครเมตร) ซึ่งมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม. (98.76 ± 35.25 ไมโครเมตร) และแช่สารละลายกรดและด่าง (221.53 ± 76.71 ไมโครเมตร) อย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) ส่วนการแช่สารละลายกรดและด่างมีค่าเฉลี่ยระยะการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน สูงกว่า การแช่น้ำ 24 ชม. แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 กลุ่มไม่แตกต่างกันทางสถิติ

การรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดแอดเปอร์ ซึ่งเกลบอนด์ทุพบระยะการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนสูงที่สุดในกลุ่มที่แช่สารละลายกรดและด่าง ทำให้เกิดการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน 241.05 ± 39.26 ไมโครเมตร ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม. และทำเทอร์มอไซคลิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ การทำเทอร์มอไซคลิง และ การแช่น้ำ 24 ชม. (182.59 ± 107.48 และ 78.90 ± 24.75 ไมโครเมตร) และเมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าค่าเฉลี่ยของระยะการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของกลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม. จะเกิดการรั่วซึมระดับนาโนน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$)

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

1. พบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดที่มีส่วนผสมของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน และใช้ในระบบเซลฟ์เอทซ์ โดยกลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอี บอนด์เกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างกว้างที่สุด
2. สารยึดติดที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนจากการแช่สารละลายกรดและต่าง และพบว่าสารยึดติดสารยึดติดเคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซลและแอดเปอร์ ซึ่งเกิดบอนด์ยูนิเวอร์แซล เกิดการรั่วซึมระดับนาโนน้อยที่สุด

อภิปรายผล

การบูรณะฟันด้วยวัสดุอุดเรซิน คอมโพสิตร่วมกับการใช้สารยึดติดพบว่าเกิดการรั่วซึมที่รอยต่อของวัสดุกับเนื้อฟันและพบเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาหรือเมื่อมีการใช้งานเพิ่มขึ้น จึงมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนของวัสดุอุดฟันสูงขึ้น เมื่อได้มีการค้นพบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างที่บริเวณใต้ต่อชั้นไฮบริดจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ โดยพบว่าบริเวณนี้จะประกอบไปด้วยผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นคล้ายกับชั้นเนื้อฟัน และสามารถต้านทานการเกิดฟันผุได้ดีกว่าเนื้อฟันปกติ(23) และจากการศึกษาของ Tsuchiya และคณะ ที่พบว่าพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างจะมีความหนาแตกต่างกันตามชนิดของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพบว่าโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดเอมีตีพีจะเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างหนาที่สุดเมื่อเทียบกับโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดอื่นๆ(22) ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกสารยึดติดทั้งหมด 4 กลุ่ม แบ่งเป็น สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ 1 กลุ่ม สารยึดติดระบบยูนิเวอร์แซล 2 กลุ่ม โดยทั้ง 3 กลุ่มที่กล่าวมาจะประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดเอมีตีพี และ สารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ 1 กลุ่ม เพื่อนำมาเปรียบเทียบการเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างและการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

จากผลการทดลองครั้งนี้ไม่พบพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างในกลุ่มแอดเปอร์ ซึ่งเกิดบอนด์ทุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (22, 24, 47) การเกิดพื้นที่ต้านทานกรด-ต่างนั้นจะสัมพันธ์กับการใช้สารยึดติดชนิดที่มีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน และความสามารถในการแทรกซึมของสารยึดติดเข้าไปในชั้นเนื้อฟัน (47) เนื่องจากสารยึดติดชนิดนี้ไม่มีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน และการใช้งานของสารยึดติดในระบบนี้ จะต้องใช้กรดฟอสฟอริกเพื่อปรับสภาพของพื้นผิวของเนื้อฟันก่อนการบูรณะ ซึ่งกรดฟอสฟอริกจะไปละลายชั้นเคลือบออกทั้งหมด ทำให้ไม่หลงเหลือผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ในบริเวณที่เกิดการ

ยึดติด รวมถึงสารยึดติดแอดเปอเรอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู ไม่มีส่วนผสมของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน จึงไม่เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงเป็นเหตุผลให้ไม่พบพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดชนิดนี้ (48) ส่วนในกลุ่มที่ใช้สารยึดติดที่มีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันนั้น พบบริเวณที่มีการเรียงตัวของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์อย่างหนาแน่นที่รอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟันที่ถูกละลายด้วยกรด เรียกว่าพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง และพบในทุกกลุ่มทดลอง โดยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างประมาณ 1 ไมโครเมตร และพบว่าสารยึดติดกลุ่มยูนิเวอร์แซลจะเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่น้อยกว่ากลุ่มเซลฟ์เอทซ์ชนิด 2 ขั้นตอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Inoue และคณะ (49) พบว่าความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของสารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์และเคลียร์ฟิล ไตรเอสบอนด์ประมาณ 1 ไมโครเมตรหรือน้อยกว่า และอีกงานศึกษาของ Nikaido และ คณะ ในปี 2009 (50) ที่ศึกษาการเกิดพื้นที่ด้านทานกรดต่างของสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 1 ขั้นตอน พบว่ามีการสร้างชั้นไฮบริดที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน เมื่อผ่านกระบวนการแช่สารละลายกรด-ต่าง จะพบบริเวณที่มีแร่ธาตุเรียงตัวกันอยู่หนาแน่นหรือพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างใต้ต่อชั้นไฮบริด ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

จากการศึกษาของ Nikaido และ Inoue (50, 51) แสดงให้เห็นว่าความหนาและรูปร่างของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจะขึ้นอยู่กับสารยึดติดที่เลือกใช้ โดยแบ่งเป็นสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 1 ขั้นตอน และ สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 2 ขั้นตอน ลักษณะของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) พบการสึกกร่อนของเนื้อฟัน (funnel-shape erosion) ต่อจากพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิล ไตรเอสบอนด์ที่เป็นสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 1 ขั้นตอน โดยเกิดจากโมโนเมอร์ที่ไม่สามารถแพร่ไปบริเวณเนื้อฟันที่สูญเสียแร่ธาตุ ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณใต้ต่อชั้นไฮบริด และอีกเหตุผลหนึ่งอาจเกิดจากน้ำที่หลงเหลืออยู่หรือน้ำจากตัวทำละลายที่ผสมในสารยึดติดชนิด 1 ขั้นตอนที่มีมาก จะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงเกิดเป็นช่องว่างใต้พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง 2) ไม่พบการสึกกร่อนใต้พื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง จากเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์และ แมค บอนด์ ทู (Mac Bond II) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 2 ขั้นตอน ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่โมโนเมอร์ในสารยึดติดสามารถแพร่และเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์ แต่พบว่าความกว้างของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างไม่เท่ากัน พบว่าเกิดจากการแพร่ของโมโนเมอร์ไปยังเนื้อฟัน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันที่แตกต่างกันของสารยึดติด 3) การเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง ที่มีความชัน (slope) ลงด้านล่าง พบในเคลียร์ฟิลโพเทคบอนด์ เนื่องจากสารยึดติดชนิดนี้มีการปลดปล่อยฟลูออไรด์ และฟลูออไรด์จะช่วยด้านทานการละลายตัวจากกรดได้ ส่งผลให้พื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่เกิดขึ้นจากสารยึดติดกลุ่มที่สามารถปลดปล่อยฟลูออไรด์ได้จะมีลักษณะที่มีความชันลงด้านล่าง หรือ มีความหนามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่นๆ ที่ไม่มีฟลูออไรด์ผสม

จากการศึกษาของ Yoshida และคณะ ในปี 2004 (31) พบว่าการกัดกร่อนชั้นเนื้อฟันของสารยึดติดที่เป็นกรดอ่อนจะกัดกร่อนได้บางส่วน ทำให้หลงเหลือผลึกไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่บริเวณเส้นใยคอลลาเจน ซึ่งผลึกไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่หลงเหลืออยู่จะทำปฏิกิริยาเคมีกับโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ผสมอยู่ในสารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ส่งผลให้เกิดการสร้างพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างขึ้น (36) เช่นเดียวกับการศึกษาที่ผู้วิจัยใช้สารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ ซึ่งมีความเป็นกรดประมาณ 2.0 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มกรดอ่อน พบว่ามีการสร้างพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างขึ้นและวัดค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างประมาณ 0.9 ± 0.4 ไมโครเมตร นอกจากนี้แล้วยังไม่พบการสึกกร่อนใต้ต่อพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างในกลุ่มทดลองนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Inoue ที่ไม่พบการสึกกร่อนใต้ต่อพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดระบบเซลฟ์เอทซ์ชนิด 2 ขั้นตอน ที่ไม่มีการปลดปล่อยฟลูออไรด์

กลุ่มเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ และ ซิงเกิลบอนด์ ยูนิเวอร์แซล พบค่าเฉลี่ยความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง เท่ากับ 0.43 ± 0.24 และ 0.37 ± 0.09 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Nikaido และคณะ (50) การเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของสารยึดติดทั้ง 2 ชนิดเกิดจากความเป็นกรดอ่อนมากของสารยึดติด เมื่อมีการใช้งานจะเกิดการกัดกร่อนพื้นผิวฟันด้านใต้น้อยกว่า ทำให้เกิดบริเวณที่จะทำปฏิกิริยาน้อยกว่าการใช้สารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มกรดอ่อน ดังนั้นการแทรกซึมของโมโนเมอร์ในสารยึดติดชนิดกรดอ่อนมากจึงเกิดได้ไม่ดีเท่าการใช้สารยึดติดชนิดกรดอ่อน เมื่อเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันระหว่างสารยึดติดกับเนื้อฟันจึงเกิดการสร้างชั้นไฮบริด และ พื้นที่ด้านทานกรด-ต่างที่มีความหนาน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้สารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ (22) นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้พบการสึกกร่อนใต้ต่อพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างในสารยึดติดทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากสารยึดติดกลุ่มนี้มีน้ำเป็นส่วนประกอบ น้ำที่หลงเหลืออยู่จะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทด์ แล้วเกิดเป็นช่องว่างใต้ต่อพื้นที่ด้านทานกรด-ต่าง (47) จากผลการทดลองพบว่าความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของสารยึดติดทั้ง 2 ชนิดมีค่าแตกต่างกัน เนื่องมาจากปริมาณของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน ความสามารถในการแทรกซึมของสารยึดติดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันที่แตกต่างกันของแต่ละสารยึดติดจึงทำให้ความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของสารยึดติดทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามจากการที่สารยึดติดทั้ง 2 ชนิดมีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดเอมตีพีเหมือนกัน มีค่าความเป็นกรดที่ใกล้เคียงกันทำให้การเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างของสารยึดติดทั้ง 2 ชนิดนี้มีความหนาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การรั่วซึมระดับนาโนคือการเกิดช่องว่างภายในชั้นไฮบริด ซึ่งพบได้ทั้งในสารยึดติดระบบโบทอลเอทซ์ และเซลฟ์เอทซ์ ซึ่งช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อฟันทำให้เกิดการเสื่อมของวัสดุ ส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุต่ำลง ส่งผลให้เกิดการผุซ้ำภายหลังจาก

การบูรณะได้ ในงานศึกษานี้ได้เลือกใช้สารละลายแอมโมเนียมซิลเวอร์ไนเตรต (ammoniacal silver nitrate solution) เพื่อทำการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน เนื่องจากซิลเวอร์ไนเตรต เป็นสารที่มีขนาดเล็กมาก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.059 นาโนเมตร ทำให้แทรกซึมไปตามช่องว่างได้ดีขนาดเล็กราคาได้ดี (52) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการเกิดคราบ (stain) เมื่อไปจับกับเส้นใยคอลลาเจนที่เผยผิ๊งทำให้สามารถตรวจพบซิลเวอร์ไนเตรตจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดได้ง่าย (53, 54)

ผลการศึกษานี้พบว่าสารยึดติดชนิดแอตเปอร์ ซึ่งเกลือบอนด์ทำให้เกิดการรั่วซึมระดับนาโน ประมาณ 50-100 ไมโครเมตร ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการศึกษาของ Dorfer และคณะ ในปี 2000 ที่ได้ค่าเฉลี่ยการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดชนิดโททอลเอทซ์ชนิด 2 ขั้นตอน ประมาณ 70 ไมโครเมตร (55) เนื่องจากในระบบโททอลเอทซ์ จะมีการปรับสภาพพื้นผิวเนื้อฟันก่อนการบูรณะด้วยกรดฟอสฟอริก โดยกรดฟอสฟอริกจะไปกำจัดเอาชั้นเคลือบฟันออก เส้นใยคอลลาเจนออก จากนั้นจะทาด้วยสารยึดติด เมื่อโมโนเมอร์ที่อยู่ในสารยึดติดไม่สามารถไหลแพร่เข้าไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียแร่ธาตุได้สมบูรณ์ จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้น (56) สำหรับสารยึดติดชนิดเคลียร์ฟิลเอสอีบอนด์ ที่การยึดติดกับเนื้อฟันเป็นระบบเซลล์เอทซ์ แบบ 2 ขั้นตอนเกิดการรั่วซึมระดับนาโน 61.31 ± 31.13 ไมโครเมตร ส่วนกลุ่มที่เป็น 1 ขั้นตอน ได้แก่ เคลียร์ฟิลไตรเอส ยูนิเวอร์แซล และ แอตเปอร์ ซึ่งเกลือบอนด์ยูนิเวอร์แซล พบการรั่วซึมระดับนาโนสูงกว่าเคลียร์ฟิล เอสอี บอนด์ อยู่ที่ 84.18 ± 33.91 และ 98.76 ± 35.25 ไมโครเมตร ตามลำดับ การเกิดการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์เกิดได้จากความเป็นกรดของโมโนเมอร์ที่ผสมในสารยึดติดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (modify) ชั้นเคลือบฟัน ทำให้ยังมีผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์และน้ำหลงเหลืออยู่ในบริเวณผิวฟันที่ทาสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์ น้ำที่หลงเหลืออยู่จึงไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของสารยึดติดเกิดเป็นช่องว่างเล็กๆ ในระดับนาโนเมตร หรือ เกิดการรั่วซึมระดับนาโนขึ้น (20) และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการรั่วซึมระดับนาโนของสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์คือส่วนประกอบของสารยึดติดระบบนี้จะเพิ่มความเข้มข้นของน้ำ โมโนเมอร์ที่มีความเป็นกรด และ ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (hydroxyethylmethacrylate, HEMA) ทำให้สารยึดติดมีคุณสมบัติชอบน้ำ มากกว่าแบบโททอลเอทซ์ ชั้นของสารยึดติดจึงสามารถดึงน้ำเข้ามาที่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา และเมื่อเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันชั้นของสารยึดติดจะทำหน้าที่คล้ายเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membranes) ที่ยอมให้น้ำสามารถไหลผ่านจากเนื้อฟันเข้ามายังบริเวณนี้ได้ (57-59) จึงเกิดการรั่วซึมระดับนาโนขึ้น และจากการศึกษาที่ผ่านมาๆ มาเกี่ยวกับความสามารถในการไหลผ่านของสารยึดติดพบว่าจะเกี่ยวข้องกับโมโนเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (unreacted monomer) โดยสารยึดติดชนิดเซลล์เอทซ์แบบ 1 ขั้นตอนมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันต่ำกว่าแบบ 2 ขั้นตอน ทำให้มีโมโนเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่มากกว่าส่งผลให้การไหลผ่านของสารยึดติดเซลล์เอทซ์ชนิด 1 ขั้นตอนเกิดได้ไม่ดีเท่ากับแบบ 2 ขั้นตอน (60, 61) สำหรับโมโนเมอร์ที่มีความชอบน้ำที่ผสมอยู่ในสารยึดติดระบบเซลล์เอทซ์

จะเพิ่มคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ ส่งผลให้เกิดการบวมตัวของสายโพลีเมอร์และเกิดการเสื่อมสภาพของสารยึดติด ซึ่งพบสัดส่วนของโมโนเมอร์ที่มีความชอบน้ำในสารยึดติดชนิดเซลล์โพเทซแบบ 1 ขึ้นตอนมากกว่าแบบ 2 ขึ้นตอน (16, 62) และจากการศึกษาของ Van Landuyt และคณะ (63) พบว่า ผลของโมโนเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดขึ้นที่ถูการยับยั้งโดยออกซิเจน (oxygen inhibition layer) ขนาด 1-3 ไมโครเมตร ที่มีไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตอยู่บริเวณผิวด้านนอกสุดของสารยึดติด โดยมักเกิดจากการใช้สารยึดติดระบบเซลล์โพเทซแบบ 1 ขึ้นตอน ซึ่งไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมีความเข้มข้นมากกว่าน้ำ ทำให้เกิดการดึงน้ำจากเนื้อฟันเข้าสู่ชั้นของสารยึดติด จึงเป็นเหตุผลให้พบการรั่วซึมระดับนาโนจากสารยึดติดชนิดเซลล์โพเทซแบบ 1 ขึ้นตอนมากกว่าแบบ 2 ขึ้นตอน

เพื่อที่จะศึกษาประสิทธิภาพของความแข็งแรงยึดของสารยึดติดแต่ละชนิด จึงได้ใช้การทำเทอร์มอไซคลิง และการแช่สารละลายกรดและด่างมาทดสอบ การทำเทอร์มอไซคลิงเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดกระบวนการเสื่อมสภาพ (aging process) ของบริเวณที่เกิดการยึดติด โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่าง 5 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส เพื่อเลียนแบบลักษณะที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในช่องปาก (64, 65) จากผลการทดลองของ Munck และคณะ ในปี 2005 (66) พบว่าหลังจากการทำเทอร์มอไซคลิงการยึดอยู่ของวัสดุจะลดลง เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านเข้ามายังบริเวณรอยต่อของวัสดุและเนื้อฟัน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน และการศึกษาของ Deng และคณะในปี 2014 พบว่าการทำเทอร์มอไซคลิงและการแช่สารละลายกรดและด่าง จะทำให้การรั่วซึมระดับนาโนเพิ่มมากขึ้นที่รอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟัน (43) การแช่สารละลายกรดและด่างเป็นการจำลองการเกิดฟันผุ โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียแร่ธาตุ และปฏิกิริยาการคืนกลับแร่ธาตุ เพื่อทำให้เกิดการเสื่อมของวัสดุบูรณะฟัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดติดของวัสดุนั้นยังไม่แน่ชัด แต่ก็มี การค้นพบว่าเมื่อนำวัสดุบูรณะไปแช่ด้วยกรดจะมีการเสื่อมสภาพของสารยึดติดได้มากกว่าการแช่น้ำด้วย โดยจะพบการเสื่อมสภาพและการสึกกร่อนบริเวณรอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟันได้ (45) โดยในงานศึกษานี้พบว่าในทุกกลุ่มที่ผ่านกระบวนการเทอร์มอไซคลิงและการแช่สารละลายกรด-ด่าง จะเกิดการรั่วซึมระดับนาโนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม. ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา ว่าหลังจากที่ผ่านกระบวนการเสื่อมสภาพตั้งแต่ 6 เดือนถึง 1 ปีขึ้นไป พบการรั่วซึมระดับนาโนที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันมากขึ้น และ ทำให้ความแข็งแรงยึดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (67, 68)

จากผลการทดลองการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนในกลุ่มทดลองที่แช่สารละลายกรดและด่าง พบกลุ่มที่เกิดการรั่วซึมระดับนาโนมากที่สุด คือ สารยึดติดแอดเปอร์ ซิงเกิลบอนด์ทู ซึ่งเป็นสารยึดติดระบบโททอลเอทซ์ ซึ่งสารยึดติดระบบนี้ไม่มีการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกับฟลิกไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงไม่เกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ด่างที่มีคุณสมบัติด้านทานการละลายตัวจาก

กรด (1) ทำให้เกิดการรั่วซึมระดับนาโนมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มทดลองอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Waidyasekera ที่พบว่าพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจะสามารถต้านทานการละลายจากกรดได้ดีกว่าเนื้อฟันปกติ (25) Deng และ คณะ พบว่าการแช่ด้วยสารละลายกรดและต่าง นอกจากจะทำให้ความแข็งแรงยึดของสารยึดติดและเนื้อฟันลดลงแล้ว ยังพบว่ามี การละลายของชั้นไฮบริดจากบริเวณขอบอีกด้วย (43)

แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการแช่สารละลายกรดและต่างกับการเกิดการเสื่อมของบริเวณรอยต่อของสารยึดติดและฟันเท่าที่ควร จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการแช่สารละลายกรดและต่างกับการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่เกิดขึ้นกับสารยึดติดแต่ละชนิด

พบการรั่วซึมระดับนาโนที่เกิดจากสารยึดติดที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นในกลุ่มทดลองที่ผ่านกระบวนการเทอร์มอไซคลิก จำนวน 5000 รอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Li และคณะ ในปี 2000 (53) ที่พบว่าการทำเทอร์มอไซคลิกส่งผลให้เกิดการรั่วซึมระดับนาโนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มทดลอง โดยการเพิ่มขึ้นของฟลักซิลเวอร์ที่พบเป็นผลมาจากการที่ความแข็งแรงยึดของสารยึดติดที่ลดลงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ เกิดเป็นช่องว่างที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดกับเนื้อฟันเพิ่มมากขึ้น (69) Bedran-de-Castro กล่าวว่า การทำเทอร์มอไซคลิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณรอยต่อของสารยึดติดและเนื้อฟันจากค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient thermal expansion) ของฟันและสารยึดติดไม่เท่ากัน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสารยึดติดและเนื้อฟัน (70) ช่องว่างที่เกิดขึ้นทำให้ฟลักซิลเวอร์สามารถแทรกผ่านไปได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการรั่วซึมระดับนาโนที่เพิ่มมากขึ้นในทุกกลุ่มทดลอง นอกจากนี้ น้ำที่หลงเหลืออยู่ในต่อเนื้อฟันยังสามารถผ่านเข้าออกที่บริเวณช่องว่างนี้ได้ จึงเหนี่ยวนำให้เกิดการเสื่อมของสารยึดติด ทำให้ความแข็งแรงยึดลดลงและเกิดการรั่วซึมระดับนาโนเพิ่มขึ้น (43)

จากผลการทดลองในการศึกษานี้ทำให้ช่วยยืนยันถึงการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างจากการใช้สารยึดติดที่มีส่วนผสมของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน และพบว่าการเกิดพื้นที่ด้านทานกรด-ต่างสามารถช่วยต้านทานการเกิดการละลายตัวจากกรดได้ แต่อย่างไรก็ตามในงานศึกษานี้ยังเป็นการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ที่จำลองการเกิดกระบวนการเสื่อมของวัสดุในสภาวะต่างๆ ซึ่งยังไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิก เนื่องจากยังมีอีกหลายๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน ทำให้ต้องมีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงด้านอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานในคลินิก หรือนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาสารยึดติดที่ดีมากขึ้นในอนาคต

บรรณานุกรม

1. Sadr A, Nikaido T, Takagaki T, Hariri I, Nazari A, Tagami J. Ultra-Morphological and Nanomechanical Characterization of Reinforced Enamel and Dentin by Self-Etch Adhesives: The Super Tooth. *Journal of Nano Research*. 2012;16:131-40.
2. Khushbu Y, Satyam P. dental caries a review. *Asian Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*. 2016;6(53):01-7.
3. Featherstone JD. Dental caries: a dynamic disease process. *Aust Dent J*. 2008;53(3):286-91.
4. Pioch T, Hans JS, Heinz D, Franklin G. Nanoleakage at the composite-dentin interface : A review. *American journal of dentistry*. 2001;14(4):252-8.
5. Martin B. The Cause of Postrestorative Sensitivity and Its Prevention. *Journal of Endodontics* 1986;12(10):475-81.
6. Sano H, Takatsu T, Ciucchi B, Horner JA, Matthews WG, Pashley DH. Nanoleakage: leakage within the hybrid layer. *Oper Dent*. 1995;20(1):18-25.
7. Edward JS. Dentin enamel adhesives review of the literature. *Pediatr Dent*. 2002;24(5):456-61.
8. Ichikawa C, Nikaido T, Inoue G, Sadr A, Tagami J. Ultramorphological evaluation of the dentin acid-base resistant zone of two-step self-etching systems after long-term storage in water. *J Adhes Dent*. 2012;14(3):207-13.
9. Nikaido T, Nurrohman H, Takagaki T, Sadr A, Ichinose S, Tagami J. Nanoleakage in Hybrid Layer and Acid-Base Resistant Zone at the Adhesive/Dentin Interface. *Microsc Microanal*. 2015;21(5):1271-7.
10. Jr SE, J P, HO. H. Bonding to enamel and dentin : a brief history and state of the art. *Quintessence Int*. 1995;26(2):95-110.
11. Eick JD, Gwinnett AJ, Pashley DH, Robinson SJ. Current Concepts On Adhesion To Dentin. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*. 2016;8(3):306-35.
12. Perdigão J, Geraldini S, Hodges JS. Total-etch versus self-etch adhesive. *The Journal of the American Dental Association*. 2003;134(12):1621-9.

13. Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Horner JA. Permeability of dentin to adhesive agents. *Quintessence International*. 1993;24(9).
14. Ruben J, Arends J. Shrinkage of sound and demineralized human coronal dentine slabs. *Caries research*. 1993;27(4):266-70.
15. Nakabayashi N, Kojima K, E.Masuhara. The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into tooth substrates. *J Biomedical Mater Res*. 1982;16:265-73.
16. Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, Dorigo EDS. Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dental materials*. 2008;24(1):90-101.
17. Giannini M, Makishi P, Ayres AP, Vermelho PM, Fronza BM, Nikaido T, et al. Self-etch adhesive systems: a literature review. *Braz Dent J*. 2015;26(1):3-10.
18. Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Itou K, et al. Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J Dent Res*. 2002;81(8):556-60.
19. Erickson RL, Barkmeier WW, Latta MA. The role of etching in bonding to enamel: a comparison of self-etching and etch-and-rinse adhesive systems. *Dent Mater*. 2009;25(11):1459-67.
20. Vachiramon V, Vargas MA, Pashley DH, Tay FR, Geraldeli S, Qian F, et al. Effects of oxalate on dentin bond after 3-month simulated pulpal pressure. *journal of dentistry*. 2008;36(3):178-85.
21. Tay FR, Pashley DH. Aggressiveness of contemporary self-etching systems I Depth of penetration beyond dentin smear layers. *Dental Materials Journal*. 2000;17: 296-308.
22. Tsuchiya S, Nikaido T, Sonoda H, Foxton RM, Tagami J. Ultrastructure of the dentin-adhesive interface after acid-base challenge. *J Adhes Dent*. 2004;6(3):183-90.
23. Li N, Nikaido T, Alireza S, Takagaki T, Chen JH, Tagami J. Phosphoric acid-etching promotes bond strength and formation of acid-base resistant zone on enamel. *Oper Dent*. 2013;38(1):82-90.
24. Guan R, Takagaki T, Matsui N, Sato T, Burrow MF, Palamara J, et al. Dentin bonding performance using Weibull statistics and evaluation of acid-base resistant zone formation of recently introduced adhesives. *Dental materials journal*. 2016;35(4):684-93.

25. Waidyasekera K, Nikaido T, Weerasinghe DS, Ichinose S, Tagami J. Reinforcement of dentin in self-etch adhesive technology: a new concept. *J Dent.* 2009;37(8):604-9.
26. Nikaido T, Ichikawa C, Li N, Takagaki T, Sadr A, Yoshida Y, et al. Effect of functional monomers in all-in-one adhesive systems on formation of enamel/dentin acid-base resistant zone. *Dental Materials Journal.* 2011;30(5):576-82.
27. Kiriwara M, Inoue G, Nikaido T, Ikeda M, Sadr A, Tagami J. Effect of fluoride concentration in adhesives on morphology of acid-base resistant zones. *Dental Materials Journal.* 2013;32(4):578-84.
28. Li N, Nikaido T, Takagaki T, Sadr A, Makishi P, Chen J, et al. The role of functional monomers in bonding to enamel: acid-base resistant zone and bonding performance. *J Dent.* 2010;38(9):722-30.
29. Van Landuyt KL, Snauwaert J, De Munck J, Peumans M, Yoshida Y, Poitevin A, et al. Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials.* 2007;28(26):3757-85.
30. Fukegawa D, Hayakawa S, Yoshida Y, Suzuki K, Osaka A, Meerbeek BV. Chemical Interaction of phosphoric acid ester with hydroxyapatite. *J Dent Res.* 2006;85(10):941-4.
31. Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R, Nakayama Y, Okazaki M, Shintani H, et al. Comparative Study on Adhesive Performance of Functional Monomers. *J Dent Res.* 2004;83(6):454-8.
32. Carrilho E, Cardoso M, Marques Ferreira M, Marto CM, Paula A, Coelho AS. 10-MDP Based Dental Adhesives: Adhesive Interface Characterization and Adhesive Stability-A Systematic Review. *Materials (Basel).* 2019;12(5).
33. Yoshida Y, Van Meerbeek B, Nakayama Y, Snauwaert J, Hellems L, Lambrechts P, et al. Evidence of chemical bonding at biomaterial-hard tissue interfaces. *J Dent Res.* 2000;79(2):709-14.
34. Kanduti D, Sterbenk P, Artnik B. Fluoride: A Review of Use and Effects on Health. *Mater Sociomed.* 2016;28(2):133-7.
35. Wiegand A, Buchalla W, Attin T. Review on fluoride-releasing restorative materials--fluoride release and uptake characteristics, antibacterial activity and influence on caries formation. *Dent Mater.* 2007;23(3):343-62.

36. Iida Y, Nikaido T, Kitayama S, Takagaki T, Inoue G, Ikeda M, et al. Evaluation of dentin bonding performance and acid-base resistance of the interface of two-step self-etching adhesive systems. *Dental Materials Journal*. 2009;28(4):493-500.
37. Shinohara MS, De Goes MF, Schneider LF, Ferracane JL, Pereira PN, Di Hipolito V, et al. Fluoride-containing adhesive: durability on dentin bonding. *Dent Mater*. 2009;25(11):1383-91.
38. El-Deeb HA, Al Sherbiney HH, Mobarak EH. Bond durability of adhesives containing modified-monomer with/without-fluoride after aging in artificial saliva and under intrapulpal pressure simulation. *Oper Dent*. 2013;38(1):48-56.
39. Tay FR, Pashley DH, Yoshiyama M. Two modes of nanoleakage expression in single-step adhesives. *J Dent Res*. 2002;81(7):472-6.
40. Nakazawa Y, Suzuki S, Inoue G, Nikaido T, Tagami J, Moriyama K. Influence of orthodontic self-etch adhesive on acid resistance of surface enamel. *Dent Mater J*. 2018;37(4):568-74.
41. Li H, Burrow MF, Tyas MJ. Nanoleakage patterns of four dentin bonding systems. *Academy of Dental Materials*. 1999;16(1):48-56.
42. Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *Journal of Dentistry*. 1999;27:89-99.
43. Deng D, Yang H, Guo J, Chen X, Zhang W, Huang C. Effects of different artificial ageing methods on the degradation of adhesive-dentine interfaces. *J Dent*. 2014;42(12):1577-85.
44. Morresi AL, Amario MD, Capogreco M, Gatto R, Marzo G, Arcangelo CD, et al. Thermal cycling for restorative materials: Does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2014;29:295-308.
45. Sauro S, Watson TF, Tay FR, Chersoni S, Breschi L, Bernardi F, et al. Water uptake of bonding systems applied on root dentin surfaces: a SEM and confocal microscopic study. *Dental Materials*. 2006;22(7):671-80.

46. Zhao IS, Mei ML, Li Q-L, Lo ECM, Chu C-H. Arresting simulated dentine caries with adjunctive application of silver nitrate solution and sodium fluoride varnish: an in vitro study. *International dental journal*. 2017;67(4):206-14.
47. Nikaido T, Inoue G, Takagaki T, Waidyasekera K, Iida Y, Shinohara MS, et al. New strategy to create “Super Dentin” using adhesive technology: Reinforcement of adhesive–dentin interface and protection of tooth structures. *Japanese Dental Science Review*. 2011;47(1):31-42.
48. Takagaki T, Nikaido T, Tsuchiya S, Ikeda M, Foxton RM, Tagami J. Effect of hybridization on bond strength and adhesive interface after acid-base challenge using 4-META/MMA-TBB resin. *Dent Mater J*. 2009;28(2):185-93.
49. Iida Y, Nikaido T, Kitayama S, Takagaki T, Inoue G, Ikeda M, et al. Evaluation of dentin bonding performance and acid-base resistance of the interface of two-step self-etching adhesive systems. *Dental materials journal*. 2009;28:493-500.
50. Nikaido T, Weerasinghe DD, Waidyasekera K, Inoue G, Foxton RM, Tagami J. Assessment of the nanostructure of acid–base resistant zone by the application of all-in-one adhesive systems: Super dentin formation. *Bio-medical materials and engineering*. 2009;19(2-3):163-71.
51. Inoue G, Nikaido T, Sadr A, Tagami J. Morphological categorization of acid-base resistant zones with self-etching primer adhesive systems. *Dental Materials Journal*. 2012;31(2):232-8.
52. Zhao S, Chin J, Xiong Y, Wang H. Effect of acid etching time on nanoleakage and microtensile bond strength of the adhesive-dentin bond interface. *Chin J Dent*. 2006;6(3):29-37.
53. Li H, Burrow MF, Tyas MJ. The effect of thermocycling regimens on the nanoleakage of dentin bonding systems. *Dental Materials*. 2002;18(3):189-96.
54. Hashimoto M, Yamaguchi S, Imazato S. Nanoleakage and durability of resin/dentin bonds. *Current Oral Health Reports*. 2015;2(4):195-201.
55. Dörfer CE, Staehle HJ, Wurst MW, Duschner H, Pioch T. The nanoleakage phenomenon: influence of different dentin bonding agents, thermocycling and etching time. *European journal of oral sciences*. 2000;108(4):346-51.

56. Eick J, Gwinnett A, Pashley DH, Robinson S. Current concepts on adhesion to dentin. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*. 1997;8(3):306-35.
57. Tay FR, Pashley DH, Suh BI, Carvalho RM, Itthagarun A. Single-step adhesives are permeable membranes. *Journal of dentistry*. 2002;30(7-8):371-82.
58. Borges AB, Marsilio AL, Rodrigues JR. Shear bond strength of total-etch and self-etching adhesive systems to bovine dentin. *Revista de Odontologia da UNESP*. 2013;33(3):131-6.
59. Tay FR, King NM, Chan K-m, Pashley DH. How can nanoleakage occur in self-etching adhesive systems that demineralize and infiltrate simultaneously? *Journal of Adhesive Dentistry*. 2002;4(4).
60. Cadenaro M, Antonioli F, Sauro S, Tay FR, Di Lenarda R, Prati C, et al. Degree of conversion and permeability of dental adhesives. *European journal of oral sciences*. 2005;113(6):525-30.
61. Navarra CO, Cadenaro M, Codan B, Mazzoni A, Sergio V, De Stefano Dorigo E, et al. Degree of conversion and interfacial nanoleakage expression of three one-step self-etch adhesives. *European Journal of Oral Sciences*. 2009;117(4):463-9.
62. Liu Y, Tjäderhane L, Breschi L, Mazzoni A, Li N, Mao J, et al. Limitations in bonding to dentin and experimental strategies to prevent bond degradation. *Journal of dental research*. 2011;90(8):953-68.
63. Van Landuyt K, Snauwaert J, De Munck J, Coutinho E, Poitevin A, Yoshida Y, et al. Origin of interfacial droplets with one-step adhesives. *Journal of Dental Research*. 2007;86(8):739-44.
64. Saraiva LO, Aguiar TR, Costa L, Cavalcanti AN, Giannini M, Mathias P. Influence of intraoral temperature and relative humidity on the dentin bond strength: an in situ study. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2015;27(2):92-9.
65. de Oliveira Lino LF, Machado CM, de Paula VG, Vidotti HA, Coelho PG, Jalkh EBB, et al. Effect of aging and testing method on bond strength of CAD/CAM fiber-reinforced composite to dentin. *Dental Materials*. 2018;34(11):1690-701.

66. De Munck Jd, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, et al. A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *Journal of dental research*. 2005;84(2):118-32.
67. Hashimoto M, Ohno H, Kaga M, Endo K, Sano H, Oguchi H. In vivo degradation of resin-dentin bonds in humans over 1 to 3 years. *Journal of Dental Research*. 2000;79(6):1385-91.
68. Suppa P, Breschi L, Ruggeri A, Mazzotti G, Prati C, Chersoni S, et al. Nanoleakage within the hybrid layer: a correlative FEISEM/TEM investigation. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 2005;73(1):7-14.
69. Marchesi G, Frassetto A, Visintini E, Diolosà M, Turco G, Salgarello S, et al. Influence of ageing on self etch adhesives: one step vs. two step systems. *European journal of oral sciences*. 2013;121(1):43-9.
70. Bedran-de-Castro AKB, Pereira PN, Pimenta LAF, Thompson JY. Effect of thermal and mechanical load cycling on nanoleakage of Class II restorations. *Journal of Adhesive Dentistry*. 2004.

ภาคผนวก ก

รายการวัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และการเตรียมสารต่างๆ



รายการวัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และการเตรียมสารต่างๆ

1. วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1.1.1 ปีเกอร์ขนาดต่างๆ
- 1.1.2 เครื่องกวนสารให้ความร้อน
- 1.1.3 เครื่องชั่งแบบละเอียด
- 1.1.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

1.2 สารเคมี

- 1.2.1 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)
- 1.2.2 แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)
- 1.2.3 แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
- 1.2.4 โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4)
- 1.2.5 กรดอะเซติก (Acetic acid)
- 1.2.6 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 1.2.7 โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- 1.2.8 กรดซัลโฟนิก (HEPES)
- 1.2.9 โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

สารเคมีที่ใช้เตรียม

1. ซิลเวอร์ไนเตรต
2. แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์
3. น้ำกลั่น

หมายเหตุ ในขั้นตอนการเตรียม จะต้องเตรียมในท้องมืดและเก็บสารละลายไม่ให้โดนแสง

วิธีเตรียม

1. ชั่งผลึกซิลเวอร์ไนเตรต 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 25 มล. เขย่าจนผลึกละลายหมด เก็บใส่ขวดทึบแสงไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2. นำแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 28% มา 25 มล. มาผสม จนสารละลายกลายเป็นสีใส
3. เติมน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 50 มล.

2. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ตีมันเนอไรซิง

สารเคมีที่ใช้เตรียม

1. แคลเซียมคลอไรด์
2. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
3. กรดอะเซติก
4. โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์
5. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารละลาย

1. ชั่งผลึกแคลเซียมคลอไรด์ 0.3234 กรัม โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.3432 กรัม และเตรียมกรดอะเซติก 2.9 มล.
2. นำสารเคมีมาผสมลงในน้ำกลั่น 1 ลิตร เขย่าจนผลึกละลายหมด
3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนได้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5
4. เก็บในขวด ไม้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3. การเตรียมสารละลายตีมันเนอไรซิง (pH = 5)

สารเคมีที่ใช้เตรียม

1. แคลเซียมคลอไรด์
2. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
3. กรดอะเซติก
4. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารละลาย

1. ชั่งผลึกแคลเซียมคลอไรด์ 0.22 กรัม โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.122 กรัม และเตรียมกรดอะเซติก 2.9 มล.
2. นำสารเคมีมาผสมลงในน้ำกลั่น 1 ลิตร เขย่าจนผลึกละลายหมด
3. เก็บในขวด ไม้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

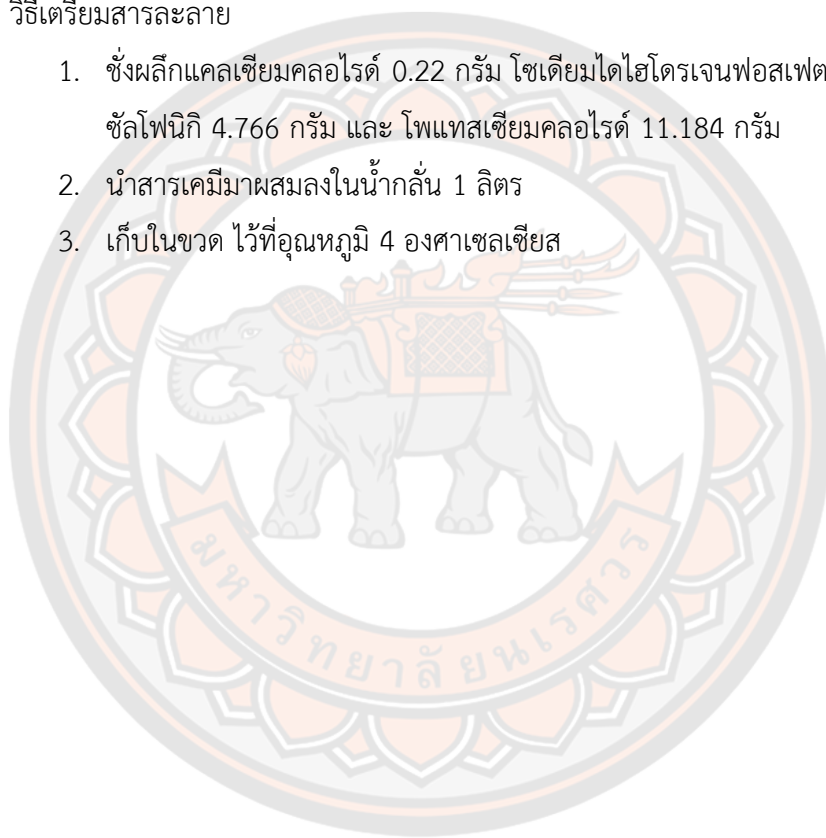
4. การเตรียมสารละลายรีมินเนอไรซิ่ง (pH = 7)

สารเคมีที่ใช้เตรียม

1. แคลเซียมคลอไรด์
2. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
3. กรดซัลโฟนิก
4. โพแทสเซียมคลอไรด์
5. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารละลาย

1. ชั่งผลึกแคลเซียมคลอไรด์ 0.22 กรัม โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.122 กรัม กรดซัลโฟนิก 4.766 กรัม และ โพแทสเซียมคลอไรด์ 11.184 กรัม
2. นำสารเคมีมาผสมลงในน้ำกลั่น 1 ลิตร
3. เก็บในขวด ไม้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



ภาคผนวก ข
ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ สำหรับความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง และการ
เกิดการรั่วซึมระดับนาโน



ค่าสถิติของความหนาของพื้นที่ด้านทานกรด-ด่าง

Tests of Normality

	Bonding	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ABRZ	SE	.216	9	.200 [*]	.915	9	.354
	Tri-S	.224	9	.200 [*]	.911	9	.326
	SU	.163	10	.200 [*]	.951	10	.679

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

ANOVA

ABRZ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.518	2	.759	7.275	.003
Within Groups	2.609	25	.104		
Total	4.127	27			

(I) Bonding	(J) Bonding	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		
					Lower Bound	Upper Bound	
Tukey HSD	SE	Tri-S	.470785 [*]	.148418	.011	.10110	.84047
		SU	.524672 [*]	.152274	.006	.14538	.90396
	Tri-S	SE	-.470785 [*]	.148418	.011	-.84047	-.10110
		SU	.053887	.148418	.930	-.31580	.42357
	SU	SE	-.524672 [*]	.152274	.006	-.90396	-.14538
		Tri-S	-.053887	.148418	.930	-.42357	.31580

ค่าสถิติของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน

Tests of Normality							
	Group	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Leak	IM-SE	.167	10	.200 [*]	.949	10	.660
	IM-S3	.185	10	.200 [*]	.922	10	.371
	IM-SU	.137	10	.200 [*]	.935	10	.496
	IM-TE	.235	10	.124	.937	10	.516
	pH-SE	.180	10	.200 [*]	.926	10	.411
	pH-S3	.199	10	.200 [*]	.951	10	.682
	pH-SU	.172	10	.200 [*]	.885	10	.148
	pH-TE	.221	10	.181	.929	10	.442
	TM-SE	.160	10	.200 [*]	.935	10	.502
	TM-S3	.270	9	.057	.862	9	.100
	TM-SU	.202	10	.200 [*]	.888	10	.160
	TM-TE	.253	9	.102	.849	9	.073

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

ค่าสถิติของการเกิดการรั่วซึมระดับนาโน ในกลุ่มที่แช่น้ำ 24 ชม.

ANOVA

Immediate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7173.958	3	2391.319	2.407	.083
Within Groups	35772.095	36	993.669		
Total	42946.053	39			

ค่าสถิติการเกิดการรั่วซึมระดับนาโนในกลุ่มที่แชนสารละลายกรดและต่าง

ANOVA

pHcycling

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	89022.644	3	29674.215	17.408	.000
Within Groups	61367.798	36	1704.661		
Total	150390.442	39			

	(I) Group2	(J) Group2	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	pH-SE	pH-S3	55.099900*	18.464350	.025	5.37121	104.82859
		pH-SU	64.819000*	18.464350	.006	15.09031	114.54769
		pH-TE	-52.822700*	18.464350	.034	-102.55139	-3.09401
	pH-S3	pH-SE	-55.099900*	18.464350	.025	-104.82859	-5.37121
		pH-SU	9.719100	18.464350	.952	-40.00959	59.44779
		pH-TE	-107.922600*	18.464350	.000	-157.65129	-58.19391
	pH-SU	pH-SE	-64.819000*	18.464350	.006	-114.54769	-15.09031
		pH-S3	-9.719100	18.464350	.952	-59.44779	40.00959
		pH-TE	-117.641700*	18.464350	.000	-167.37039	-67.91301
	pH-TE	pH-SE	52.822700*	18.464350	.034	3.09401	102.55139
		pH-S3	107.922600*	18.464350	.000	58.19391	157.65129
		pH-SU	117.641700*	18.464350	.000	67.91301	167.37039

ค่าสถิติของการทำเทอโมไซคลิง

ANOVA

Thermocycling

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16774.425	3	5591.475	.490	.691
Within Groups	410475.192	36	11402.089		
Total	427249.617	39			