

กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอร์โคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวและเรซินแอตอี
ซีฟที่แตกต่างกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Shear Bond Strength Between Metal Orthodontic Brackets and Zirconia Using
Different Surface Treatments and Resin Adhesives



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

FACULTY OF DENTISTRY

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอร์โคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวและเรซินแอตชีฟที่แตกต่างกัน
โดย	น.ส.พลอยลดา วิทวัสพันธุ์
สาขาวิชา	ทันตกรรมประดิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร.อิศม์ สุรินทร์ธนาสาร

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.สุจิต พูลทอง)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.นิยม อารังค่อนันต์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร.อิศม์ สุรินทร์ธนาสาร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร.ปรารมภ์ ซาลิมี่)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.ตุลย์ ศรีอัมพร)

พลอยลดา วิทวัสพันธุ์ : กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอรโคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวและเรซินแอดฮีซีฟที่แตกต่างกัน. (Shear Bond Strength Between Metal Orthodontic Brackets and Zirconia Using Different Surface Treatments and Resin Adhesives) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ทพ. ดร.อริคม สุรินทร์ธนาสาร

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อเปรียบเทียบกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอรโคเนียที่ผ่านการปรับสภาพผิวที่แตกต่างกัน เตรียมเซอรโคเนียขนาด $8 \times 8 \times 2$ มิลลิเมตร จำนวน 12 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ชิ้น เผาซินเทอร์ นำไปฝังลงในท่อพีวีซีด้วยยิปซัมทางทันตกรรมและขัดเรียบ ผิวของเซอรโคเนียถูกปรับสภาพผิวโดยการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (S) การกรอด้วยเข็มกรอกากเพชร (G) การทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ (Z) การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ (SZ) การกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ (GZ) และกลุ่มที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวเป็นกลุ่มควบคุม จากนั้นแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งนำแบร็กเกตจัดฟันมาเชื่อมติดชิ้นงานด้วยเรซินแอดฮีซีฟทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (Transbond™ XT) กลุ่มที่สองนำแบร็กเกตจัดฟันมาเชื่อมติดชิ้นงานด้วยเรซินซีเมนต์รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (RelyX™ U200) จากนั้นแช่ไว้ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ศึกษาลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ และวิเคราะห์พื้นผิวของเซอรโคเนียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสามทาง (Three-way ANOVA) ใช้สถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และสถิติเวลช์ (Welch) เปรียบเทียบค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวแต่ละกลุ่ม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เข็มกรอกากเพชร กรอที่ผิวเซอรโคเนียช่วยเพิ่มความขรุขระที่ผิว และสามารถเพิ่มค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวเชิงกล การทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ (MDP) ให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ในทุกกลุ่ม หากไม่ได้ทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ กลุ่มที่ใช้เรซินซีเมนต์รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เรซินแอดฮีซีฟทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที อย่างมีนัยสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การปรับสภาพผิวเซอรโคเนียด้วยการกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับการทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ มีประสิทธิภาพในการเพิ่มแรงยึดของแบร็กเกตจัดฟันซึ่งอาจลดปัญหาการหลุดของแบร็กเกตขณะรักษาและเพิ่มความสำเร็จของการรักษาได้

สาขาวิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6175829132 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORD: Orthodontic Bracket, Shear Bond Strength, Zirconia

Ploylada Vitavaspan : Shear Bond Strength Between Metal Orthodontic Brackets and Zirconia Using Different Surface Treatments and Resin Adhesives. Advisor: ATIKOM SURINTANASARN, D.D.S., M.Sc., Ph.D

The purpose of this *in vitro* study was to compare shear bond strength between metal orthodontic brackets and zirconia with different surface treatments. Zirconia blocks with dimension of 8 x 8 x 2 mm were sintered. Sample size implemented was 12 groups with 10 zirconia blocks per group. The specimens were embedded in PVC cylinder using dental gypsum. The specimen surfaces were polished and randomly treated by sandblasting (S), grinding with diamond bur (G), zirconia primer (Z), sandblasting + zirconia primer (SZ), grinding with diamond bur + zirconia primer (GZ). Another group with no surface treatment served as a control. Then, the specimens were divided into 2 groups and bond to metal orthodontic bracket with either resin adhesive (Transbond™ XT) or resin cement (RelyX™ U200). Subsequently, the specimens were stored in distilled water at 37°C for 24 hours and tested for shear bond strength using universal testing machine under crosshead speed of 1 mm/min. The mode of failure was examined and categorized under stereomicroscope. Microstructure after debonding was investigated using scanning electron microscope (SEM). The data were analyzed with Three-way ANOVA, One-way ANOVA and Welch ($\alpha=0.05$). The result showed that surface treatment by grinding with diamond bur resulted in higher shear bond strength than sandblasting and control groups significantly ($p<0.05$). Zirconia primer containing MDP application increased the shear bond strength in all groups. When zirconia primer was not applied, RelyX™ U200 gave significantly higher bond strength than Transbond™ XT. In conclusion, zirconia surfaces treated by grinding with diamond bur with application of zirconia primer had increased the shear bond strength to metal bracket. This method could lessen the debonding complication and improve the success of orthodontic treatment.

Field of Study: Prosthodontics

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันและผู้มีส่วนร่วมให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ดังรายนามต่อไปนี้
อ.ทพ.ดร. อธิคม สุรินทร์ธนาสาร ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่
กรุณาให้คำปรึกษาด้วยดีมาโดยตลอด ขอบคุณทุกคำแนะนำในการศึกษา คำนคว้า วิจัย และจัดทำ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ทุกท่าน
ที่ให้คำแนะนำ ซึ่งข้อบกพร่องและแนวทางการปรับปรุงวิทยานิพนธ์

อาจารย์ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้แก่ลูก
ศิษย์คนนี้

ศูนย์วิจัยคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อสถานที่ และเจ้าหน้าที่
ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการศึกษา

บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความรักและเป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนในทุกเรื่อง
เพื่อนภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

พลอยลดา วิทวัสพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทนำ.....	1
กรอบความคิดวิจัย	3
คำถามงานวิจัย.....	3
วัตถุประสงค์.....	4
ประเภทของการวิจัย	4
สมมติฐานงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
การทบทวนวรรณกรรม.....	5
คุณลักษณะของเซอร์โคเนีย	5
คุณสมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนีย	9
การประยุกต์ใช้งานของเซอร์โคเนีย.....	10
การเชื่อมติดกับเซอร์โคเนีย.....	11
การยึดติดเชิงกล	11
การเชื่อมติดด้วยพันธะเคมี	13
การยึดติดกับแบร์กเกตจัดฟันโลหะ	17

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	18
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	20
- การเตรียมชิ้นงานเซอร์โคเนีย.....	20
- การแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามการปรับสภาพผิว.....	21
- การยึดชิ้นงาน.....	22
- การทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว.....	22
- การศึกษาลักษณะความล้มเหลว.....	25
- การวิเคราะห์ข้อมูล.....	26
ผลการวิจัย.....	27
การทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว.....	27
การศึกษาลักษณะความล้มเหลว.....	32
การอภิปรายผล.....	36
บทสรุป.....	40
บรรณานุกรม.....	41
ประวัติผู้เขียน.....	48

กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอรโคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิว และเรซินแอตชีฟที่แตกต่างกัน

บทนำ

ในปัจจุบันความสวยงามเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในงานทางทันตกรรมประดิษฐ์ การบูรณะด้วยวัสดุเซรามิกล้วน (All-ceramic restoration) จึงได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย วัสดุเซรามิกล้วนสามารถจำแนกตามองค์ประกอบของวัสดุได้สองกลุ่ม ได้แก่ เซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก (Silica-based ceramic) และเซรามิกกลุ่มพอลิคริสตัลไลน์ (Polycrystalline ceramics) โดยเซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีความสวยงาม แต่เกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อมีแรงเค้น (Stress) จึงมีการพัฒนาเซรามิกกลุ่มพอลิคริสตัลไลน์ที่ไม่มีแก้วเป็นส่วนประกอบ มีการอัดแน่นของผลึกคริสตัล เช่น เซอรโคเนีย (Zirconia) เนื่องจากคุณสมบัติของเซอรโคเนียเหมาะสมในการนำมาทำครอบฟันและยังมีสีที่สวยคล้ายกับฟันธรรมชาติ มีความแข็งแรงสูง การทนความเค้นสูง (Toughness) คงเสถียรภาพเชิงมิติ (Dimensional stability) เซอรโคเนียจึงสามารถใช้ในฟันหลังได้¹

เซอรโคเนียในสภาวะปกติมีลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการเผา โครงสร้างที่มีความแข็งแรงที่นิยมนำมาใช้ มากที่สุดคือ โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal crystal) ซึ่งโครงสร้างนี้จะทำให้เสถียรต้องเติมส่วนของอิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium oxide) เรียกเซอรโคเนียชนิดนี้ว่าวายทีซีพี (Y-TZP; yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline) อย่างไรก็ตามเซรามิกในกลุ่มเซอรโคเนียยังมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยเฉพาะการยึดติดกับวัสดุกลุ่มเรซิน ต่างจากกลุ่มเซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่สามารถยึดติดกับเรซินได้ง่ายกว่าและมีค่าการยึดติดที่แข็งแรงกว่า² จึงมีการพัฒนาการปรับสภาพผิวเซอรโคเนียก่อนการยึด เช่น การกรอผิว (Grinding) การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Sandblasting) การทำไตรโบเคมีคอลด้วยซิลิกา (Tribochemical silica coating) การใช้กรดกัด (Acid etching) และการสารปรับปรุผิวเซอรโคเนียไพรมเมอร์ (Zirconia primer)³ ครอบฟันเซรามิกล้วนประเภทที่มีแก้วเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้การกัดด้วยกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid) เนื่องจากช่วยเพิ่มการยึดติดระดับจุลภาค (Micromechanical retention) เพิ่มพื้นที่การยึดติด (Bonding area) แต่การใช้กรดกัดแก้วไม่สามารถใช้กัดเซอรโคเนียได้เนื่องจากในเซอรโคเนียมีองค์ประกอบที่เป็นแก้วน้อยกว่าร้อยละ 1⁴ ในทางกลับกัน พบว่าการกรอผิวเซอรโคเนียทำให้เกิดความหยาบที่สุดและช่วยเพิ่มการยึดติด (Bond

strength)⁵ แต่การกร่อนนำไปสู่การเกิดรอยร้าวเล็ก (Microcrack)⁶ วิธีที่แนะนำคือการพ่นผง อะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มพื้นที่การยึดติดและเพิ่มค่าแรงยึดติด^{7, 8}

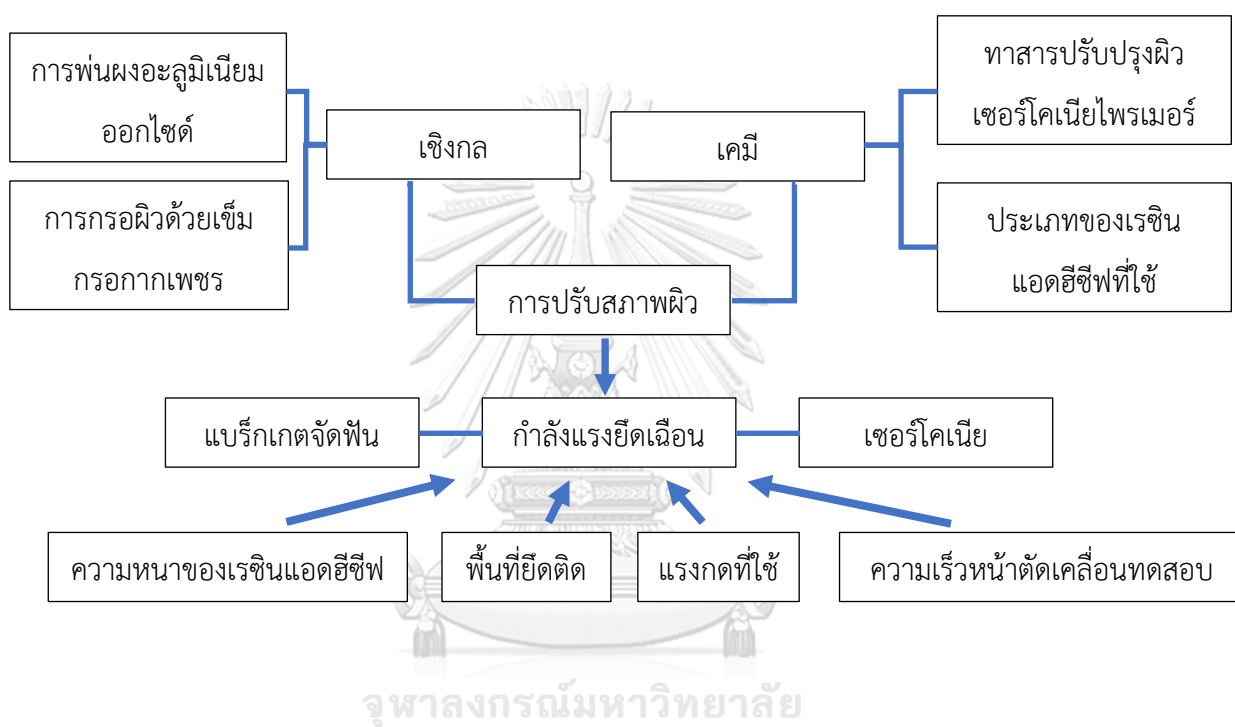
เนื่องจากการปรับสภาพผิวเชิงกลมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเซอโรโคเนีย จึงมีการพัฒนาการยึดติดกับเซอโรโคเนียด้วยพันธะเคมี สารสำคัญการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนียคือ สารเทินเอ็มดีพี (10-MDP; 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate) เนื่องจากออร์แกโนฟอสเฟตโมโนเมอร์ (Organo-phosphate monomer) มีประสิทธิภาพในการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนีย³ จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของหมู่ฟอสเฟตต่อการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนีย เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างออกซิเจนอะตอม (P-O-Zr) มีการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงของการยึดติดเซอโรโคเนียระหว่างสารยึดติดที่มีส่วนประกอบหลักคือเทินเอ็มดีพี และบิสจีเอ็มเอ (BisGMA; bisphenol-A-diglycidylmethacrylate) พบว่าสารประกอบเทินเอ็มดีพี ยึดได้แข็งแรงกว่าและยาวนานกว่า และดียิ่งขึ้นหากใช้การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ตามด้วยสารเทินเอ็มดีพี⁹

การยึดแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับฟันหรือครอบฟันเป็นผลมาจากการยึดเชิงกลมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การควบคุมความชื้นในช่องปากขณะติดแบร็กเกตจัดฟันโลหะเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง หากควบคุมได้ไม่ดีอาจทำให้ส่งผลต่อการยึดติด ทำให้การยึดติดแยกลง ในขณะที่เรซินแอตชีฟที่นิยมใช้ในทางจัดฟันต้องอาศัยการทำงานหลายขั้นตอน และเนื้อฟันต้องแห้งเพื่อการยึดติดที่ดี ในขณะที่เรซินซีเมนระบบเซลฟ์แอตชีฟ (Self-adhesive system) เป็นระบบที่ไม่ต้องทำการปรับสภาพผิวฟันก่อนการยึดขึ้นงาน ช่วยลดการเกิดข้อผิดพลาดขณะใช้งาน และใช้งานง่าย มีความนิยมน้อยมากในทางทันตกรรมประดิษฐ์ สามารถใช้ยึดครอบฟันโลหะ ครอบฟันเซรามิก และเนื้อฟันได้เช่นกัน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

เนื่องจากการยึดติดระหว่างเซอโรโคเนียกับเรซินแอตชีฟยังมีข้อจำกัด การบูรณะฟันด้วยวัสดุเซอโรโคเนียในผู้ป่วยที่มีการจัดฟันภายหลังการบูรณะยังขาดการยึดติดที่ดีระหว่างเซอโรโคเนียและแบร็กเกตจัดฟันโลหะ ความแข็งแรงของการยึดติดมีผลต่อความเที่ยงตรงต่อการกำหนดตำแหน่งฟันระยะเวลาการจัดฟัน การยึดติดที่ดีต้องสามารถทนสภาพแวดล้อมในช่องปาก รวมถึงแรงที่มากกระทำ¹⁰ การยึดติดที่ไม่ดีมีผลโดยตรงต่อการรักษา ทำให้การรักษาล่าช้า เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่ออ่อนและเนื้อเยื่อแข็ง เสี่ยงต่อเครื่องมือหลุดลงคอ¹¹ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาการรักษาเพิ่มมากขึ้น การศึกษานี้จึงมีขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอโรโคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวที่แตกต่างกัน ทั้งการปรับสภาพผิวเชิงกลและการใช้สารปรับสภาพผิวทางเคมี จึง

เป็นที่มาของสมมติฐานงานวิจัยคือ การปรับสภาพผิวเซอร์โคเนียไม่มีผลต่อกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซอร์โคเนียและแบร็กเกตจัดฟันโลหะ

กรอบความคิดวิจัย



คำถามงานวิจัย

การปรับสภาพผิวเซอร์โคเนียและการใช้เรซินแอดฮีซีฟที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซอร์โคเนียและแบร็กเกตจัดฟันโลหะหรือไม่

P: เซอร์โคเนียชนิดวายทีซีพี

I: การปรับสภาพผิวเซอร์โคเนียและการใช้เรซินแอดฮีซีฟที่แตกต่างกัน

C: เซอร์โคเนียที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว

O: กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซอร์โคเนียและแบร็กเกตจัดฟันโลหะ

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอร์โคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวที่แตกต่างกัน

ประเภทของการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลอง

สมมติฐานงานวิจัย

H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอร์โคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวและเรซินแอตฮีซีฟที่แตกต่างกัน

H_a : มีความแตกต่างระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเซอร์โคเนียที่ใช้การปรับสภาพผิวและเรซินแอตฮีซีฟที่แตกต่างกัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแบร็กเกตจัดฟันกับเซอร์โคเนียภายใต้การปรับสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการปรับใช้ในทางคลินิกต่อไป

การทบทวนวรรณกรรม

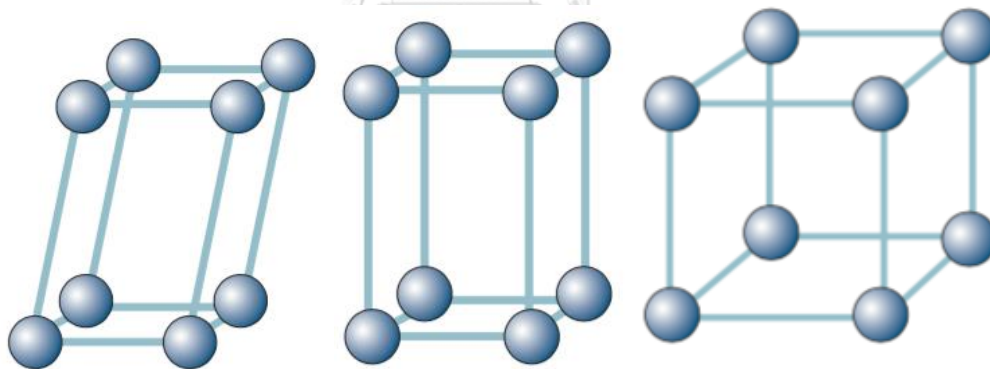
วัสดุเซรามิกล้วนสามารถจำแนกตามองค์ประกอบของวัสดุได้สองกลุ่ม ได้แก่ เซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและเซรามิกกลุ่มพอลิคริสตัลลีน โดยเซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักมีสามชนิด ได้แก่ เซรามิกชนิดเฟลสปาทิก (Feldspathic ceramic) นิยมใช้บริเวณที่มีความสวยงาม เช่น ใช้เป็นเซรามิกวีเนียร์ (Ceramic veneer) เนื่องจากมีความโปร่งแสงและมีความแข็งแรงต่ำ¹² กลาสเซรามิกชนิดเสริมความแข็งแรงด้วยลูไซต์ (Leucite reinforced glass ceramic) มีการเติมผลึกลูไซต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง สามารถใช้ทำอินเลย์ (Inlay) ออนเลย์ (Onlay) และครอบฟันหน้า¹³ ชนิดที่สามคือกลาสเซรามิก ชนิดลิเทียมไดซิลิเกต (Lithium disilicate based ceramic) สามารถใช้ทำครอบฟันหลังหรือสะพานฟันหน้าได้ เซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีความสวยงาม เกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อมีแรงเค้น (Stress) จึงมีการพัฒนาเซรามิกกลุ่มพอลิคริสตัลลีนที่ไม่มีแก้วเป็นส่วนประกอบ มีการอัดแน่นของผลึกคริสตัล เช่น เซรามิกที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Zirconia-based ceramic) เซอร์โคเนียถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1970 และมีความนิยมเพิ่มขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติที่มีความสวยงาม มีคุณสมบัติเชิงกลและทางเคมีที่ดี สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ (Biocompatibility) มีความคงทนของสี (Long-term color stability) ต้านทานต่อการสึก (Wear resistance) นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรง⁵ เนื่องจากเซอร์โคเนียมีผลึกที่เสถียรมาก มีความทนทานต่อการใช้งาน มีอายุการใช้งานมากกว่าเซรามิกชนิดที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ สามารถนำมาใช้งานในครอบฟันหลัง สะพานฟัน หรืองานรากเทียมได้¹ โมโนลิธิคเซอร์โคเนีย (Monolithic zirconia) มีความนิยมในการใช้งานมากขึ้นเนื่องจากมีอัตราการแตกหัก (Chipping) น้อยกว่ากลุ่มเซรามิกวีเนียร์ (Ceramic veneer) ที่มีเซอร์โคเนียเป็นแกนกลาง¹⁴

คุณลักษณะของเซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนีย (Zirconium dioxide or ZrO_2) มีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน เช่น การทนความเค้นสูง (Toughness) มีความแข็งแรงสูง (Strength) และความต้านทานความล้าสูง (Fatigue resistance) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี เนื่องด้วยคุณสมบัติเหล่านี้และมีความสวยงามมากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มครอบฟันเซรามิกที่มีโลหะเป็นโครงสร้างภายใน (Porcelain Fused to Metal Crown) วัสดุกลุ่มนี้จึงเป็นที่นิยมในทางทันตกรรมประดิษฐ์^{15, 16} เซอร์โคเนียจัดเป็นสารประกอบระหว่างออกไซด์ (Oxide) และเซอร์โคเนียม (Zirconium) รวมตัวกัน ไม่ละลายน้ำ ไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์และยากต่อการเกาะของแบคทีเรีย^{17, 18} นอกจากนี้ยังมีลักษณะที่รังสี (Radioplaque) ป้องกันการผุกร่อน (Corrosion)¹⁹

เซอร์โคเนียในสภาวะปกติมีลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการเผา โครงสร้างที่มีความแข็งแรงที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือ โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal crystal) ซึ่งโครงสร้างนี้จะทำให้เสถียรต้องเติมส่วนของอิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium oxide) เรียก เซอร์โคเนียชนิดนี้ว่าวายทีซีพี (Y-TZP; yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline) เซอร์โคเนียจัดเป็นวัสดุพหุสัณฐาน (Polymorphic) มีรูปแบบผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิการเผา¹⁵ ได้แก่ (รูปที่ 1)

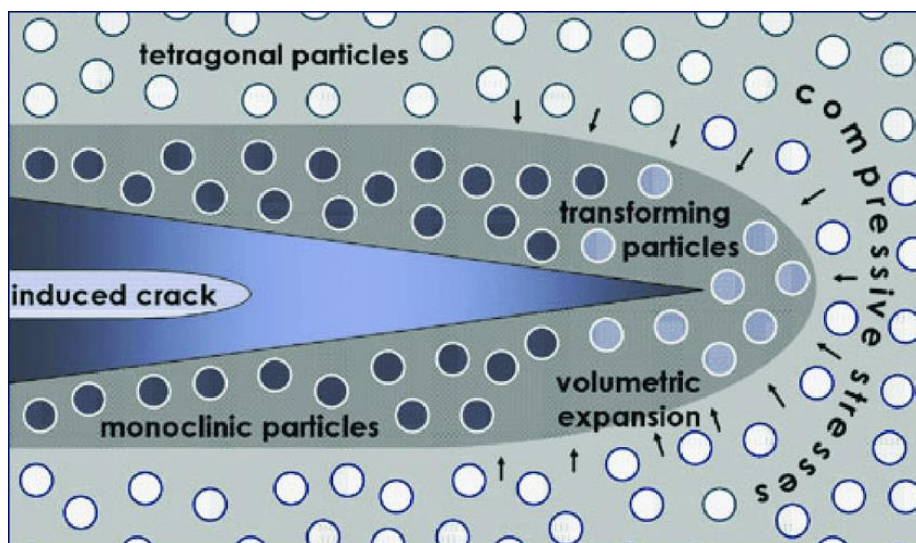
1. ผลึกรูปร่างโมนอคลินิก (Monoclinic crystal) ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1,170 องศาเซลเซียส
2. ผลึกรูปร่างเตตระโกนอล (Tetragonal crystal) ที่อุณหภูมิ 1,170 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 2,370 องศาเซลเซียส
3. ผลึกรูปร่างคิวบิก (Cubic crystal) ที่อุณหภูมิ 2,370 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 2,680 องศาเซลเซียส ถึงจุดหลอมละลาย



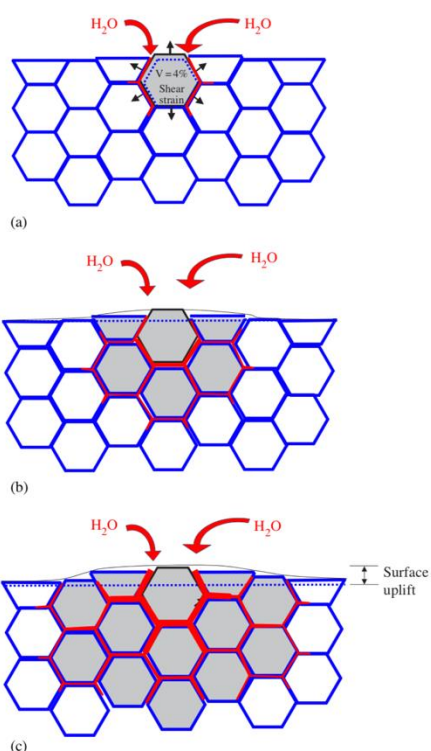
รูปที่ 1 รูปแบบผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ผลึกรูปร่างโมนอคลินิก (ซ้าย) ผลึกรูปร่างเตตระโกนอล (กลาง) ผลึกรูปร่างคิวบิก (ขวา)

โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Phase transformation) ทำให้เกิดความเค้นแรงอัดที่สูงภายในโครงสร้างของวัสดุ (Compressive stresses) นำพาไปสู่การเกิดการแตกร้าวของวัสดุ จึงต้องอาศัยการเติมสารประกอบเช่น ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide) อิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium oxide) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) และแคลเซียมออกไซด์

(Calcium oxide) เพื่อคงลักษณะผลึกแบบเตตระโกนอนอลที่มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิห้อง สารที่นิยมใช้มากที่สุดในการทันตกรรมคือสารอิตเทรียมออกไซด์ เรียกเซอร์โคเนียชนิดนี้ว่าวายทีซีพี (Y-TZP; Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystalline) ขณะที่อุณหภูมิลดลงเซอร์โคเนียมีความคงตัวมากขึ้น ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นผลึกรูปร่างโมโนคลินิก มีการศึกษาพบว่าเมื่อได้รับความเครียดจากภายนอก เช่น การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Sandblasting) การกรอแต่ง (Grinding) ขึ้นงานอยู่ในสภาวะเปียก (Wet environment) และการรับแรงบดเคี้ยว (Cyclic fatigue from chewing) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากเตตระโกนอนอลย้อนกลับไปเป็นโมโนคลินิก มีผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเสื่อมสภาพลง (Strength degradation) และการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโดยรวม ประมาณร้อยละ 3 ถึง 5 นำไปสู่การอัดแน่นภายใน เกิดการอุดรอยร้าว ลดการขยายของรอยแตก เรียกว่ากระบวนการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปร่าง (Transformation toughening) (รูปที่ 2) ซึ่งทำให้เซอร์โคเนียมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น^{20, 21} มีค่าความทนแรงดัด (Flexural strength) มีค่าอยู่ที่ 900 เมกะปาสคาลถึง 1.2 จิกะปาสคาล และค่าความทนทานการแตกหัก (Fracture toughness) ตั้งแต่ 7 เมกะปาสคาลถึง 8 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้องการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากเตตระโกนอนอลย้อนกลับไปเป็นโมโนคลินิกเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเดียว แต่เมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ผลึกรูปร่างโมโนคลินิกจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกรูปร่างเตตระโกนอนอล แต่จะเกิดการสูญเสียการอัดแน่นภายในส่งผลให้ค่าความทนทานการแตกหักลดลง อย่างไรก็ตาม วายทีซีพีสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากเตตระโกนอนอลย้อนกลับไปเป็นโมโนคลินิกในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำภายใต้ความชื้น เรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า เซอร์โคเนียมีการเสื่อมสลายที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Degradation, LTD)²² การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นรูปแบบโมโนคลินิกนำมาสู่การเกิดรอยร้าวเล็ก (Microcrack) และผิวที่ขรุขระของเซอร์โคเนีย²³ (รูปที่ 3)



รูปที่ 2 กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปร่างของเซอร์โคเนียชนิดวายที่ซีพี



รูปที่ 3 ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำภายใต้ความชื้น (a) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเซอร์โคเนียจากเตตระโกนอลย้อนกลับเป็นโมนอกlinik (โมเลกุลสีเทา) ส่งผลให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น การเกิดซึมของน้ำเข้าไปในโครงสร้างผลึกเซอร์โคเนีย (สีแดง) ในมุมตัดขวาง (b) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นรูปแบบโมนอกlinik นำมาสู่การเกิดรอยร้าวเล็กและสร้างความเครียดไปยังโมกุลข้างเคียง (c) การเพิ่มขึ้นของผลิกรูปร่างโมนอกlinik ส่งผลให้เกิดรอยร้าวเล็กเพิ่มขึ้นและพื้นผิวที่ไม่เรียบ

คุณสมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนีย

คุณสมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนียมีค่าสูงกว่าเซรามิกอื่นๆ ที่ใช้ในทางทันตกรรม คุณสมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนียชนิดวางยี่ห้อที่ซีพีแสดงในตารางที่ 1^{15, 16, 24} ค่าเฉลี่ยของค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (Load-bearing capacity) ของเซอร์โคเนียอยู่ที่ 755 นิวตัน ซึ่งมีค่ามากกว่ากลาสเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต (Lithium disilicate based ceramic)²⁵⁻²⁷ มีงานวิจัยในห้องทดลองกล่าวว่า เซอร์โคเนียทนต่อการแตกหักได้มีค่าตั้งแต่ 379 เมกะปาสคาลและ 501 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงบิดเคี้ยวของมนุษย์²⁸

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนีย

คุณสมบัติเชิงกล	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น (Density)	6.05 g/cm ³
ความแข็งผิว (Hardness)	1200 HV
ความทนแรงอัด (Compressive strength)	2000 MPa
ความทนแรงดัด (Flexural strength)	900 MPa
ความทนทานการแตกหัก (Fracture toughness)	7 MPa
มอดุลัสของยัง (Young's modulus)	210 GPa
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient)	11×10 ⁻⁶ 1/K

การประยุกต์ใช้งานของเซอร์โคเนีย

เซรามิกที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Zirconia-based ceramic) เนื่องจากเซอร์โคเนียมีผลึกที่เสถียรมาก มีความทนทานต่อการใช้งาน มีอายุการใช้งานมากกว่าเซรามิกชนิดที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ สามารถนำมาใช้งานในครอบฟันหลัง สะพานฟัน หรืองานรากเทียมได้¹ โมโนลิธิคเซอร์โคเนีย (Monolithic zirconia) มีความนิยมในการใช้งานมากขึ้นเนื่องจากมีอัตราการแตกหัก (Chipping) น้อยกว่ากลุ่มเซรามิกวีเนียร์ (Ceramic veneer) ที่มีเซอร์โคเนียเป็นแกนกลาง¹⁴ เซอร์โคเนียในทางทันตกรรมใช้การขึ้นรูปโดยการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิต หรือ CAD-CAM (Computer-aided design and computer-aided manufacturing) โดยวิธีการขึ้นรูปแบบแรกคือการกลึงเซอร์โคเนียที่เผาซินเทอร์ (Fully-sintered zirconia) วิธีการนี้จะทำให้เซอร์โคเนียไม่เกิดการหดตัวขณะเปลี่ยนรูปร่างผลึก แต่จะทำให้เกิดการสึกที่หัวกลึงได้ง่าย²⁹ อีกวิธีที่เลือกใช้ได้คือการกลึงเซอร์โคเนียก่อนการเผาซินเทอร์ (Pre-sintered zirconia) เมื่อนำไปเผาซินเทอร์จะพบการหดตัวของโครงสร้างร้อยละ 20 ถึง 30 จึงต้องมีการชดเชยการหดตัวของเซอร์โคเนียในขั้นตอนการออกแบบ¹⁵ โดยสองวิธีนี้สามารถใช้ได้ในทางทันตกรรม คุณสมบัติที่ดีของเซอร์โคเนียอีกประการคือมีสีขาวและทึบแสง สามารถช่วยปิดสีได้³⁰ โดยในปัจจุบันเซอร์โคเนียนิยมนำมาใช้งานในรูปแบบของโมโนลิธิคเซอร์โคเนียเนื่องจากมีอัตราการแตกหัก (Chipping) น้อยกว่ากลุ่มเซรามิกวีเนียร์ (Ceramic veneer) ที่มีเซอร์โคเนียเป็นแกนกลาง¹⁴ จากงานวิจัยพบการแตกหักของพอร์ซเลนที่บริเวณพอร์ซเลนวีเนียร์ที่มีเซอร์โคเนียเป็นแกนกลางร้อยละ 6 ถึงร้อยละ 25 หลังจากการใช้งานสามปีซึ่งมีร้อยละที่มากกว่าการแตกหักระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะในครอบฟันชนิดพอร์ซเลนที่เชื่อมยึดกับโลหะ (Porcelain fused to metal crown)^{14, 31} ทำให้โมโนลิธิคเซอร์โคเนียมีค่าความแข็งแรงและค่าการต้านทานการแตกหักมากกว่า เนื่องจากผิวเคลือบพอร์ซเลน (Veneering porcelain) ไม่สามารถเกิดการยึดติดด้วยพันธะทางเคมีกับเซอร์โคเนียได้ แต่วัสดุทั้งสองชนิดสามารถยึดติดกันได้เนื่องจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่เหมาะสม (Coefficient Thermal Expansion, CTE) ในลักษณะเดียวกับการยึดติดของผิวเคลือบพอร์ซเลนกับโลหะในครอบฟันชนิดพอร์ซเลนที่เชื่อมติดกับโลหะแกนกลาง ซึ่งการแตกหักลักษณะนี้พบได้บ่อยที่สุด³² เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของคุณสมบัติระหว่างเซอร์โคเนียและพอร์ซเลนในหลายปัจจัยเช่น ความทนทานการแตกหัก ความทนแรงดัด ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic modulus)^{33, 34}

การเชื่อมติดกับเซอรโคเนีย

มีการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการยึดอยู่ทางคลินิกของครอบฟันเซรามิก และการซ่อมครอบฟันเซรามิกที่แตกหักขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการยึดอยู่และความคงทนของการยึดอยู่ อย่างไรก็ตามเซรามิกในกลุ่มเซอรโคเนียยังมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยเฉพาะการยึดติดกับวัสดุกลุ่มเรซิน ต่างจากกลุ่มเซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่สามารถยึดติดกับเรซินได้ง่ายกว่าและมีค่าการยึดติดที่แข็งแรงกว่า² การยึดติดกับวัสดุกลุ่มเรซินมีความสำคัญเนื่องจากการยึดติดที่ดีจะส่งผลต่อการยึดอยู่ของชิ้นงาน ป้องกันการร้าวซึม และมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยจากงานวิจัยต่าง ๆ กล่าวว่า การยึดติดที่ดีเกิดขึ้นจากการยึดติดเชิงกลในระดับไมครอนและการเชื่อมติดด้วยพันธะเคมี โดยผิวของเซอรโคเนียจะติดแน่นกับวัสดุเรซินด้วยปัจจัยทั้งสองคือ การยึดติดเชิงกลจากการทำให้ผิวเกิดความขรุขระ หรือการเชื่อมติดด้วยพันธะเคมี³⁵

การยึดติดเชิงกล

การยึดติดเชิงกลจากการทำให้ผิวเกิดความขรุขระ ทำได้สามวิธี คือ การกัดด้วยกรด การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และการกรอผิว โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้ การกัดด้วยกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid) ในเซรามิกที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ภายในมีเมทริกซ์ที่เป็นแก้ว (Glassy matrix) เมื่อผิวสัมผัสกับกรดกัดแก้ว กรดจะทำปฏิกิริยากับส่วนเมทริกซ์ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ เกิดเป็นสารประกอบเฮกซะฟลูออโรซิลิเกต (Hexafluorosilicate) ทำให้ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ถูกกำจัดออกเหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึกทำให้เกิดผิวขรุขระ เพิ่มการยึดติดเชิงกลได้ เซอรโคเนียเป็นสารที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์จึงไม่สามารถใช้กรดกัดแก้วทำให้ผิวขรุขระเพื่อเพิ่มการยึดติดเชิงกลได้รวมถึงไม่ช่วยเพิ่มค่ากำลังแรงยึด^{5, 36} มีการศึกษาของศรีอัมพรและคณะกล่าวว่ากรดกัดแก้วที่ความเข้มข้นสูงและใช้ระยะเวลากัดกร่อนที่ผิวเซอรโคเนียนานกว่าปกติจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระดับจุลภาค³⁷ มีงานวิจัยของ Casucci และคณะกล่าวว่าการใช้กรดกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะทำให้ผิวของเซอรโคเนียหยาบขึ้นและเพิ่มกำลังแรงยึดติดได้³⁸ เนื่องจากข้อจำกัดเหล่านี้ การใช้กรดกัดแก้วจึงมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำมาใช้ในทางคลินิกได้ อีกวิธีหนึ่งคือการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ วิธีเป็นการทำความสะอาดผิวของเซอรโคเนีย และเพิ่มพลังงานผิวของเซอรโคเนีย ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความขรุขระผิวของเซอรโคเนียมีดังนี้ ขนาดของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่นำมาใช้พ่นชิ้นงานเซอรโคเนียมีหลากหลายขนาดตั้งแต่ 50 ถึง 125 ไมครอน แรงดันที่ใช้ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.45 เมกะปาสคาล ระยะห่างที่ 5 ถึง 15 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ 5 ถึง 30 นาที³⁹ มีการศึกษาพบว่า การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์สามารถสร้างความขรุขระที่ผิวของเซอร

โคเนียและช่วยเพิ่มค่าแรงยึดกับเรซินซีเมนต์เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์⁴⁰ ในขณะที่เดียวกันมีการศึกษาพบว่าการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาดที่แตกต่างกัน ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลของเซอร์โคเนียเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากเตตระโกนอล เปลี่ยนไปเป็นโมโนคลินิก เกิดกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปร่าง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นด้วย²⁰ ขนาดของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่แนะนำคือ 50 ไมครอน ที่แรงดัน 0.25 เมกะปาสคาล ทำให้ผิวของเซอร์โคเนียเกิดความขรุขระและอุดรอยร้าว ไม่ทำให้เกิดรอยร้าวต่อ⁴¹ หลายงานวิจัยรายงานว่าการกรอผิวด้วยเข็มกรอกากเพชรแบบหยาบทำให้เกิดความขรุขระบนผิวเซอร์โคเนียส่งผลให้ค่าแรงยึดติดสูงขึ้น⁴² เนื่องจากผิวของเซอร์โคเนียมีความแข็ง หัวกรอที่ใช้จึงต้องใช้หัวกรอเพชรที่มีความหยาบตั้งแต่ 120 ถึง 200 ไมครอน⁴³ แต่การกรอผิวเซอร์โคเนียนำไปสู่การเกิดรอยร้าวเล็ก (Microcrack) ที่ผิวของเซอร์โคเนียและมีผลต่อความแข็งแรงเชิงกล มีการศึกษาว่าการใช้หัวกรอเพชรความหยาบขนาด 91 ไมครอน สร้างความขรุขระที่ผิวของเซอร์โคเนียโดยไม่มีผลต่อค่าความทนแรงดัด (Flexural strength) ของเซอร์โคเนีย⁴⁴ หลายงานวิจัยกล่าวว่า การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยซิลิกา (Silica coating) จะทำให้ค่าความหยาบพื้นผิวมากกว่า (Surface roughness) และมีการเกาะของซิลิกาบนพื้นผิวของเซอร์โคเนียเพิ่มขึ้นร้อยละ 76 จึงสามารถใช้ร่วมกับสารประกอบไซเลน (Silane coupling agents) เพื่อเพิ่มกำลังแรงยึดติดได้^{7, 8} เช่น Rocatec and Cojet ของบริษัทสามเอ็ม อีเอสพีไอ ได้นำมาใช้ในการสร้างชั้นซิลิกาในครอบฟันโลหะและเซรามิก เนื่องจากการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยซิลิกาด้วยความเร็วสูง ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยซิลิกาจะฝังเข้าไปในเนื้อเซรามิกหรือเนื้อเหล็กได้ถึง 15 ไมครอน เรียกวิธีนี้ว่าการทำไตรโบเคมีคอลด้วยซิลิกา (Tribochemical silica coating) ซึ่งเป็นการทำงานโดยกระบวนการเชิงกลและทางเคมีร่วมกัน โดยเป็นการสร้างความขรุขระที่พื้นผิวโดยผงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยซิลิกาเกิดเป็นความขรุขระที่พื้นผิวระดับไมครอน หลังจากนั้นซิลิกาที่เคลือบอยู่จะเกาะติดบนพื้นผิว ทำให้สามารถยึดติดกับเรซินแอตตีซีฟทางเคมีได้ด้วย การทาสารประกอบไซเลน¹⁶

การเชื่อมติดด้วยพันธะเคมี

เรซินแอตตีซีฟถูกพัฒนา มาตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1950 ซึ่งเป็นเรซินที่ไม่ใส่วัสดุอัดแทรก (Filler) เรซินแอตตีซีฟชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการเชื่อมติดระหว่างเรซินแอตตีซีฟและฟันยังมีข้อจำกัดซึ่งเกิดจากการหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization shrinkage) คุณสมบัติของเรซินแอตตีซีฟที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สูง (Coefficient thermal expansion, CTE) และค่าการดูดซึมน้ำที่สูง (Water absorption) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการรั่วซึมระดับจุลภาค (Microleakage)⁴⁵ ปัจจัยที่พึงมีที่สำคัญอีกอย่างคือการละลายตัว (Solubility) เรซินแอตตีซีฟที่ดีต้องมีการละลายตัวที่ต่ำ ร่วมกับคุณสมบัติเติมเต็มช่องว่างระหว่างตัวฟันและวัสดุด้วยร่างแหพอลิเมอร์เมทริกซ์ เรซินแอตตีซีฟจึงช่วยในการลดแรงที่มากกระทำต่อฟัน ช่วยดูดซับแรงและลดการเกิดรอยร้าวจุลภาคภายในผิวของครอบฟันเซรามิก⁴⁶ หลังจากนั้นคุณสมบัติของเรซินแอตตีซีฟถูกพัฒนา มาเรื่อยๆ โดยเป็นที่นิยมในปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติที่ดี เช่น มีความต้านทานแรงอัดที่สูง (Compressive strength) ความทนต่อแรงดึงสูง (Tensile Strength) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (Elastic modulus)⁴⁷ เรซินแอตตีซีฟสามารถแบ่งได้ตามองค์ประกอบและประเภทของการเชื่อมติด ดังนี้

แบ่งตามองค์ประกอบหลัก

- อะคริลิกเรซินซีเมนต์ (Acrylic resin cement)

โดยอะคริลิกเรซินซีเมนต์มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น สารเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผงกับของเหลว โดยส่วนผงประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตหรือโคพอลิเมอร์ และมีสารเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) คือสารเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) นอกจากสารเหล่านี้ยังพบวัสดุอัดแทรกธรรมชาติและสารสี (Pigments) โดยส่วยของเหลวจะประกอบไปด้วย สารเมทิลเมทาคริเลต และสารเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อนุภาคส่วนผงจะถูกทำลายและทำให้นิ่มลงโดยส่วนที่เป็นของเหลวเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกไซด์เอมีน (Peroxide-amine interaction) ปัจจุบันซีเมนต์กลุ่มนี้มีการเติมสารโพรเมทาคริลอกซีเอทิลไตรเมลิเทตแอนไฮไดรด์ (4-Methoxy Ethyl Trimellitic Anhydride, 4-META) ส่งผลให้สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับองค์ประกอบของฟัน ทำให้สามารถเพิ่มแรงการยึดอยู่ให้มากขึ้น นิยมใช้ในครอบฟันประเภทโลหะ⁴⁸ การบ่มตัวของอะคริลิกเรซินซีเมนต์จะเป็นแบบบ่มเอง (Self-curing) เท่านั้น

- ไดมทาคริเลตซีเมนต์ (Dimethacrylate cement)

โดยไดเมทาคริเลตซีเมนต์มีองค์ประกอบพื้นฐานใกล้เคียงกับวัสดุบูรณะฟันชนิดเรซินคอมโพสิต กล่าวคือ ประกอบด้วยส่วนเรซินเมทริกซ์ วัสดุอัดแทรกและสารค้ำค้ำ โดยโมโนเมอร์หลักที่ใช้คือ บิสฟีเอเอ็มเอ (Bisphenol A glycidyl methacrylate, Bis-GMA) และอาจมีส่วนประกอบของโมโนเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ตรีเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (Triethylene glycol dimethacrylate, TEGDMA) เพื่อลดความหนืด ในส่วนของวัสดุอัดแทรกอาจเป็นได้ทั้งสารซิลิกาคอลลอยด์ แก้วแบบเรียบ และแก้วเซอร์โคเนีย ซึ่งวัสดุอัดแทรกที่ต่างชนิดกันรวมถึงปริมาณวัสดุอัดแทรกที่ใช้ มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของวัสดุที่แตกต่างกัน

ซีเมนต์กลุ่มนี้มีทั้งแบบการบ่มเองด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically cured or auto cured) นิยมใช้กับครอบฟันเหล็กหรือครอบฟันที่มีลักษณะทึบ แสงส่องผ่านได้ยาก แบบที่สองคือการบ่มตัวด้วยแสง (Light curing) โดยมีสารแคมฟอร์ควิโนน (Camphorquinone) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง มักนิยมใช้กับฟอร์ซเลนวีเนียร์ และแบบบ่มตัวร่วมคือมีการบ่มตัวด้วยแสงร่วมกับการบ่มเองด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ซีเมนต์ชนิดนี้จะเริ่มจากการบ่มตัวด้วยแสงต่อเนื่องด้วยการบ่มเองด้วยปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งซีเมนต์แบบบ่มตัวร่วมนั้นช่วยให้มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ที่เพียงพอ ในกรณีที่ชิ้นงานมีความทึบแสงหรือฟอร์ซเลนมีความหนาแน่นมากกว่า 2.5 มิลลิเมตรหรือบริเวณด้านประชิดที่แสงเข้าไม่ถึง

แบ่งตามการเตรียมผิวฟัน

- ระบบเอ็ทซ์แอนด์รินซ์ (Etch-and-rinse system)

โดยระบบเอ็ทซ์แอนด์รินซ์หรือระบบโททอลเอ็ทซ์ ต้องใช้กัดปรับสภาพผิวฟัน ซึ่งกรดที่ใช้ อาจจะเป็นกรอฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 37 จากนั้นล้างออกด้วยน้ำเพื่อกำจัดชั้นสเมียร์ (Smear layer) และสเมียร์พ러그 (Smear plug) อุดปิดท่อเนื้อฟันอยู่ จากนั้นเป่าลม แต่สำหรับเนื้อฟันจะทำให้เกิดการละลายออกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) เกิดการเผยผิของคอลลาเจน⁴⁹ จากนั้นทาสารไพรเมอร์ซึ่งสารนี้จะประกอบไปด้วยโมโนเมอร์แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่าง เส้นใยคอลลาเจน (Interfibrillar space) และท่อเนื้อฟัน (Dentinal tubules) ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นไฮบริด (Hybrid layer) และสายเรซิน (Resin tags) ขึ้นภายในท่อเนื้อฟันเกิดการยึดติดระดับจุลภาค (Micromechanical retention) และทาสารยึดติด นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการยึดสองขั้นตอน (Two step adhesives) โดยการนำเอาสารไพรเมอร์รวมกับสารยึดติดไว้ด้วยกัน จากนั้นยึดชิ้นงานด้วยซีเมนต์ จะพบว่าระบบเอ็ทซ์แอนด์รินซ์หรือระบบโททอลเอ็ทซ์นี้มีขั้นตอนการใช้งานที่ยุงยากและ

อาจเกิดความผิดพลาดทางเทคนิคได้ง่าย แต่ข้อดีคือให้ค่าแรงยึดที่สูง⁵⁰ ตัวอย่างเรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้ เช่น วารีโอลิงค์ทู (Variolink II, Ivoclar Vivadent; Schaan, Lichtenstein) เน็กซ์ (Nexus, Kerr; Orange, CA) เป็นต้น

- ระบบเซลฟ์เอทซ์ (Self-etching system)

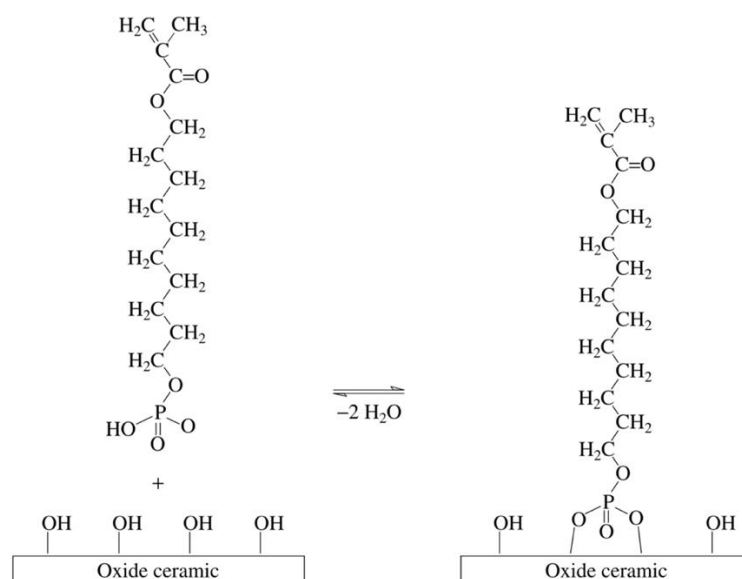
โดยระบบเซลฟ์เอทซ์ต้องมีการปรับสภาพผิวฟันด้วยสารไพรเมอร์ที่เป็นกรดแล้วทาสารยึด ซึ่งในที่นี้อาจแยกขั้นตอนหรือรวมเป็นขั้นตอนเดียวก็ได้ จากนั้นเป่าลมแล้วยึดชิ้นงานด้วยเรซินซีเมนต์ การยึดด้วยระบบนี้มีการลดขั้นตอนการปรับสภาพผิวฟันด้วยกรดแล้วล้างน้ำออกไป ทำให้การใช้งานง่ายขึ้น ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการใช้กรดกัดผิวฟันได้ และจากงานวิจัยพบว่าระบบนี้มีโอกาสเกิดอาการเสียวฟันหลังจากยึดน้อยกว่าระบบระบบเอทซ์แอนดรีนซ์ แต่ประสิทธิภาพในการเตรียมผิวฟันในผิวเคลือบฟันอาจไม่ดีเท่าระบบระบบเอทซ์แอนดรีนซ์⁵⁰ ตัวอย่างเรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้ เช่น พานาเวียเอฟ 2.0 (Panavia F2.0, Kuraray Medical; Tokyo, Japan) มัลติลิงค์ (Multilink, Ivoclar Vivadent; Schaan, Lichtenstein) เป็นต้น

- ระบบเซลฟ์แอดฮีซีฟ (Self-adhesive system)

โดยระบบเซลฟ์แอดฮีซีฟ เป็นเรซินซีเมนต์กลุ่มที่ไม่ต้องทำการปรับสภาพผิวฟันก่อนการยึดชิ้นงาน ในปีคริสต์ศักราช 2002 เซลฟ์แอดฮีซีฟเรซินซีเมนต์ ได้ถูกแนะนำขึ้นในฐานะเรซินซีเมนต์กลุ่มใหม่และเป็นที่ยอมรับอย่างรวดเร็ว เรซินซีเมนต์กลุ่มนี้มีองค์ประกอบแบ่งเป็นสองส่วน การใช้งานคือนำสองส่วนมาผสมกัน มีทั้งแบบผงกับน้ำในแคปซูล (Capsule) ซึ่งต้องทำการปั่นเพื่อผสมโดยเครื่องผสมก่อนการใช้งาน อีกรูปแบบหนึ่งคือเป็นเพสต์ (Paste) สองส่วนแยกกัน ซึ่งมีทั้งแบบผสมด้วยมือ (Hand mix) และแบบปลายผสมอัตโนมัติ (Auto mixing tip) หนึ่งในองค์ประกอบหลักประกอบไปด้วยเมทาคริลเลตโมโนเมอร์ (Methacrylate monomers) โดยมอนอเมอร์หลักที่ใช้คือ บิสจีเอ็มเอ (Bisphenol A glycidyl methacrylate, Bis-GMA) โดยเซลฟ์แอดฮีซีฟเรซินซีเมนต์ทุกชนิดที่มีจำหน่ายเป็นประเภทซีเมนต์ชนิดบ่มร่วม ปฏิกิริยาการก่อตัวเกิดขึ้นโดยการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) ซึ่งบ่มได้ทั้งแสงและปฏิกิริยาเคมี จากนั้นเกิดการเชื่อมกันของโมโนเมอร์ ทำให้เกิดพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดขึ้น ในช่วงแรกหลังการผสมเรซินซีเมนต์ วัสดุจะเป็นกรดสูงจากการที่มีโมโนเมอร์เป็นองค์ประกอบ จากนั้นจะค่อยๆ ลดความเป็นกรดลงและเข้าสู่ความเป็นกลาง ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ของกรดฟอสฟอริกที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมบนผิวฟัน โดยระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาจะมีน้ำเกิดขึ้นที่จะช่วยให้เรซินซีเมนต์

เกิดการแนบกับผิวฟันได้ดียิ่งขึ้น ข้อดีของเรซินซีเมนต์ชนิดนี้คือใช้งานง่าย⁵¹ ตัวอย่างเรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้เช่น รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (RelyX™ U200 Self-Adhesive Resin Cement 3M-ESPE St. Paul, MN, USA) เป็นต้น

เซอโรโคเนียมีผิวสัมผัสที่เฉื่อย คือไม่เกิดปฏิกิริยากับสารอื่น ทำให้เซอโรโคเนียมีการเชื่อมติดที่ไม่ดี จึงมีการพัฒนาการยึดติดกับเซอโรโคเนียด้วยพันธะเคมี สารสำคัญการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนียคือ สารเทินเอ็มดีพี (10-MDP; 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate) เทินเอ็มดีพีเป็น หมู่ฟังก์ชันประกอบไปด้วยสายโซ่โมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่ไวนิล (Vinyl groups) ทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ในเรซินซีเมนต์ในปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งคือหมู่ออร์แกโนฟอสเฟตมอนอเมอร์ใช้จับยึดกับออกไซด์ของโลหะหรือไฮดรอกซีอะพาไทต์ในเนื้อเยื่อฟัน นอกจากนี้ออร์แกโนฟอสเฟตมอนอเมอร์ (Organo-phosphate monomer) มีประสิทธิภาพในการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนีย³ จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของหมู่ฟอสเฟตต่อการยึดติดกับผิวเซอโรโคเนีย เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างออกซิเจนอะตอม (P-O-Zr) (รูปที่ 4) มีการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงของการยึดติดเซอโรโคเนียระหว่างสารยึดติดที่มีส่วนประกอบหลักคือ เทินเอ็มดีพี และ บิสจีเอ็มเอ (BisGMA; bisphenol-A-diglycidylmethacrylate) พบว่า สารประกอบเทินเอ็มดีพี ยึดได้แข็งแรงกว่าและยาวนานกว่า และดียิ่งขึ้นหากใช้การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ตามด้วยสารเทินเอ็มดีพี⁹



รูปที่ 4 การเชื่อมติดทางเคมีระหว่างสารเทินเอ็มดีพีกับเซอโรโคเนีย

การยึดติดกับแบร็กเกตจัดฟันโลหะ

มีการศึกษาก่อนหน้านี้กล่าวว่า การยึดติดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับฟันที่ดีต้องมีแรงมากพอที่จะไม่ทำให้เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อฟันเมื่อต้องถอดแบร็กเกตจัดฟันโลหะ การแตกหักของชั้นเคลือบฟันจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงดึงตรงที่มากกว่า 14.5 เมกะปาสคาล⁵² และเมื่อมีแรงดึงทิศทางตั้งฉากกับแท่งเคลือบฟันมากกว่า 11.5 เมกะปาสคาลจะทำให้เกิดการแตกหักของแท่งเคลือบฟันได้⁵³ ดังนั้นการใช้แรงที่มากกว่านี้อาจเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อฟันได้ในขณะที่ต้องถอดแบร็กเกตจัดฟันโลหะ ภายหลักระเบิดการรักษารักษา เพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียที่เกิดขึ้น ค่าการยึดติดควรอยู่ในช่วงระหว่างแรงน้อยที่สุดที่จะเคลื่อนฟันได้และไม่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อ โดยมีการศึกษาก่อนหน้านี้ที่แสดงค่าความแข็งแรงของกำลังแรงยึดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับวัสดุบูรณะหรือฟันที่สามารถเคลื่อนฟันได้ ควรอยู่ในช่วงของ 6 ถึง 8 เมกะปาสคาล^{54, 55} และอีกหลายงานวิจัยกล่าวว่าค่าที่สามารถเคลื่อนฟันได้ที่เป็นที่ยอมรับทางคลินิกอยู่ระหว่าง 8 ถึง 12 เมกะปาสคาล¹⁰ การยึดติดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับครอบฟันเซรามิกยังเป็นสิ่งท้าทายมีการวิจัยกล่าวว่าการยึดติดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับครอบฟันเซรามิกที่มีแก้วเป็นองค์ประกอบให้ค่าการยึดติดที่เป็นที่ยอมรับทางคลินิก⁵⁶ ค่าการยึดติดที่มากเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อตัวครอบฟันเมื่อต้องถอดแบร็กเกตจัดฟันโลหะขณะเสร็จสิ้นการรักษา⁵⁷ ดังนั้นค่าการยึดติดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับครอบฟันเซรามิกควรมีค่าประมาณเท่ากับค่าของการยึดติดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันโลหะกับเนื้อเยื่อฟัน

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. เซอร์โคเนียชนิดวางยี่ห้อซีพีก่อนการเผาซินเทอร์ (Katana™ Zirconia Block; Kuraray Noritake Dental Inc, Japan)
2. แบร์กเกตโลหะไร้สนิม (Gemini series™; 3M Unitek Corporation, Monrovia, CA, USA)
3. เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (RelyX™ U200 Self-Adhesive Resin Cement 3M-ESPE St. Paul, MN, USA)
4. เรซินแอตชีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (Transbond™ XT Light Cure Adhesive 3M-ESPE St. Paul, MN, USA)
5. สารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ซีไพร์มพลัส (Z Prime™ Plus Ziconia Alumina Metal Primer Bisco, Inc. IL, USA)
6. เข็มกรอกากเพชรรูปดับเบิลโคนความหยาบ 106 ไมครอน (Standard double cone shape bur, Intensive SA, Grancia, Switzerland)
7. ยิปซัมทางทันตกรรม (Vel-Mix™ Die Stone Gypsum; Kerr, USA)
8. เทปกาวใสขนาดความหนา 50 ไมครอน (Scotch, 3M, USA)
9. กระดาษซิลิกอนคาร์ไบด์ความละเอียด 800 และ 1200 กริต
10. ท่อพีวีซี

รายละเอียดส่วนประกอบอยู่ในตารางที่ 2

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องตัดชิ้นงานความเร็วต่ำ (Isomet 1000; Buehler, USA)
2. เครื่องขัดชิ้นงานมินิเทค (Minitech 233; Presi, Grenoble, France)
3. เครื่องขัดชิ้นงานนาโนสองพัน (Nano 2000, Pace Technologies, AZ, USA)
4. เครื่องวัดความขรุขระผิว (Talyscan 150, England)
5. เครื่องฉายแสง (Demi plus L.E.D curing light, USA)
6. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Nabertherm furnace 400-1, Germany)
7. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคป (SZ 61, Olympus, Japan)
8. เครื่องวัดความแข็งของวัสดุ (ASTM D 2240 Type A.D PTC Instruments, USA)

9. หัวกรอความเร็วสูง (Alegra dental turbine, W&H company, Bürmoos, Austria)
10. เครื่องกลึงคอมพิวเตอร์ซีเอ็นซี (Computer Numerical Control; CNC)
11. ตู้พ่นทราย (Vario Basic®; Renfert, Germany)
12. เครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine EZ-S 500N, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan)
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

ตารางที่ 2 แสดงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อวัสดุ	ส่วนประกอบ	บริษัทผู้ผลิต	หมายเลขชุด
RelyX™ U200 Dual cure self- adhesive resin cement	Base: Methacrylate monomers containing phosphoric acid groups, methacrylate monomers, silanated fillers, initiators, stabilizers, rheological additives. Catalyst: Methacrylate monomers, alkaline stabilizers, silanated fillers, pigments, rheological additives.	3M EPSE, USA	4819681
Transbond™ XT Light cure adhesive primer	Adhesive: Bis-GMA, Silane, Bisphenol A bis (2-hydroxyethyl ether) dimethacrylate, Diphenyliodonium hexafluorophosphate Primer: Bis-GMA, TEGDMA, Triphenyl antimony, 4-(dimethylamino)-benzeneethanol, DL-Camphorquinone, Hydroquinone	3M EPSE, USA	N880549 N878578
Z Prime™ Plus	Ethanol, Bis-GMA, MDP ,2-Hydroxyethyl Methacrylate, Proprietary	Bisco, Inc. USA	1800004348

^aAccording to the information provided by the manufacturers: Bis-GMA: bisphenol-A-diglycidylmethacrylate; TEGDMA: triethyleneglycol dimethacrylate; MDP: 10-methacryloxydecyl dihydrogen phosphate

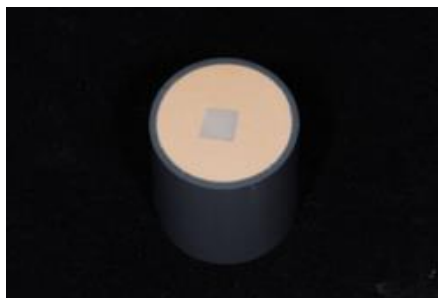
วิธีการดำเนินการวิจัย

- การเตรียมชิ้นงานเซอโรโคเนีย

นำเซอโรโคเนียชนิดวายเป็นผงก่อนการเผาขึ้นเทอร์มาตัดให้ได้ชิ้นงานขนาด 8x8x2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานความเร็วต่ำ (Isomet 1000; Buehler, USA) จำนวน 60 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดให้เรียบด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ระดับความละเอียด 800 และ 1200 กริต ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงาน (Minitech 233; Presi, Grenoble, France) กำหนดความเร็วที่ 250 รอบต่อนาที แรงกด 50 นิวตัน เป็นระยะเวลา 1 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาขึ้นเทอร์โมในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Nabertherm furnace 400-1, Germany) ตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสองชั่วโมง เพื่อให้ได้ความแข็งแรง (รูปที่ 5) จากนั้นนำแผ่นเซอโรโคเนียมาฝังลงในท่อพีวีซีด้วยยิปซัมทางทันตกรรม (Vel-Mix™ Die Stone Gypsum; Kerr, USA) เพื่อใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานเพื่อเข้าเครื่องทดสอบ (รูปที่ 6) นำเซอโรโคเนียที่อยู่ในแบบหล่อมาขัดอีกครั้งด้วยกระดาษซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ระดับความละเอียด 800 และ 1200 กริต ตามลำดับ ด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน (Nano 2000, Pace Technologies, AZ, USA) กำหนดความเร็วที่ 250 รอบต่อนาที ที่แรงกดเท่ากัน เป็นระยะเวลา 1 นาที จากนั้นนำแผ่นเซอโรโคเนียที่ได้ไปวัดความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว (Profilometer; Talyscan 150, England) เพื่อควบคุมระดับความเรียบให้เท่ากัน



รูปที่ 5 ชิ้นงานเซอโรโคเนียที่ผ่านเผาขึ้นเทอร์



รูปที่ 6 ชิ้นงานเซอรโคเนียที่ผ่านเผาซินเทอร์ฟิงลงในท่อพีวีซีด้วยยิปซัมทางทันตกรรม

- การแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามการปรับสภาพผิว

ชิ้นงานเซอรโคเนียถูกนำมาแบ่งเป็น 12 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ชิ้น โดยแต่ละกลุ่มใช้การปรับสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน ทั้งการปรับสภาพผิวเชิงกลและการทาสารปรับสภาพผิวทางเคมี

การปรับสภาพผิวเชิงกลจะแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งผิวเซอรโคเนียไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวเป็นกลุ่มควบคุม กลุ่มที่สองผิวเซอรโคเนียถูกพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 50 ไมครอน ที่แรงดัน 0.25 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 15 วินาที ที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร ด้วยตู้พ่นทราย (Vario Basic®; Renfert, Germany) และกลุ่มที่สามใช้เข็มกรอกากเพชรรูปดับเบิลโคนความหยาบ 106 ไมครอน (Standard double cone shape bur, Intensive SA, Grancia, Switzerland) กรอด้วยหัวกรอความเร็วสูง (Alegra dental turbine, W&H company, Bürmoos, Austria) ควบคุมแรงที่ใช้ และทิศทางของหัวกรอโดยเครื่องกลึงคอมพิวเตอร์ซีเอ็นซี (CNC; Computer Numerical Control) โดยวางแผนตัดเชื่อมกรอกากเพชรให้หน้าตัดรูปโคนด้านบนขนานและแนบบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานเซอรโคเนีย ดังรูปที่ 7 ตัวเครื่องทำงานโดยแทนจับชิ้นงานของเครื่องกลึงคอมพิวเตอร์ซีเอ็นซีจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทิศทางเดียวจากซ้ายไปขวาในขณะที่หัวกรอทำงานอยู่กับที่ หลังการปรับสภาพผิวเชิงกล ชิ้นงานถูกนำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 นาที เมื่อชิ้นงานแห้งนำเทปกาวใสขนาดความหนา 50 ไมครอน (Scotch, 3M, USA) ที่เจาะรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38 มิลลิเมตร อ้างอิงมาจาก ISO 4049:2009⁵⁸ และ ISO 29022:2013⁵⁹ เพื่อจำกัดพื้นที่ยึดติดและควบคุมความหนาของเรซินแอตตีซีฟของแต่ละชั้นให้เท่ากัน จากนั้นแบ่งกลุ่มทาสารปรับปรุงผิวเซอรโคเนียไพโรเมอร์ซีไพร์มพลัส ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต โดยมีกลุ่มดังนี้

กลุ่มควบคุม (C) ผิวเซอร์โคเนียไม่ได้รับการปรับสภาพผิว

กลุ่มทดลอง (Z) ทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์

กลุ่มทดลอง (S) ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์

กลุ่มทดลอง (G) กรอด้วยเข็มกรอกากเพชร

กลุ่มทดลอง (SZ) ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์ร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์

กลุ่มทดลอง (GZ) กรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์

- การยึดชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวแบ่งออกเป็นสองกลุ่มโดยกลุ่มแรกยึดกับแบร์กเกตจัดฟันด้วยเรซินแอตซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที และอีกกลุ่มยึดกับแบร์กเกตจัดฟันด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (ตารางที่ 3) ด้วยวิธีตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด โดยขณะยึดใช้เครื่องมือกำหนดแนวระนาบการยึดติดให้ตั้งฉากกับชิ้นงานและใช้น้ำหนักกด 1 กิโลกรัม กำจัดเรซินแอตซีฟส่วนเกินออกด้วยพู่กันขนาดเล็ก หลังจากนั้นฉายแสงสีด้าน เป็นเวลาด้านละ 20 วินาที (รูปที่ 8) นำชิ้นงานที่เชื่อมติดแล้วไปเก็บไว้ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำออกมาทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยวต่อไป

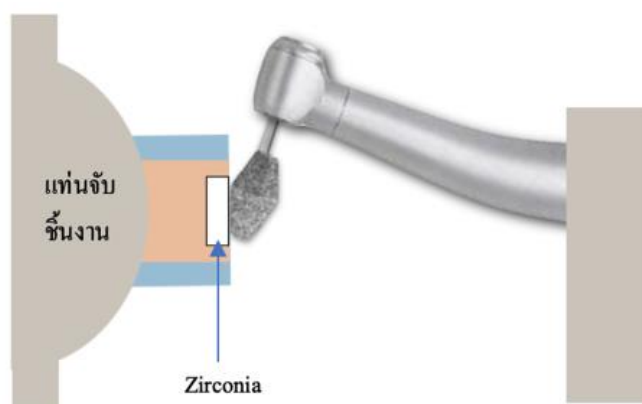
- การทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว

แรงยึดเหนี่ยวจะถูกวัดโดยเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine EZ-S 500N, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) โดยหน้าตัดตรงของเครื่องทดสอบจะวางตัวขนานไปกับผิวเซอร์โคเนีย และวางบริเวณรอยต่อระหว่างแบร์กเกตจัดฟันและเซอร์โคเนีย ดังรูปที่ 2 ความเร็วหน้าตัดเคลื่อนทดสอบอยู่ที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ดัดแปลงมาจาก ISO 29022:2013⁵⁹ จนชิ้นงานหลุดออกจากกันและค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวจะถูกคำนวณในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) (รูปที่ 9, 10) โดยนำค่าแรงที่ชิ้นงานหลุดออกจากกันซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตัน (N)หารด้วยค่าพื้นที่หน้าตัดของส่วนยึดที่คิดเป็นตารางมิลลิเมตร

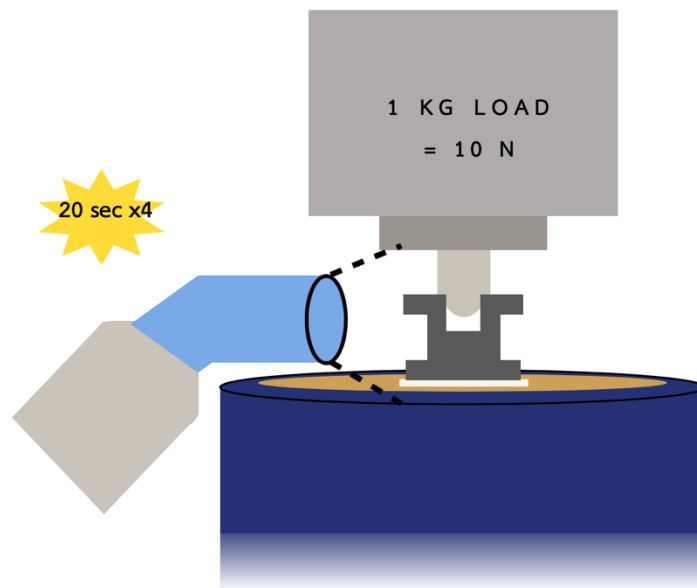
ตารางที่ 3 กลุ่มชิ้นงานการทดลอง

	การปรับสภาพผิว เชิงกล แบ่งเป็น กลุ่มละ 40 ชิ้นงาน	ทาสาร ปรับปรุงผิว เซอร์โคเนีย ไพโรเมอร์	การยึดชิ้นงานด้วยเรซินแอตอีซีฟ	ชื่อ กลุ่ม กลุ่มละ 10 ชิ้นงาน
120 ชิ้นงาน	ไม่ได้รับการปรับ สภาพผิวเชิงกล	-	Transbond™ XT	CNT
		-	RelyX™ U200	CNU
		✓	Transbond™ XT	CZT
		✓	RelyX™ U200	CZU
	พ่นผงอะลูมิเนียม ออกไซด์	-	Transbond™ XT	SNT
		-	RelyX™ U200	SNU
		✓	Transbond™ XT	SZT
		✓	RelyX™ U200	SZU
	กรอด้วยเข็มกรอ กากเพชร	-	Transbond™ XT	GNT
		-	RelyX™ U200	GNU
		✓	Transbond™ XT	GZT
		✓	RelyX™ U200	GZU

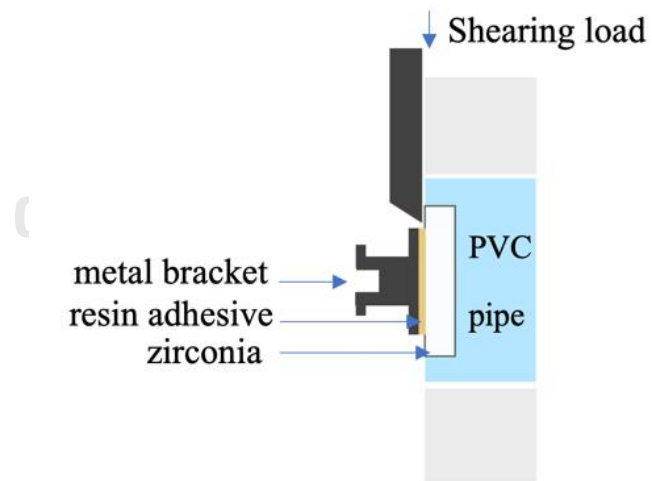
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 7 แสดงองค์ประกอบเครื่องกลึงคอมพิวเตอร์ซีเอ็นซีและหัวกรอขณะกรอชิ้นงาน



รูปที่ 8 แสดงองค์ประกอบขณะยึดชิ้นงานและฉายแสง



รูปที่ 9 แสดงองค์ประกอบทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว



รูปที่ 10 แสดงเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์

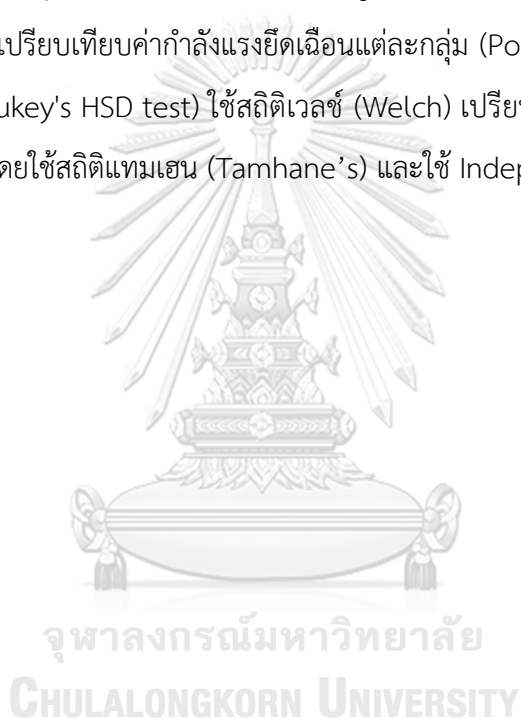
- การศึกษาลักษณะความล้มเหลว

ศึกษาลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้น โดยนำชิ้นงานทั้งเซอโรโคเนียและแบร็กเกตจัดฟันโลหะ มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคป (Stereomicroscope) ที่กำลังขยาย 45 เท่า เพื่อดูรูปแบบความล้มเหลว (Mode of failure) ของแรงยึดติดระหว่างเซอโรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟ จำแนกความล้มเหลวเป็น 4 แบบ⁶⁰ ดังนี้ พบความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอโรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟ (Adhesive failure at ceramic-resin adhesive interface) ร้อยละ 70 ขึ้นไป หรือพบความล้มเหลวในชั้นเรซินแอดฮีซีฟ (Cohesive failure in the resin adhesive) คือมีการแตกหักในชั้นเรซินซีเมนต์ร้อยละ 70 ขึ้นไป หรือพบความล้มเหลวระหว่างชั้นเรซินแอดฮีซีฟกับแบร็กเกตจัดฟันโลหะ (Adhesive failure at resin adhesive-orthodontic metal bracket) ร้อยละ 70 ขึ้นไป หรือพบความล้มเหลวแบบผสม (Mixed failure) คือมีความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอโรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟ หรือเรซินแอดฮีซีฟกับแบร็กเกตจัดฟัน และพบความล้มเหลวในชั้นเรซินแอดฮีซีฟ โดยการแตกหักของชิ้นใดชิ้นหนึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 70 จากนั้นบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning electron microscope) กำลังขยาย 2000 เท่า ที่พื้นผิวของเซอร์โคเนียหลังการทดสอบ

- **การวิเคราะห์ข้อมูล**

ข้อมูลจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 22 (Statistical Package for Statistical Science Inc., Chicago, IL, USA) โดยการทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล (Kolmogorov-Smirnov test) จากนั้นใช้การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล และความแปรปรวนแบบสามทาง (Three-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ใช้สถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เปรียบเทียบค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวแต่ละกลุ่ม (Post hoc) โดยใช้สถิติการทดสอบเอชเอสดีของทูกีย์ (Tukey's HSD test) ใช้สถิติเวลช์ (Welch) เปรียบเทียบค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวแต่ละกลุ่ม (Post hoc) โดยใช้สถิติแทมเฮน (Tamhane's) และใช้ Independent samples T-Test



ผลการวิจัย

การทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว

ค่าเฉลี่ยกำลังแรงยึดเหนี่ยวของทุกกลุ่มการทดลองและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 11 ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวของทุกกลุ่ม (MPa)

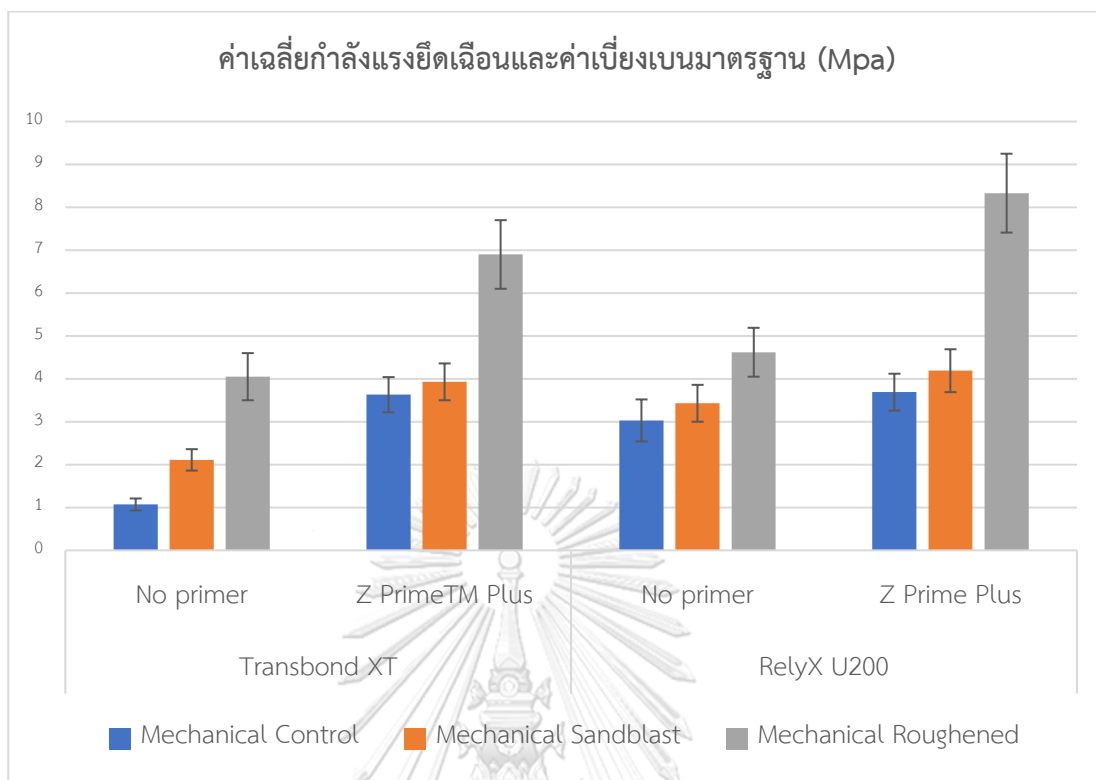
Resin adhesive	Chemical	Mechanical		
		Control	Sandblast	Roughened
		Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD
Transbond™ XT	No primer	1.07 \pm 0.14 ^{a,A,1}	2.11 \pm 0.25 ^{b,A,1}	4.05 \pm 0.55 ^{c,A,1}
	Z Prime™ Plus	3.63 \pm 0.41 ^{a,B,1'}	3.93 \pm 0.43 ^{a,B,1'}	6.90 \pm 0.80 ^{b,B,1'}
	No primer	3.03 \pm 0.49 ^{a,A',2}	3.43 \pm 0.43 ^{a,A',2}	4.62 \pm 0.57 ^{b,A',2}
RelyX™ U200	Z Prime™ Plus	3.69 \pm 0.43 ^{a,B',1'}	4.19 \pm 0.5 ^{a,B',1'}	8.33 \pm 0.92 ^{b,B',2'}

Note: The same lower-case letters indicate no significant differences from One-way ANOVA (for RelyX™ U200 and Z Prime™ Plus with Transbond™ XT) Welch ANOVA (for no primer with Transbond™ XT) in the same row ($p>0.05$).

The same upper-case letters indicate no significant differences from independent t-test in the same column with the same resin adhesive ($p>0.05$).

The same number indicate no significant differences from independent t-test in the same column with the same chemical pretreatment ($p>0.05$).

SD: Standard deviation



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงยึดเหนี่ยวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกกลุ่มการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสามทาง (Three-way ANOVA) โดยมีตัวแปรต้น 3 ตัวคือ การปรับสภาพผิวเชิงกล การปรับสภาพผิวทางเคมี และชนิดของเรซินแอตฮีซีฟ ตัวแปรตามคือ ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยว โดยให้ผลดังนี้ (ตารางที่ 5)

1. ประเภทของการปรับสภาพผิวเชิงกล เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
2. การทาสารปรับสภาพผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
3. ชนิดของเรซินแอตฮีซีฟ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
4. การปรับสภาพผิวเชิงกลมีปฏิสัมพันธ์กับการทาสารปรับสภาพผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

5. การปรับสภาพผิวเชิงกลไม่มีปฏิสัมพันธ์กับชนิดของเรซินแอตอีซีฟ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
6. การทาสารปรับสภาพผิวเซอรโคเนียไพร์เมอร์มีปฏิสัมพันธ์กับชนิดของเรซินแอตอีซีฟอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
7. ตัวแปรต้นทั้งสามตัว คือ การปรับสภาพผิวเชิงกล การทาสารปรับสภาพผิวเซอรโคเนียไพร์เมอร์และชนิดของเรซินแอตอีซีฟมีปฏิสัมพันธ์ต่อกันและกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

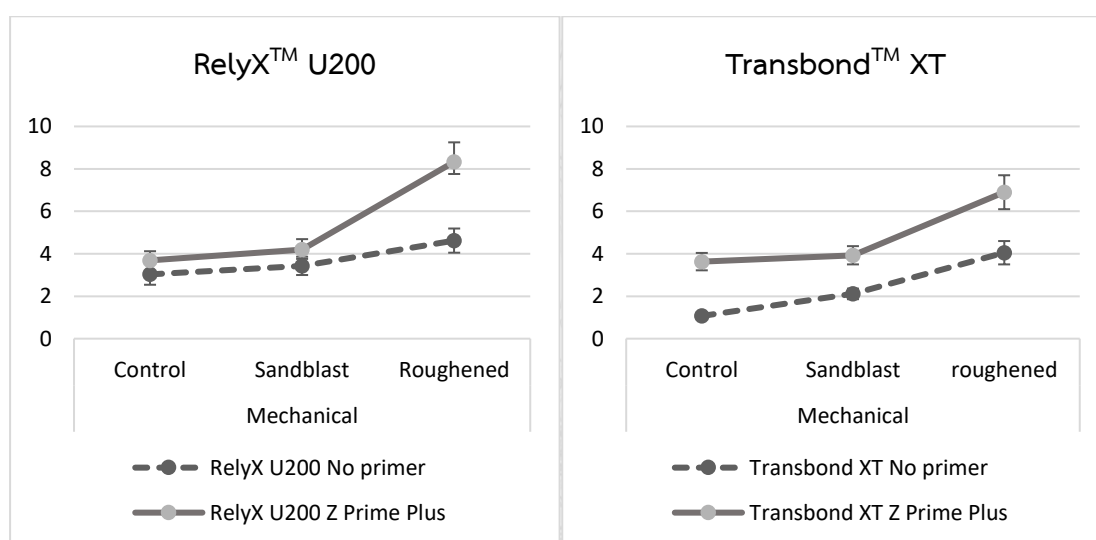
ตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสามทาง (Three-way ANOVA)

Surface treatments	Type III		Mean Square	F	Sig.
	Sum of Squares	df			
Mechanical	221.141	2	110.571	349.976	<0.001
Chemical	127.471	1	127.471	403.469	<0.001
Cementation	26.051	1	26.051	82.457	<0.001
Mechanical*Chemical	22.835	2	11.418	36.139	<0.001
Mechanical*Cementation	.325	2	.163	.515	.599
Chemical*Cementation	3.681	1	3.681	11.650	<0.001
Mechanical*	10.020	2	5.010	15.857	<0.001
Chemical*Cementation					

เมื่อจำแนกตามการปรับสภาพผิวเชิงกลตามการศึกษาในชนิดของเรซินแอตอีซีฟและการปรับสภาพผิวทางเคมีเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่า การกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองกลุ่ม ตามมาด้วยการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวเชิงกล ตามลำดับ โดยกลุ่มที่ถูกกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มที่พ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์และกลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กลุ่มที่พ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์และกลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกลุ่มที่ไม่ได้ทาสารปรับปรุ้งผิวเซอรโคเนียไพร์เมอร์ร่วมกับการยึดเรซินแอตอีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที โดยค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวของกลุ่มที่ถูกกรอด้วยเข็มกรอกากเพชร

สูงกว่ากลุ่มที่ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์และกลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวเชิงกลตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

เมื่อจำแนกตามการปรับสภาพผิวทางเคมี ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มที่ทาสารปรับปรุงผิวเซออร์โคเนียไพโรเมออร์มีค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ทาสารปรับปรุงผิวเซออร์โคเนียไพโรเมออร์ในทุกกลุ่ม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ดังรูปที่ 12

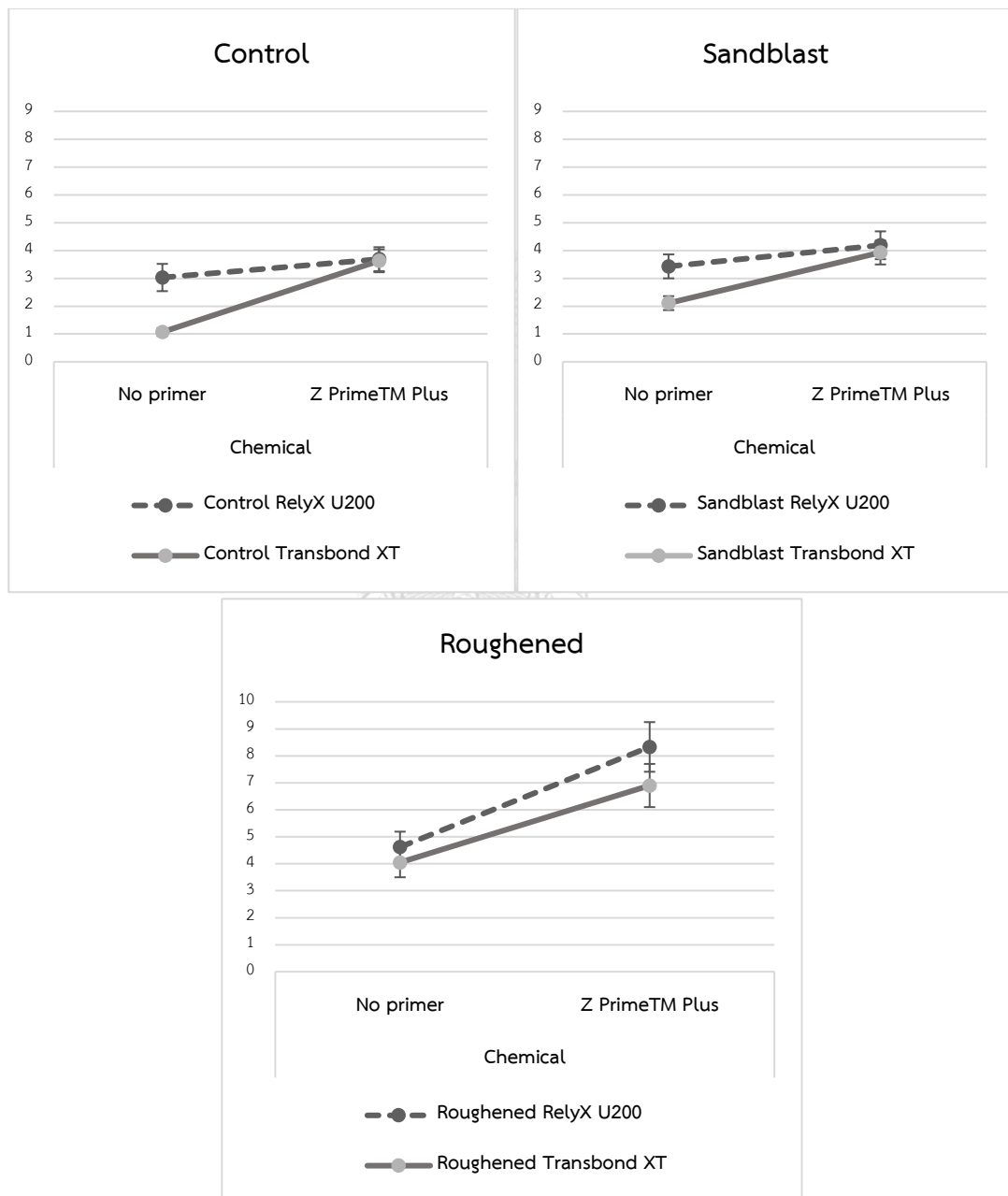


รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงยึดเหนี่ยวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อจำแนกตามชนิดของเรซินแอตฮีซีฟที่ใช้ ผลการศึกษาพบว่าหากไม่ได้ทาสารปรับปรุงผิวเซออร์โคเนียไพโรเมออร์ กลุ่มที่ใช้เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ในทุกกลุ่มการปรับสภาพผิวเชิงกล แต่หากทาสารปรับปรุงผิวเซออร์โคเนียไพโรเมออร์ร่วมกับการใช้เรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที หรือเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยให้ผลที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ยกเว้นกลุ่มที่กรอด้วยเข็มกรอกากเพชร การใช้เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยร่วมกับการทาสารปรับปรุงผิวเซออร์โคเนียไพโรเมออร์ จะให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่าการใช้เร

ซินแอตอีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที่ร่วมกับการทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) แสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงยึดเหนี่ยวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

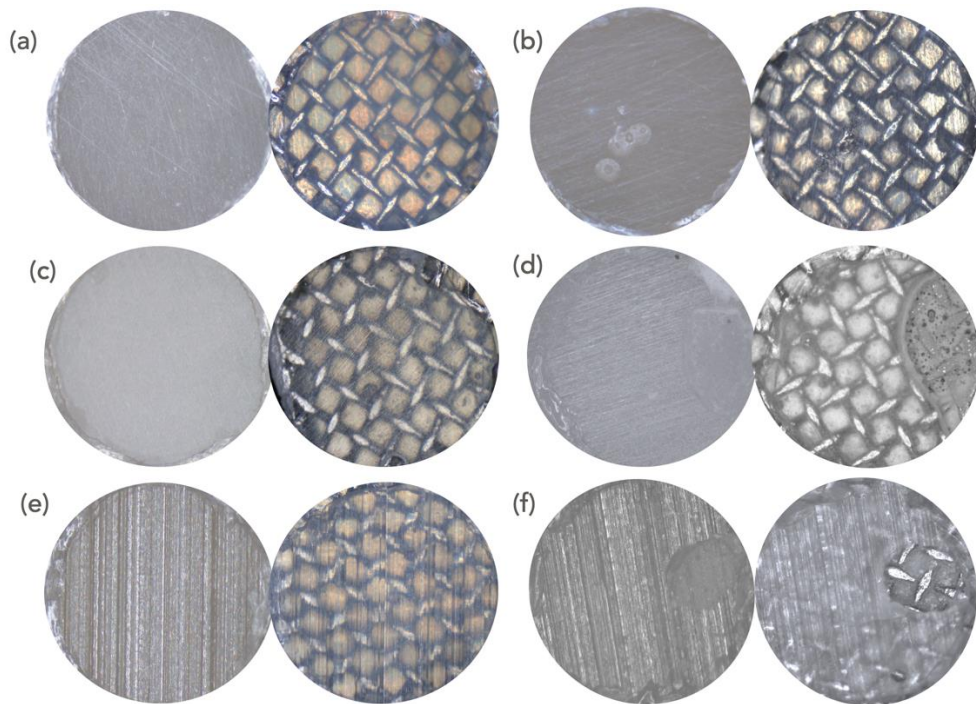
การศึกษาลักษณะความล้มเหลว

- ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคป

พบลักษณะความล้มเหลวบริเวณแตกหักสองแบบคือ ความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟ (Adhesive failure at ceramic-resin adhesive interface) คือมีการแตกหักระหว่างชั้นเซอรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟร้อยละ 70 ขึ้นไป และพบความล้มเหลวแบบผสม (Mixed failure) คือมีความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอรโคเนียกับเรซินแอดฮีซีฟ หรือเรซินแอดฮีซีฟกับแบร็กเก็ตจัดฟัน และพบความล้มเหลวในชั้นเรซินแอดฮีซีฟ โดยการแตกหักของชั้นใดชั้นหนึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 70 ดังตารางที่ 6 แสดงลักษณะความล้มเหลวดังรูปที่ 14

ตารางที่ 6 ลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มทดลอง

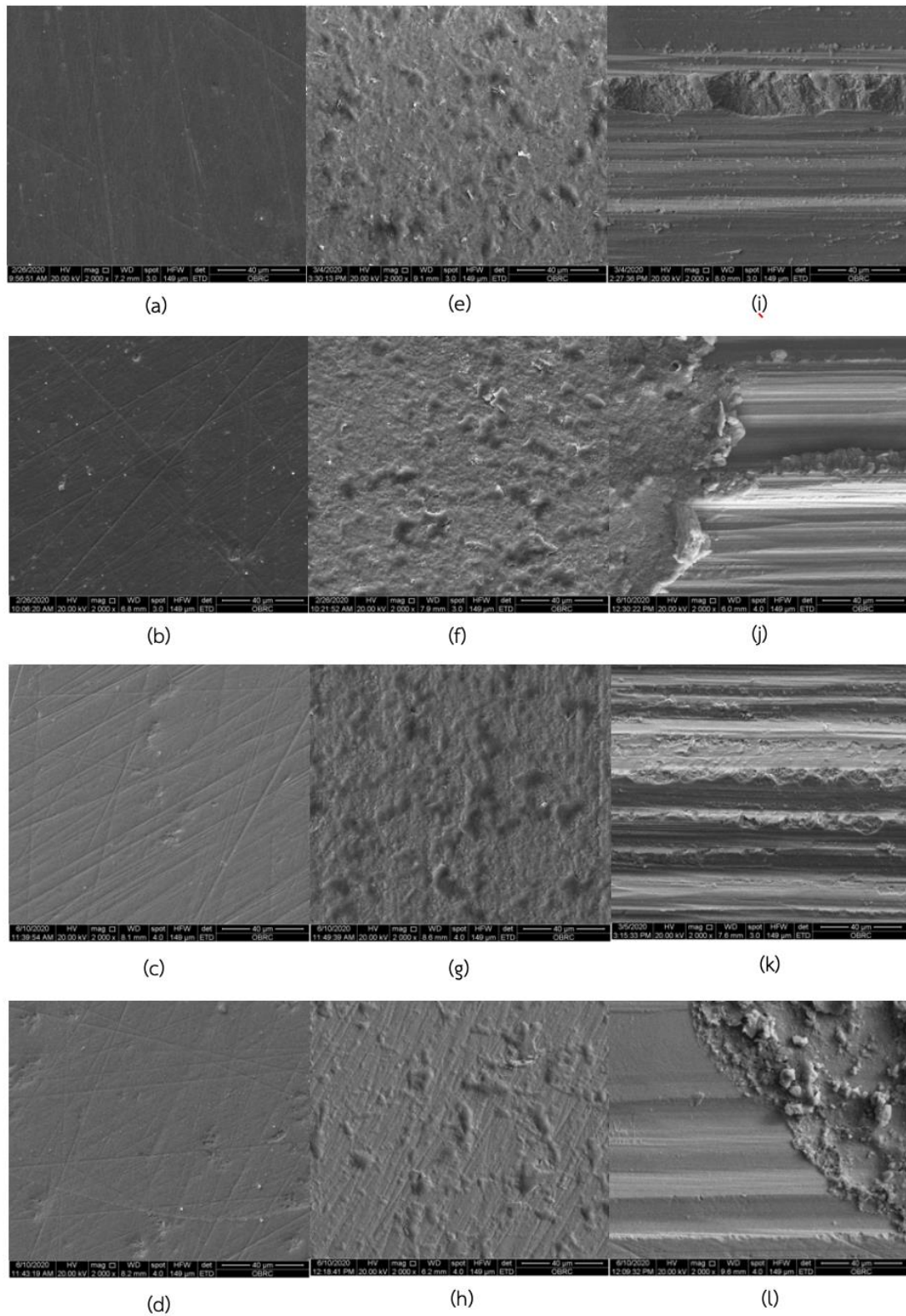
การปรับสภาพผิว	Adhesive failure (%) (Zirconia/adhesive)	Mixed failure (%)	Cohesive failure (%)	Adhesive failure (%) (Metal bracket /adhesive)
CNT	100	0	0	0
CNU	70	30	0	0
CZT	100	0	0	0
CZU	50	50	0	0
SNT	100	0	0	0
SNU	90	10	0	0
SZT	100	0	0	0
SZU	70	30	0	0
GNT	100	0	0	0
GNU	60	40	0	0
GZT	70	30	0	0
GZU	40	60	0	0



รูปที่ 14 แสดงลักษณะพื้นผิวของเซอร์โคเนียหลังการทดสอบด้วยจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคป ที่กำลังขยาย 45 เท่า ภายหลังจากทดสอบกำลังแรงยึดเหนี่ยว (a) แสดงความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟ (b) ความล้มเหลวแบบผสม ในกลุ่มที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวเชิงกล (c) แสดงความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟ (d) ความล้มเหลวแบบผสม ในกลุ่มที่ผิวเซอร์โคเนียถูกพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (e) แสดงความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟ (f) ความล้มเหลวแบบผสม ในกลุ่มที่ผิวเซอร์โคเนียถูกรัดด้วยเข็มกรอกากเพชร

- ผลการศึกษาด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

พบว่ากลุ่มที่ผิวเซอร์โคเนียไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว (a)(b) มีพื้นผิวที่เรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน ใกล้เคียงกับลักษณะพื้นผิวในกลุ่มที่ทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ (c)(d) ในกลุ่มที่ผิวเซอร์โคเนียถูกพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (e)(f) พบลักษณะผิวที่มีความขรุขระแบบกระจาย เช่นเดียวกับกลุ่มที่ถูกพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์และทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ (g)(h) และกลุ่มที่ผิวเซอร์โคเนียถูกรัดด้วยเข็มกรอกากเพชร (i)(j) พบลักษณะผิวเซอร์โคเนียที่มีความขรุขระในแนวลึกมากกว่ากลุ่มที่ถูกพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ ลักษณะนี้พบในกลุ่มที่ถูกรัดด้วยเข็มกรอกากเพชรและทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ (k)(l) เช่นกัน ในภาพกลุ่ม (j)(l) พบเรซินแอตฮีซีฟบางส่วนหลงเหลืออยู่บนผิวของเซอร์โคเนีย แสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงลักษณะพื้นผิวของเซอร์โคเนียหลังการทดสอบด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 เท่า ภายหลังจากการทดสอบกำลังแรงยึดเฉือน (a) กลุ่ม CNT ผิวเซอร์โคเนีย

ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวและยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (b) กลุ่ม CNU ผิวเซอโรโคเนียไม่ได้รับการปรับสภาพผิวและยึดด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (c) กลุ่ม CZT ผิวเซอโรโคเนียได้รับการทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์และยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (d) กลุ่ม CZU ผิวเซอโรโคเนียได้รับการทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์และยึดเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (e) กลุ่ม SNT ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์และยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (f) กลุ่ม SNU ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์และยึดด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (g) กลุ่ม SZT ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์ร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์และยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (h) กลุ่ม SZU ฟันผงอะลูมิเนียมออกไซด์ร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์และยึดด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (i) กลุ่ม GNT กรอด้วยเข็มกรอกากเพชรและยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (j) กลุ่ม GNU กรอด้วยเข็มกรอกากเพชรและยึดด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย (k) กลุ่ม GZT กรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์และยึดเรซินแอตฮีซีฟชนิดบ่มตัวด้วยแสงทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที (l) กลุ่ม GZU กรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์ และยึดด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวสองแบบรีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย

การอภิปรายผล

ผลการศึกษาปฏิเสฐสมมติฐานหลักงานวิจัย คือการปรับสภาพผิวเซอโรโคเนียมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซอโรโคเนียกับแบร็กเกตจัดฟันโลหะอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ซึ่งการศึกษานี้ได้พิจารณาผลของการปรับสภาพผิวเซอโรโคเนียที่แตกต่างกันที่มีผลต่อค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวกับแบร็กเกตจัดฟันโลหะเพื่อจำลองแรงที่เกิดขึ้นในช่องปากที่มากกระทำต่อแบร็กเกตโลหะจัดฟัน โดยอาศัยการเตรียมผิวด้วยการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ การกรอผิวด้วยเข็มกรอากเพชร และการทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์ วิธีเหล่านี้สามารถทำได้ในคลินิกและไม่เป็นอันตรายต่อนเนื้อเยื่อแข็งและเนื้อเยื่ออ่อนเมื่อทำในช่องปาก

จากการทดลองเมื่อจำแนกตามการปรับสภาพผิวเชิงกลตามการศึกษาในชนิดของเรซินแอตซีซีฟและการปรับสภาพผิวทางเคมีเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่ากรอด้วยเข็มกรอากเพชรให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองกลุ่ม ตามมาด้วยการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวเชิงกล ตามลำดับ เป็นผลจากความขรุขระของพื้นผิวและพลังงานผิวเพิ่มขึ้น (Surface roughness and surface energy) และเป็นการเพิ่มพื้นที่การยึดติด (Area of bonding) จากภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของเซอโรโคเนียหลังการทดสอบด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบว่าการกรอด้วยเข็มกรอากเพชรมีความขรุขระกว่าอีกสองกลุ่ม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Derand P ในปี 2000 ที่กล่าวว่าการกรอผิวเซอโรโคเนียด้วยเข็มกรอากเพชร ช่วยให้ค่าการยึดติดแข็งแรงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับเรซินซีเมนต์ที่มีเอมดีพีเป็นองค์ประกอบ และยังได้พื้นผิวที่หยาบที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น⁵ สอดคล้องกับผลการทดลองที่กล่าวว่าการปรับสภาพผิวเชิงกลร่วมกับการทาสารเอมดีพีจะมีผลต่อกำลังแรงยึดเหนี่ยว จากการศึกษาของ Subasi MG และคณะ พบว่าการใช้เข็มกรอากเพชรที่ความหยาบ 110 ไมครอน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างผลึกเซอโรโคเนียจากเตตระโกนอลไปเป็นโมนอคลินิก แต่ไม่มีผลต่อค่าความทนแรงดัด (Flexural strength) ของเซอโรโคเนีย⁶¹

เมื่อจำแนกตามการปรับสภาพผิวทางเคมี ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มที่ทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์มีค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ทาสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์ในทุกกลุ่ม เนื่องจากการใช้ไพโรเมอร์สามารถเพิ่มความเปียก (Wettability) ให้กับเรซินแอตซีซีฟ ทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างเซอโรโคเนียกับแอตซีซีฟลดลง ทำให้สามารถไหลแผ่ได้ดีมีค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูง⁶² และเนื่องจากสารปรับปรุงผิวเซอโรโคเนียไพโรเมอร์ซีไพร์มพลัสมีหมู่ทำงาน

ฟอสเฟตโมโนเมอร์ (Active phosphate monomer) ชนิดเอ็มดีพี (MDP) ที่ปลายข้างหนึ่ง สามารถเกิดพันธะเคมีระหว่างหมู่ฟอสเฟตของเทินเอ็มดีพีกับชั้นออกไซด์ (Oxide layer) ของเซอร์โคเนีย โดยปกติสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียดังกล่าวยังสามารถยึดติดเซอร์โคเนีย อะลูมินา (Alumina) และโลหะผสมพื้นฐาน (Base metal alloy) ที่มีชั้นออกไซด์ ส่วนปลายอีกข้างเป็นคาร์บอนพันธะคู่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์กับสารยึดติดหรือเรซินแอดฮีซีฟได้³ ทำให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซอร์โคเนียกับแบร์กเกตจัดฟันสูงขึ้น

เมื่อจำแนกตามชนิดของเรซินแอดฮีซีฟที่ใช้ ผลการศึกษาพบว่าหากไม่ได้ทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ กลุ่มที่ใช้เรซินซีเมนต์รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เรซินแอดฮีซีฟทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) เรซินซีเมนต์รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยมีโมโนเมอร์เป็นส่วนประกอบคือ ฟอสฟอริกเมทาคริลเอสเตอร์ (Phosphoric methacrylate ester) ที่มีหมู่ฟอสเฟตเป็นหมู่ฟังก์ชัน สามารถยึดกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ที่พื้นผิวของเซอร์โคเนีย สามารถยึดติดกับเซอร์โคเนียช่วยเพิ่มค่ากำลังแรงยึดติดได้^{9, 63} มีการศึกษาพบว่า การยึดติดกับเซอร์โคเนียโดยใช้เรซินซีเมนต์ที่มี ฟอสฟอริกเมทาคริลเอสเตอร์ ให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวไม่ต่างกับการใช้เรซินซีเมนต์ที่มี เอ็มดีพี อย่างมีนัยสำคัญ⁶⁴ แม้ว่าเรซินแอดฮีซีฟทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที จะมีส่วนของไพโรเมอร์ที่ช่วยในการไหลแต่ แต่ไพโรเมอร์มีองค์ประกอบหลักคือ บิสจีเอ็มเอ (BisGMA; Bisphenol A diglycidylmethacrylate) ร้อยละ 45 ถึงร้อยละ 55 ซึ่งไม่เกิดพันธะเคมีกับเซอร์โคเนีย^{65, 66} มีการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงของการยึดติดเซอร์โคเนียระหว่างสารยึดติดที่มีส่วนประกอบหลักคือเทินเอ็มดีพีและบิสจีเอ็มเอ พบว่าสารประกอบเทินเอ็มดีพี ยึดได้แข็งแรงกว่าและยาวนานกว่า⁹ ดังนั้นเรซินซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นบิสจีเอ็มเอจึงมีความจำเป็นต้องใช้สารไพโรเมอร์ที่มีหมู่ฟอสเฟตเพื่อเพิ่มกำลังแรงยึดติด เมื่อทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ที่มีองค์ประกอบของเอ็มดีพีจะช่วยเพิ่มความเปียกให้กับเรซินแอดฮีซีฟ ทำให้ค่ามุมสัมผัสระหว่างเซอร์โคเนียกับแอดฮีซีฟลดลง ทำให้สามารถไหลแผ่ได้ดีไม่ว่าจะใช้เรซินแอดฮีซีฟชนิดใด⁶² สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ หากทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ร่วมกับการใช้เรซินแอดฮีซีฟชนิดบิสจีเอ็มเอทรานสบอนด์ เอ็กซ์ทีหรือเรซินซีเมนต์ที่มีฟอสฟอริกเมทาคริลเอสเตอร์ รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อยให้ผลที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

มีการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ร่วมกับการทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียที่มีเทินเอ็มดีพีเป็นองค์ประกอบจะทำให้ค่าความแข็งแรงของกำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและ

ยอมรับได้ทางคลินิก ซึ่งมีค่าหลากหลายตั้งแต่ 11.92 ถึง 26.74 เมกะปาสคาล โดยการพ่นผง อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองคืออนุภาค 110 ไมครอน ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล และอนุภาค 50 ไมครอน ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล^{65, 66} แต่ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า การพ่นผง อะลูมิเนียมออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวเชิงกล อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ยกเว้นกลุ่มที่ไม่ได้รับการการทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์และใช้สารยึดเรซิน แอดฮีซีฟชนิดบิสจีเอ็มเอทรานสبونด์ เอ็กซ์ที ที่การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ให้ค่ากำลังแรงยึดเฉือนสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยค่าที่ได้นี้อยู่ในช่วง 1.07 ถึง 4.19 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับแรงที่ใช้เคลื่อนฟัน ความแตกต่างนี้อธิบายได้จากปัจจัยในการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน โดยปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความแตกต่างคือวิธีการปรับสภาพผิวให้เกิดความขรุขระ เกิดการยึดติดเชิงกลขึ้นส่งผลให้ค่าแรงยึดในการศึกษาที่กล่าวมามีค่าสูงกว่า เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้การพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยอนุภาค 50 ไมครอน รูปร่างกลม ที่แรงดัน 0.25 เมกะปาสคาล โดยสาเหตุที่เลือกใช้ขนาด รูปร่าง และแรงดันนี้เพราะมีการศึกษาก่อนหน้านี้กล่าวว่า เป็นการเตรียมพื้นผิวเซอร์โคเนียที่ทำให้เกิดความขรุขระบนพื้นผิว มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างผลึกโมโนคลินิกในระดับที่เหมาะสม ไม่ทำให้ความแข็งแรงของเซอร์โคเนียต่ำลง⁴¹ อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการยึดอยู่ดีที่สุดในตามการศึกษาของ Moon และคณะ⁶⁷

การกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับการทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์และใช้เรซินซีเมนต์ที่มีฟอสฟอริกเมทอะคริลิกเอสเทอร์ รีไลน์เอ็กซ์ชูสองร้อยยึดให้ค่ากำลังแรงยึดเฉือนสูงที่สุด และเป็นค่าที่ยอมรับได้ทางคลินิก เป็นผลมาจากการปรับสภาพผิวเชิงกล การปรับสภาพผิวทางเคมี และเรซินแอดฮีซีฟที่ใช้ร่วมกันทำให้มีผลต่อค่ากำลังแรงยึดเฉือน โดยมีการศึกษาก่อนหน้านี้ที่แสดงค่าความแข็งแรงของกำลังแรงยึดระหว่างแบร์ริกเกตจัดฟันโลหะกับวัสดุบูรณะหรือฟันที่สามารถเคลื่อนฟันได้ควรรอยู่ในช่วงของ 6 ถึง 12 เมกะปาสคาล^{10, 54, 55} จากการทดลองนี้พบว่า การใช้เรซินแอดฮีซีฟชนิดบิสจีเอ็มเอทรานสبونด์ เอ็กซ์ที ร่วมกับการปรับสภาพผิวเชิงกลด้วยการกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับการทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ให้ค่ากำลังแรงยึดเฉือนที่สูง เป็นที่ยอมรับได้ในทางคลินิกเช่นเดียวกัน ในขณะที่การใช้การปรับสภาพผิวเชิงกลอื่น ๆ ร่วมกับการใช้สารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ซีไพรม์พลัส ค่าที่ได้ไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน เกิดการยึดติดที่ไม่ดีมีส่งผลให้การรักษาล่าช้า เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่ออ่อนและเนื้อเยื่อแข็ง เสี่ยงต่อเครื่องมือหลุดลงคอ¹¹

จากการศึกษาลักษณะความล้มเหลว พบความล้มเหลวส่วนใหญ่ที่ระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟ คือมีการแตกหักระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟในพื้นที่ร้อยละ 70 ขึ้นไป ซึ่งเป็นชั้นที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เนื่องจากรอยต่อระหว่างเรซินแอตฮีซีฟกับแบร็กเกตจัดฟันโลหะ มีการออกแบบพื้นผิวของแบร็กเกตจัดฟันให้มีความขรุขระ และมีลักษณะที่เอื้อต่อการยึดติดที่ดี การศึกษาลักษณะความล้มเหลวในการทดลองนี้ ก็ให้ผลไปในทางเดียวกัน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ยึดด้วยเรซินแอตฮีซีฟชนิดบิสฟีเอ็มเอทรานสบอนด์ เอ็กซ์ที พบความล้มเหลวที่ระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟมากกว่าในกลุ่มที่ยึดด้วยเรซินซีเมนต์ที่มีฟอสฟอริกเมทอะคริลิกเอสเทอร์ รีไลน์ เอ็กซ์ยูสองร้อย แสดงถึงการเชื่อมติดของพันธะเคมีที่ล้มเหลว การเพิ่มพื้นที่ยึดติดไม่มีผลหากไม่สามารถเชื่อมติดกันด้วยพันธะทางเคมีได้³⁵ โดยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ที่พื้นผิวของเซอร์โคเนียมีเพียงร้อยละ 5.4⁶⁸ ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับสภาพผิวเชิงกล โดยการกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับทาสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ และยึดด้วยเรซินซีเมนต์ที่มีฟอสฟอริกเมทอะคริลิกเอสเทอร์ พบความล้มเหลวแบบผสม (Mixed failure) มากที่สุด กล่าวคือมีความล้มเหลวระหว่างชั้นเซอร์โคเนียกับเรซินแอตฮีซีฟ และพบความล้มเหลวในชั้นเรซินแอตฮีซีฟ โดยการแตกหักของชั้นใดชั้นหนึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 70 สอดคล้องกับค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่ามากที่สุด จากการทดลองนี้ไม่พบความล้มเหลวบริเวณแตกหักในเนื้อของเซอร์โคเนีย แสดงถึงว่าหากมีการถอดเหล็กจัดฟันออกภายหลังการรักษา ครอบฟันเซอร์โคเนียจะไม่พบบริเวณแตกหัก ไม่เป็นอันตรายต่อตัวครอบฟัน

อย่างไรก็ดี การศึกษานี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการมีการควบคุมตัวแปรรวมถึงความชื้นที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อทำการยึดแบร็กเกตจัดฟันกับเซอร์โคเนียในช่องปาก ดังนั้นต้องมีการควบคุมความชื้นที่ดีเพราะอาจมีผลทำให้แรงยึดระหว่างแบร็กเกตจัดฟันกับเซอร์โคเนียลดลง อีกทั้งการศึกษานี้ไม่ได้มีกลุ่มที่ใช้การจำลองสภาวะในช่องปาก (Artificial aging) ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิร้อนเย็น (Thermocycling machine) ซึ่งสามารถบอกได้ถึงผลการยึดติดในระยะยาว ควรมีการศึกษาต่อเนื่องในอนาคตต่อไป

บทสรุป

ภายใต้ภาวะและข้อจำกัดของการศึกษาด้วย การทดลองในห้องปฏิบัติการนี้ ผลการศึกษาสามารถ ให้ข้อสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เข็มกรอกากเพชรความหยาบ 106 ไมครอน กรอที่ผิวเซอร์โคเนียช่วยเพิ่มความขรุขระที่ผิวและสามารถเพิ่มค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าการพ่นผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวเชิงกล ตามลำดับ
2. การทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ที่มีองค์ประกอบเอ็มดีพี ให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ในทุกกลุ่ม อย่างมีนัยสำคัญ
3. หากไม่ได้ทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ กลุ่มที่ใช้เรซินซีเมนต์รีไลน์เอ็กซ์ยูสองร้อย ให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เรซินแอคทีฟฟรานสปอนด์ เอ็กซ์ที อย่างมีนัยสำคัญ
4. การกรอด้วยเข็มกรอกากเพชรร่วมกับการทำสารปรับปรุงผิวเซอร์โคเนียไพโรเมอร์ ให้ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวเป็นที่ยอมรับทางคลินิก อาจลดปัญหาการหลุดของแบร็กเกตขณะรักษาและเพิ่มความสำเร็จของการรักษาได้

บรรณานุกรม

1. Manicone PF, Rossi Iommetti P, Raffaelli L. An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications. *J Dent.* 2007;35(11):819-26.
2. Wille S, Lehmann F, Kern M. Durability of Resin Bonding to Lithium Disilicate and Zirconia Ceramic using a Self-etching Primer. *J Adhes Dent.* 2017;19(6):491-6.
3. Chen L, Suh BI, Brown D, Chen X. Bonding of primed zirconia ceramics: evidence of chemical bonding and improved bond strengths. *Am J Dent.* 2012;25(2):103-8.
4. Madfa A, Al-Sanabani F, Al-Qudami N, Al-Sanabani J, Amran A. Use of Zirconia in Dentistry: An Overview 2014.
5. Derand P, Derand T. Bond strength of luting cements to zirconium oxide ceramics. *Int J Prosthodont.* 2000;13(2):131-5.
6. Thompson JY, Stoner BR, Piascik JR, Smith R. Adhesion/cementation to zirconia and other non-silicate ceramics: where are we now? *Dent Mater.* 2011;27(1):71-82.
7. Della Bona A, Borba M, Benetti P, Cecchetti D. Effect of surface treatments on the bond strength of a zirconia-reinforced ceramic to composite resin. *Braz Oral Res.* 2007;21(1):10-5.
8. Lung CY, Matinlinna JP. Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry: an overview. *Dent Mater.* 2012;28(5):467-77.
9. Wolfart M, Lehmann F, Wolfart S, Kern M. Durability of the resin bond strength to zirconia ceramic after using different surface conditioning methods. *Dent Mater.* 2007;23(1):45-50.
10. Karan S, Buyukyilmaz T, Toroglu MS. Orthodontic bonding to several ceramic surfaces: are there acceptable alternatives to conventional methods? *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;132(2):144.e7-14.
11. Pandis N, Pandis BD, Pandis V, Eliades T. Occupational hazards in orthodontics: A review of risks and associated pathology. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;132(3):280-92.

12. Kimmich M, Stappert CF. Intraoral treatment of veneering porcelain chipping of fixed dental restorations: a review and clinical application. *J Am Dent Assoc.* 2013;144(1):31-44.
13. El-Mowafy O, Brochu JF. Longevity and clinical performance of IPS-Empress ceramic restorations--a literature review. *J Can Dent Assoc.* 2002;68(4):233-7.
14. Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res.* 2007;18 Suppl 3:86-96.
15. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater.* 2008;24(3):299-307.
16. Bona AD, Pecho OE, Alessandretti R. Zirconia as a Dental Biomaterial. *Materials (Basel, Switzerland).* 2015;8(8):4978-91.
17. Rimondini L, Cerroni L, Carrassi A, Torricelli P. Bacterial colonization of zirconia ceramic surfaces: an in vitro and in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2002;17(6):793-8.
18. Guess PC, Att W, Strub JR. Zirconia in fixed implant prosthodontics. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2012;14(5):633-45.
19. Zarone F, Russo S, Sorrentino R. From porcelain-fused-to-metal to zirconia: Clinical and experimental considerations. *Dental Materials.* 2011;27(1):83-96.
20. Hannink RHJ, Kelly PM, Muddle BC. Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J Am Ceram Soc.* 2000;83(3):461-87.
21. Vagkopoulou T, Koutayas S, Koidis P, Strub J. Zirconia in dentistry: Part 1. Discovering the nature of an upcoming bioceramic. *Eur J Esthet Dent.* 2009;4:130-51.
22. Swab JJ. Low temperature degradation of Y-TZP materials. *J Mater Sci.* 1991;26(24):6706-14.
23. Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial? *Biomaterials.* 2006;27(4):535-43.
24. Abduo J, Lyons K, Swain M. Fit of zirconia fixed partial denture: a systematic review. *J Oral Rehabil.* 2010;37(11):866-76.

25. Luthy H, Filser F, Loeffel O, Schumacher M, Gauckler LJ, Hammerle CH. Strength and reliability of four-unit all-ceramic posterior bridges. *Dent Mater.* 2005;21(10):930-7.
26. Sundh A, Molin M, Sjogren G. Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dent Mater.* 2005;21(5):476-82.
27. Tinschert J, Natt G, Mautsch W, Augthun M, Spiekermann H. Fracture resistance of lithium disilicate-, alumina-, and zirconia-based three-unit fixed partial dentures: a laboratory study. *Int J Prosthodont.* 2001;14(3):231-8.
28. Taskonak B, Griggs JA, Mecholsky JJ, Jr., Yan JH. Analysis of subcritical crack growth in dental ceramics using fracture mechanics and fractography. *Dent Mater.* 2008;24(5):700-7.
29. Corazza PH, de Castro HL, Feitosa SA, Kimpara ET, Della Bona A. Influence of CAD-CAM diamond bur deterioration on surface roughness and maximum failure load of Y-TZP-based restorations. *Am J Dent.* 2015;28(2):95-9.
30. Hjerpe J, Narhi T, Froberg K, Vallittu PK, Lassila LV. Effect of shading the zirconia framework on biaxial strength and surface microhardness. *Acta Odontol Scand.* 2008;66(5):262-7.
31. Della Bona A, Kelly JR. The clinical success of all-ceramic restorations. *J Am Dent Assoc.* 2008;139 Suppl:8s-13s.
32. Al-Amleh B, Lyons K, Swain M. Clinical trials in zirconia: a systematic review. *J Oral Rehabil.* 2010;37(8):641-52.
33. Benetti P, Della Bona A, Kelly JR. Evaluation of thermal compatibility between core and veneer dental ceramics using shear bond strength test and contact angle measurement. *Dent Mater.* 2010;26(8):743-50.
34. Aboushelib MN, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Effect of loading method on the fracture mechanics of two layered all-ceramic restorative systems. *Dental Materials.* 2007;23(8):952-9.
35. Sciasci P, Abi-Rached FO, Adabo GL, Baldissara P, Fonseca RG. Effect of surface treatments on the shear bond strength of luting cements to Y-TZP ceramic. *J Prosthet Dent.* 2015;113(3):212-9.

36. Ozcan M, Vallittu PK. Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. *Dent Mater*. 2003;19(8):725-31.
37. Sriamporn T, Thamrongananskul N, Busabok C, Poolthong S, Uo M, Tagami J. Dental zirconia can be etched by hydrofluoric acid. *Dent Mater J*. 2014;33:79-85.
38. Casucci A, Osorio E, Osorio R, Monticelli F, Toledano M, Mazzitelli C, et al. Influence of different surface treatments on surface zirconia frameworks. *J Dent*. 2009;37(11):891-7.
39. Tzanakakis EG, Tzoutzas IG, Koidis PT. Is there a potential for durable adhesion to zirconia restorations? A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2016;115(1):9-19.
40. Matinlinna JP, Heikkinen T, Ozcan M, Lassila LV, Vallittu PK. Evaluation of resin adhesion to zirconia ceramic using some organosilanes. *Dent Mater*. 2006;22(9):824-31.
41. Hallmann L, Ulmer P, Reusser E, Hämmerle CHF. Effect of blasting pressure, abrasive particle size and grade on phase transformation and morphological change of dental zirconia surface. *Surf Coat Technol*. 2012;206(19):4293-302.
42. Curtis AR, Wright AJ, Fleming GJ. The influence of surface modification techniques on the performance of a Y-TZP dental ceramic. *J Dent*. 2006;34(3):195-206.
43. Ohkuma K, Kazama M, Ogura H. The grinding efficiency by diamond points developed for yttria partially stabilized zirconia. *Dent Mater J*. 2011;30(4):511-6.
44. Kim HJ, Lim HP, Park YJ, Vang MS. Effect of zirconia surface treatments on the shear bond strength of veneering ceramic. *J Prosthet Dent*. 2011;105(5):315-22.
45. Rosenstiel SF, Land MF, Crispin BJ. Dental luting agents: A review of the current literature. *J Prosthet Dent*. 1998;80(3):280-301.
46. Hill EE. Dental cements for definitive luting: a review and practical clinical considerations. *Dent Clin North Am*. 2007;51(3):643-58, vi.
47. Anusavice KJ, Shen C, Rawls HR. *Phillips' Science of Dental Materials* 12 ed: Elsevier Health Sciences; 2013. p. 62-65.
48. O'Brien WJ. *Dental Materials and Their Selection*. 3 ed: Quintessence Publishing Company; 2002. p. 249-254.
49. Perdigao J, Lambrechts P, Van Meerbeek B, Braem M, Yildiz E, Yucel T, et al. The interaction of adhesive systems with human dentin. *Am J Dent*. 1996;9(4):167-73.

50. Sofan E, Sofan A, Palaia G, Tenore G, Romeo U, Migliau G. Classification review of dental adhesive systems: from the IV generation to the universal type. *Ann Stomatol (Roma)*. 2017;8(1):1-17.
51. Ferracane JL, Stansbury JW, Burke FJT. Self-adhesive resin cements – chemistry, properties and clinical considerations. *J Oral Rehabil*. 2011;38(4):295-314.
52. Retief DH, Sadowsky PL. Clinical experience with the acid-etch technique in orthodontics. *Am J Orthod*. 1975;68(6):645-54.
53. Giannini M, Soares CJ, de Carvalho RM. Ultimate tensile strength of tooth structures. *Dent Mater*. 2004;20(4):322-9.
54. Harris AM, Joseph VP, Rossouw E. Comparison of shear bond strengths of orthodontic resins to ceramic and metal brackets. *J Clin Orthod*. 1990;24(12):725-8.
55. Reynolds IR. A Review of Direct Orthodontic Bonding. *J Orthod*. 1975;2(3):171-8.
56. Abu Alhajja ES, Al-Wahadni AM. Shear bond strength of orthodontic brackets bonded to different ceramic surfaces. *Eur J Orthod*. 2007;29(4):386-9.
57. Falkensammer F, Jonke E, Bertl M, Freudenthaler J, Bantleon HP. Rebonding performance of different ceramic brackets conditioned with a new silane coupling agent. *Eur J Orthod*. 2013;35(1):103-9.
58. International Standards Organization. Technical specification 4049. Dentistry-Polymer-based restorative materials. Switzerland: International Standards Organization; 2009.
59. International Standards Organization. Technical specification 29022. Dentistry-Adhesion-Notched-edge shear bond strength test. Switzerland: International Standards Organization; 2013.
60. de Souza G, Hennig D, Aggarwal A, Tam LE. The use of MDP-based materials for bonding to zirconia. *J Prosthet Dent*. 2014;112(4):895-902.
61. Subasi MG, Demir N, Kara O, Ozturk AN, Ozel F. Mechanical properties of zirconia after different surface treatments and repeated firings. *J Adv Prosthodont*. 2014;6(6):462-7.
62. Piascik JR, Wolter SD, Stoner BR. Development of a novel surface modification for improved bonding to zirconia. *Dent Mater*. 2011;27(5):e99-105.

63. Kern M, Wegner SM. Bonding to zirconia ceramic: adhesion methods and their durability. *Dent Mater*. 1998;14(1):64-71.
64. Mirmohammadi H, Aboushelib MNM, Salameh Z, Feilzer AJ, Kleverlaan CJ. Innovations in bonding to zirconia based ceramics: Part III. Phosphate monomer resin cements. *Dent Mater*. 2010;26(8):786-92.
65. Lee JY, Ahn J, An SI, Park JW. Comparison of bond strengths of ceramic brackets bonded to zirconia surfaces using different zirconia primers and a universal adhesive. *Restor Dent Endod*. 2018;43(1):e7.
66. Byeon SM, Lee MH, Bae TS. Shear Bond Strength of Al(2)O(3) Sandblasted Y-TZP Ceramic to the Orthodontic Metal Bracket. *Materials (Basel)*. 2017;10(2).
67. Moon J-E, Kim S-H, Lee J-B, Han J-S, Yeo I-S, Ha S-R. Effects of airborne-particle abrasion protocol choice on the surface characteristics of monolithic zirconia materials and the shear bond strength of resin cement. *Ceramics International*. 2016;42(1, Part B):1552-62.
68. Lohbauer U, Zipperle M, Rischka K, Petschelt A, Muller FA. Hydroxylation of dental zirconia surfaces: characterization and bonding potential. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2008;87(2):461-7.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พลอยลดา วิทวัสพันธุ์
วัน เดือน ปี เกิด	10 เมษายน 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ปัจจุบัน	46/22 หมู่ 1 ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล บึงยี่โถ อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12130



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

ตารางที่ 7 ข้อมูลดิบกำลังแรงยึดเดือนของทุกกลุ่ม

CNU	CNT	CZU	CZT	SNU	SNT	SZU	SZT	RNU	RNT	RZU	RZT
2.73602	1.24593	3.10072	3.63668	3.11029	1.70708	4.9186	4.46184	4.00565	4.04476	8.19273	7.91202
2.9229	1.00908	3.96413	3.96579	3.32992	1.92791	4.32637	3.54897	5.04302	4.04603	8.18818	7.34893
4.0356	0.9784	3.95156	3.93826	3.41597	2.55611	3.8817	4.55781	5.2837	3.06757	9.88822	8.32004
2.34751	0.90499	3.83261	4.12866	3.02854	1.90324	4.80926	4.29511	4.50264	4.02557	7.28142	7.00385
2.99221	0.92797	3.72344	3.53671	3.13496	1.93874	3.6729	3.5849	4.23774	3.7974	6.91946	6.67067
2.98238	1.06204	3.85456	3.44665	2.99433	2.21914	3.99791	3.73797	3.96534	3.42981	7.85847	6.67109
2.58665	0.97009	4.24795	3.02255	4.01771	2.18906	3.73642	3.40373	5.29333	4.64342	8.02394	6.57434
2.72528	1.03376	2.88293	2.90467	4.36912	2.08496	3.62115	3.37296	4.1617	3.81671	9.8241	7.06419
3.21327	1.32258	3.29837	3.58479	3.30946	2.11083	5.00608	4.05198	4.18479	4.99127	8.85738	5.99542
3.75731	1.20863	4.08405	4.16841	3.57362	2.50677	3.89975	4.29929	5.50635	4.63325	8.25431	5.44256
Mean	3.029913	1.066347	3.694032	3.633317	3.428392	2.114384	3.931456	4.618426	4.049579	8.328821	6.900311
Sd	0.493	0.135	0.425	0.410	0.253	0.511	0.430	0.567	0.551	0.915	0.802

ตารางที่ 8 Tests of Normality

	surface treatment	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
shear bond strength	CNU	.229	10	.147	.916	10	.324
	CNT	.212	10	.200*	.895	10	.193
	CZU	.226	10	.158	.902	10	.233
	CZT	.159	10	.200*	.929	10	.440
	SNU	.211	10	.200*	.860	10	.077
	SNT	.148	10	.200*	.946	10	.626
	SZU	.237	10	.117	.853	10	.064
	SZT	.189	10	.200*	.897	10	.205
	RNU	.238	10	.116	.859	10	.075
	RNT	.202	10	.200*	.961	10	.795
	RZU	.231	10	.140	.923	10	.381
	RZT	.150	10	.200*	.979	10	.957

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

a. Lilliefors Significance Correction

ตารางที่ 9 Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Shear bond strength

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	411.525 ^a	11	37.411	118.414	.000
Intercept	1999.363	1	1999.363	6328.345	.000
mechanical	221.141	2	110.571	349.976	.000
chemical	127.471	1	127.471	403.469	.000
cementation	26.051	1	26.051	82.457	.000
mechanical * chemical	22.835	2	11.418	36.139	.000
mechanical * cementation	.325	2	.163	.515	.599
chemical * cementation	3.681	1	3.681	11.650	.001
mechanical * chemical * cementation	10.020	2	5.010	15.857	.000
Error	34.121	108	.316		
Total	2445.009	120			
Corrected Total	445.646	119			

a. R Squared = .923 (Adjusted R Squared = .916)

การปรับสภาพผิวเชิงกล

ตารางที่ 10 Test of Homogeneity of Variances

Shear bond strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.446	2	27	.021

ตารางที่ 11 Robust Tests of Equality of Means

Shear bond strength

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Welch	159.283	2	15.021	.000

a. Asymptotically F distributed.

ตารางที่ 12 Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Shear bond strength

	(I) Mechanical surface treatment	(J) Mechanical surface treatment	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	control	sandblast	-1.04803700*	.16940646	.000	-1.4680664	-.6280076
		roughened	-2.98323200*	.16940646	.000	-3.4032614	-2.5632026
	sandblast	control	1.04803700*	.16940646	.000	.6280076	1.4680664
		roughened	-1.93519500*	.16940646	.000	-2.3552244	-1.5151656
	roughened	control	2.98323200*	.16940646	.000	2.5632026	3.4032614
		sandblast	1.93519500*	.16940646	.000	1.5151656	2.3552244

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	Mechanical surface treatment	Mechanical surface treatment				Lower Bound	Upper Bound
Bonferroni	control	sandblast	-1.04803700*	.16940646	.000	-1.4804400	-.6156340
		roughened	-2.98323200*	.16940646	.000	-3.4156350	-2.5508290
	sandblast	control	1.04803700*	.16940646	.000	.6156340	1.4804400
		roughened	-1.93519500*	.16940646	.000	-2.3675980	-1.5027920
	roughened	control	2.98323200*	.16940646	.000	2.5508290	3.4156350
		sandblast	1.93519500*	.16940646	.000	1.5027920	2.3675980
Tamhane	control	sandblast	-1.04803700*	.09587685	.000	-1.3083310	-.7877430
		roughened	-2.98323200*	.18949303	.000	-3.5243061	-2.4421579
	sandblast	control	1.04803700*	.09587685	.000	.7877430	1.3083310
		roughened	-1.93519500*	.20247386	.000	-2.4916950	-1.3786950
	roughened	control	2.98323200*	.18949303	.000	2.4421579	3.5243061
		sandblast	1.93519500*	.20247386	.000	1.3786950	2.4916950
Games- Howell	control	sandblast	-1.04803700*	.09587685	.000	-1.2994348	-.7966392
		roughened	-2.98323200*	.18949303	.000	-3.5019530	-2.4645110
	sandblast	control	1.04803700*	.09587685	.000	.7966392	1.2994348
		roughened	-1.93519500*	.20247386	.000	-2.4717316	-1.3986584
	roughened	control	2.98323200*	.18949303	.000	2.4645110	3.5019530
		sandblast	1.93519500*	.20247386	.000	1.3986584	2.4717316

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 13 Test of Homogeneity of Variances

Shear bond strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.359	2	27	.274

ตารางที่ 14 ANOVA4

Shear bond strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13.661	2	6.831	24.698	.000
Within Groups	7.467	27	.277		
Total	21.128	29			

ตารางที่ 15 Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Shear bond strength

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	Mechanical surface treatment	Mechanical surface treatment					
		sandblast	-.39847900	.23518766	.226	-.9816074	.1846494
	roughened	-1.58851300*	.23518766	.000	-2.1716414	-1.0053846	
	sandblast	control	.39847900	.23518766	.226	-.1846494	.9816074
		roughened	-1.19003400*	.23518766	.000	-1.7731624	-.6069056
	roughened	control	1.58851300*	.23518766	.000	1.0053846	2.1716414
sandblast	1.19003400*	.23518766	.000	.6069056	1.7731624		

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	Mechanical surface treatment	Mechanical surface treatment				Lower Bound	Upper Bound
Bonferroni	control	sandblast	-.39847900	.23518766	.305	-.9987858	.2018278
		roughened	-1.58851300*	.23518766	.000	-2.1888198	-.9882062
	sandblast	control	.39847900	.23518766	.305	-.2018278	.9987858
		roughened	-1.19003400*	.23518766	.000	-1.7903408	-.5897272
	roughened	control	1.58851300*	.23518766	.000	.9882062	2.1888198
		sandblast	1.19003400*	.23518766	.000	.5897272	1.7903408
Tamhane	control	sandblast	-.39847900	.21714128	.230	-.9710226	.1740646
		roughened	-1.58851300*	.25065142	.000	-2.2493130	-.9277130
	sandblast	control	.39847900	.21714128	.230	-.1740646	.9710226
		roughened	-1.19003400*	.23656550	.000	-1.8174302	-.5626378
	roughened	control	1.58851300*	.25065142	.000	.9277130	2.2493130
		sandblast	1.19003400*	.23656550	.000	.5626378	1.8174302
Games- Howell	control	sandblast	-.39847900	.21714128	.187	-.9536881	.1567301
		roughened	-1.58851300*	.25065142	.000	-2.2293195	-.9477065
	sandblast	control	.39847900	.21714128	.187	-.1567301	.9536881
		roughened	-1.19003400*	.23656550	.000	-1.7979567	-.5821113
	roughened	control	1.58851300*	.25065142	.000	.9477065	2.2293195
		sandblast	1.19003400*	.23656550	.000	.5821113	1.7979567

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 16 Test of Homogeneity of Variances

Shear bond strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.973	2	27	.159

ตารางที่ 17 ANOVA

Shear bond strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	65.254	2	32.627	88.366	.000
Within Groups	9.969	27	.369		
Total	75.223	29			

ตารางที่ 18 Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Shear bond strength

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	Mechanical surface treatment	Mechanical surface treatment					
		sandblast	-.29813900	.27174457	.524	-.9719073	.3756293
	roughened	-3.26699400*	.27174457	.000	-3.9407623	-2.5932257	
	sandblast	control	.29813900	.27174457	.524	-.3756293	.9719073
		roughened	-2.96885500*	.27174457	.000	-3.6426233	-2.2950867
	roughened	control	3.26699400*	.27174457	.000	2.5932257	3.9407623
sandblast	2.96885500*	.27174457	.000	2.2950867	3.6426233		

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	Mechanical surface treatment	Mechanical surface treatment				Lower Bound	Upper Bound
Bonferroni	control	sandblast	-.29813900	.27174457	.847	-.9917558	.3954778
		roughened	-3.26699400*	.27174457	.000	-3.9606108	-2.5733772
	sandblast	control	.29813900	.27174457	.847	-.3954778	.9917558
		roughened	-2.96885500*	.27174457	.000	-3.6624718	-2.2752382
	roughened	control	3.26699400*	.27174457	.000	2.5733772	3.9606108
		sandblast	2.96885500*	.27174457	.000	2.2752382	3.6624718
Tamhane	control	sandblast	-.29813900	.19820497	.386	-.8197475	.2234695
		roughened	-3.26699400*	.30035434	.000	-4.0854330	-2.4485550
	sandblast	control	.29813900	.19820497	.386	-.2234695	.8197475
		roughened	-2.96885500*	.30337666	.000	-3.7924693	-2.1452407
	roughened	control	3.26699400*	.30035434	.000	2.4485550	4.0854330
		sandblast	2.96885500*	.30337666	.000	2.1452407	3.7924693
Games- Howell	control	sandblast	-.29813900	.19820497	.313	-.8040859	.2078079
		roughened	-3.26699400*	.30035434	.000	-4.0570475	-2.4769405
	sandblast	control	.29813900	.19820497	.313	-.2078079	.8040859
		roughened	-2.96885500*	.30337666	.000	-3.7643225	-2.1733875
	roughened	control	3.26699400*	.30035434	.000	2.4769405	4.0570475
		sandblast	2.96885500*	.30337666	.000	2.1733875	3.7643225

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 19 Test of Homogeneity of Variances

Shear bond strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.147	2	27	.136

ตารางที่ 20 ANOVA

Shear bond strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	129.596	2	64.798	136.571	.000
Within Groups	12.811	27	.474		
Total	142.407	29			

ตารางที่ 21 Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Shear bond strength

	(i) Mechanical surface treatment	(j) Mechanical surface treatment	Mean Difference (i-j)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	control	sandblast	-.49298200	.30804751	.263	-1.2567604	.2707964
		roughened	-4.63478900*	.30804751	.000	-5.3985674	-3.8710106
	sandblast	control	.49298200	.30804751	.263	-.2707964	1.2567604
		roughened	-4.14180700*	.30804751	.000	-4.9055854	-3.3780286
	roughened	control	4.63478900*	.30804751	.000	3.8710106	5.3985674
		sandblast	4.14180700*	.30804751	.000	3.3780286	4.9055854

	(I) Mechanical surface treatment	(J) Mechanical surface treatment	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Bonferroni	control	sandblast	-.49298200	.30804751	.363	-1.2792606	.2932966
		roughened	-4.63478900*	.30804751	.000	-5.4210676	-3.8485104
	sandblast	control	.49298200	.30804751	.363	-.2932966	1.2792606
		roughened	-4.14180700*	.30804751	.000	-4.9280856	-3.3555284
	roughened	control	4.63478900*	.30804751	.000	3.8485104	5.4210676
		sandblast	4.14180700*	.30804751	.000	3.3555284	4.9280856
Tamhane	control	sandblast	-.49298200	.22166666	.114	-1.0781475	.0921835
		roughened	-4.63478900*	.33663112	.000	-5.5591809	-3.7103971
	sandblast	control	.49298200	.22166666	.114	-.0921835	1.0781475
		roughened	-4.14180700*	.34960433	.000	-5.0879405	-3.1956735
	roughened	control	4.63478900*	.33663112	.000	3.7103971	5.5591809
		sandblast	4.14180700*	.34960433	.000	3.1956735	5.0879405
Games- Howell	control	sandblast	-.49298200	.22166666	.095	-1.0603407	.0743767
		roughened	-4.63478900*	.33663112	.000	-5.5261365	-3.7434415
	sandblast	control	.49298200	.22166666	.095	-.0743767	1.0603407
		roughened	-4.14180700*	.34960433	.000	-5.0560120	-3.2276020
	roughened	control	4.63478900*	.33663112	.000	3.7434415	5.5261365
		sandblast	4.14180700*	.34960433	.000	3.2276020	5.0560120

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

การปรับสภาพผิวทางเคมี

ตารางที่ 22 Independent Samples Test (CT)

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
Shear bond strength	6.943	.017	-17.806	18	.000	-2.56697000	.14416111	-2.8698412	-2.2640984	
Equal variances assumed										
Equal variances not assumed			-17.806	10.949	.000	-2.56697000	.14416111	-2.8844477	-2.2494922	



ตารางที่ 23 Independent Samples Test (CU)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.033	.858	-3.059	18	.007	-.66411900	.21707910	-1.12018527	-.20805273
	Equal variances not assumed			-3.059	17.623	.007	-.66411900	.21707910	-1.12088511	-.20735289



ตารางที่ 24 Independent Samples Test (ST)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	7.625	.013	-10.919	18	.000	-1.8170720	.16641860	-2.1667045	-1.4674394
	Equal variances not assumed			-10.919	14.579	.000	-1.8170720	.16641860	-2.1726781	-1.4614658



ตารางที่ 25 Independent Samples Test (SU)

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	1.255	.277	-3.421	18	.003	-.7586220	.22172755	-1.2244543	-.29278970
	Equal variances not assumed			-3.421	17.432	.003	-.7586220	.22172755	-1.2255449	-.29169901



ตารางที่ 26 Independent Samples Test (RT)

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
Shear bond strength	1.023	.325	-8.783	18	.000	-2.850732	.32455802	-3.5326031	-2.16886090	
			-8.783	15.963	.000	-2.850732	.32455802	-3.5388932	-2.16257077	



ตารางที่ 27 Independent Samples Test (RU)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.851	.368	-10.330	18	.000	-3.7103950	.35919815	-4.4650423	-2.9557476
	Equal variances not assumed			-10.330	15.027	.000	-3.7103950	.35919815	-4.4758860	-2.9449039



ชนิดของเรซินแอตซีซีฟ

ตารางที่ 27 Independent Samples Test (CN)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	6.368	.021	11.519	18	.000	1.963566	.1704663	1.605429	2.321702
	Equal variances not assumed			11.519	10.360	.000	1.963566	.1704663	1.585524	2.341607



ตารางที่ 27 Independent Samples Test (CZ)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.055	.817	.308	18	.762	.06071500	.19709639	-.35336915	.47479915
	Equal variances not assumed			.308	17.977	.762	.06071500	.19709639	-.35340696	.47483696



ตารางที่ 28 Independent Samples Test (SN)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	1.710	.207	7.955	18	.000	1.31400800	.16517848	.96698090	1.66103510
	Equal variances not assumed			7.955	14.668	.000	1.31400800	.16517848	.96124344	1.66677256



ตารางที่ 29 Independent Samples Test (SZ)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.468	.503	1.148	18	.266	.25555800	.22265294	-.21221846	.72333446
	Equal variances not assumed			1.148	17.490	.267	.25555800	.22265294	-.21319788	.72431388



ตารางที่ 30 Independent Samples Test (RN)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.617	.442	2.155	18	.045	.56884700	.26396017	.01428726	1.12340674
	Equal variances not assumed			2.155	17.986	.045	.56884700	.26396017	.01425567	1.12343833



ตารางที่ 31 Independent Samples Test (RZ)

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Shear bond strength	Equal variances assumed	.119	.734	3.520	18	.002	1.42851000	.40581554	.57592319	2.28109681
	Equal variances not assumed			3.520	17.692	.002	1.42851000	.40581554	.57485880	2.28216120

