

THE MICRO-TENSILE BOND STRENGTH BETWEEN PRECRYSTALLIZED LITHIUM DISILICATE CERAMICS AND RESIN CEMENT

Tannawat SAPKANTAKUL¹ and Putsadeeporn THAMMAJARUK¹

1 Department of Prosthetic Dentistry, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand

ARTICLE HISTORY

Received: 10 April 2026

Revised: 24 April 2026

Published: 16 May 2026

ABSTRACT

Objective: To compare the micro-tensile bond strength (μ TBS) of different precrystallized lithium disilicate ceramics bonded with resin cement before and after thermocycling. **Methods:** Two lithium disilicate blocks (size 16×14×4 mm³) were prepared for each of three CAD/CAM lithium disilicates: IPS e.max CAD, Amber Mill, and CEREC Tessera. The designated bonding surfaces were polished with abrasive paper. The blocks were then crystallized according to the manufacturers' instructions and ultrasonically cleaned with distilled water. The bonding surfaces were etched with 5% hydrofluoric acid and applied with primer (G-Multi PRIMER). Pairs of identical blocks were bonded using resin cement (G-Cem ONE). Each bonded block was sectioned into sticks with a cross-sectional area of 1.0 mm² (n = 20 per group) and stored in distilled water for 24 h. The specimens were then divided into two conditions: non-aged and aged (10,000 thermocycles). The μ TBS was measured, and the failure mode, and contact angle were evaluated. **Results:** The type of lithium disilicate material and thermocycling significantly affected the μ TBS. Thermocycling significantly decreased bond strength across all materials tested. IPS e.max CAD exhibited the highest μ TBS values under both aging conditions. Hydrofluoric acid treatment significantly improved surface wettability across all groups. Adhesive failure was the most frequently observed failure mode. **Conclusion:** The bond strength between lithium disilicate ceramics and resin cement was significantly affected by the ceramic material and aging conditions. IPS e.max CAD exhibited the highest bond strength. Thermocycling significantly decreased bond strength across all groups.

Keywords: Micro-Tensile Bond Strength, Precrystallized Lithium Disilicate, Thermocycling, Wettability, Failure Mode

CITATION INFORMATION: Sapkantakul, T., & Thammajaruk, P. (2026). The Micro-Tensile Bond Strength between Precrystallized Lithium Disilicate Ceramics and Resin Cement. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 4(5), 41

ความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณกับเรซินซีเมนต์

ฐานวัฒน์ ทรัพย์กันตาทกุล¹ และ ศุภติพร ธรรมจาริก¹

1 ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค (μ TBS) ระหว่างลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณหลายชนิดกับเรซินซีเมนต์ ทั้งก่อนและหลังผ่านการจำลองอายุการใช้งาน **วิธีการ:** เตรียมลิเทียมไดซิลิเกต (IPS e.max CAD, Amber Mill และ CEREC Tessera) ขนาด 16 x 14 x 4 มม.³ ยี่ห่อละ 2 บล็อก นำมาขัดกระดาษทราย เฝ้าตามคำแนะนำบริษัท และทำความสะอาด แล้วกัดผิวด้วยกรด ไฮโดรฟลูออริก 5 % ทาไพรเมอร์ (G-Multi PRIMER) ยึดกับด้วยเรซินซีเมนต์ (G-Cem ONE) แล้วตัดเป็นแท่งพื้นที่หน้าตัด 1 มม.² เก็บในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งเป็นกลุ่มไม่ผ่านและกลุ่มผ่านการจำลองอายุการใช้งาน (10,000 รอบ) แล้ววัดค่า μ TBS รูปแบบความล้มเหลว และความสามารถในการเปียกผิว **ผลการวิจัย:** ชนิดของลิเทียมไดซิลิเกตและการจำลองอายุการใช้งานมีผลต่อค่า μ TBS อย่างมีนัยสำคัญ การจำลองอายุการใช้งานทำให้ค่า μ TBS ลดลง โดย IPS e.max CAD แสดงค่า μ TBS สูงสุดทั้งสองสภาวะ การเตรียมผิวด้วยไฮโดรฟลูออริกช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกผิว และพบความล้มเหลวแบบยึดติดมากที่สุด **สรุป:** ความแข็งแรงยึดติดขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและการจำลองอายุการใช้งาน โดย IPS e.max CAD แสดงค่า μ TBS สูงสุด และการจำลองอายุการใช้งานทำให้ค่า μ TBS ลดลง

คำสำคัญ: ความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค, ลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ, การจำลองอายุการใช้งาน, ความสามารถในการเปียกผิว, รูปแบบความล้มเหลว

ข้อมูลอ้างอิง: ฐานวัฒน์ ทรัพย์กันตาทกุล และ ศุภติพร ธรรมจาริก. (2569). ความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณกับเรซินซีเมนต์. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 4(5), 41

บทนำ

ปัจจุบันลิเทียมไดซิลิเกตเป็นวัสดุบูรณะทางทันตกรรมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสวยงาม ความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี และมีความแข็งแรงสูงมากกว่าวัสดุในกลุ่มเฟลด์สปาทิกพอร์ซเลนและลูไซต์เสริมความแข็งแรง (Ritzberger et al., 2010) จึงเหมาะต่อการใช้เป็นวัสดุบูรณะทั้งด้านความสวยงามและการใช้งาน โดยจากการศึกษาท่อน้ำลายลิเทียมไดซิลิเกตของ IPS e.max CAD เป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างคล้ายเข็ม (van Noort, 2002) มีความหนาแน่นของผลึกในเซรามิกประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร แต่ผลึกชนิดนี้ไม่ได้ทำให้ความโปร่งแสงของเซรามิกเสียไป เนื่องจากผลึกมีดัชนีการหักเหของแสงใกล้เคียงกับดัชนีการหักเหของแสงของกลาสเมทริกซ์ (Qualtrough & Piddock, 2002)

ต่อมาได้มีการผลิตแท่งเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตแบบกึ่งขึ้นรูปมา โดยอาศัยระบบแคดแคมในการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งมีหลากหลายแบบ ทั้งแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ (pre-crystallized block) เป็นผลึกลิเทียมเมตเตซิลิเกต (lithium metasilicate) ซึ่งมีความนิ่มลื่นง่าย หลังกลึงแล้วถูกเผาอีกรอบจึงเกิดผลึกสมบูรณ์กลายเป็นสีเหมือนฟัน และมีแบบที่มีสีเหมือนฟันอยู่แล้วแต่ต้องนำมาเผาเพิ่มหลังกลึง อีกทั้งยังมีแบบที่เกิดผลึกสมบูรณ์แล้ว (fully-crystallized block) ที่จะมีสีเหมือนฟันและไม่จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนหลังกลึง ซึ่งแต่ละยี่ห้อมีส่วนประกอบและลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน (Phark & Duarte, 2022) นอกจากนี้เพื่อให้ชิ้นงานมีความคงทน การยัดติดลิเทียมไดซิลิเกตจำเป็นต้องใช้เรซินซีเมนต์ร่วมกับการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) และไซเลน (silane) เพื่อสร้างการยึดติดทั้งทางกลและทางเคมี (Tian et al., 2014; Matinlinna et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีลิเทียมไดซิลิเกตหลากหลายยี่ห้อ ซึ่งแต่ละยี่ห้อมีส่วนประกอบและลักษณะโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน ทั้งนี้การศึกษาค้นคว้าของชนิดลิเทียมไดซิลิเกตต่อค่าความแข็งแรงยึดติดยังมีน้อย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์หลายชนิดกับเรซินซีเมนต์ ทั้งก่อนและหลังการจำลองสภาวะในช่องปากด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นแบบเป็นจังหวะ (thermocycling)

การทบทวนวรรณกรรม

ลิเทียมไดซิลิเกต (lithium disilicate)

ลิเทียมไดซิลิเกตเป็นวัสดุเซรามิกที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานทันตกรรมตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1950 (Saint-Jean, 2014) และได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ด้วยการเข้ามาของระบบแคดแคม (CAD/CAM) ซึ่งช่วยลดขั้นตอนและเพิ่มความรวดเร็วในการผลิตชิ้นงาน (Spitznagel et al., 2018) ปัจจุบันมีทั้งแบบแท่งก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ เช่น IPS e.max CAD, Amber Mill และมีแบบที่เป็นสีเหมือนฟันอยู่แล้ว แต่อาจจะต้องเผาเพิ่มหลังกลึง เช่น CEREC Tessera และมีแบบแท่งที่เกิดผลึกสมบูรณ์แล้วพร้อมใช้งาน ไม่จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนหลังกลึง เช่น nIce, Initial LiSi block และ Amber mill direct ซึ่งแต่ละยี่ห้อมีส่วนประกอบและลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน (Phark & Duarte, 2022) ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นผลึกรูปเข็มของ IPS e.max CAD หรือผลึกที่มีการผสมลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกตของ CEREC Tessera ล้วนส่งผลต่อการตอบสนองต่อการเตรียมพื้นผิวและความแข็งแรงยึดติดกับเรซินซีเมนต์ (Alhomud et al., 2023; Tian et al., 2014) ซึ่งความแข็งแรงยึดติดระหว่างวัสดุลิเทียมไดซิลิเกตและเรซินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งวิธีการปรับสภาพพื้นผิว ความสามารถของเรซินซีเมนต์ในการไหลแผ่เพื่อยึดติดกับพื้นผิวของวัสดุ ความหยาบของพื้นผิววัสดุ ส่วนประกอบและชนิดของเรซินซีเมนต์ (Tian et al., 2014)

การเตรียมพื้นผิวลิเทียมไดซิลิเกตเพื่อให้เกิดการยึดติดที่ดีกับเรซินซีเมนต์

การยึดติดระหว่างลิเทียมไดซิลิเกตและเรซินซีเมนต์ให้ประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องอาศัยการเตรียมพื้นผิวทั้งทางกลและทางเคมีร่วมกัน (Tian et al., 2014) ในด้านการเตรียมผิวเชิงกล วิธีที่ได้รับการยอมรับและแนะนำมากที่สุดคือการใช้กรดไฮโดรฟลูออริก เนื่องจากกรดสามารถละลายกลาสเฟสบนผิวเซรามิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ สร้างความขรุขระที่เหมาะสมต่อการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาคได้ดีกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีอื่น (Sağlam et al., 2023; Lu, Bierman et al.,

2024) นอกจากการเตรียมผิวเชิงกลแล้ว การเตรียมผิวทางเคมีด้วยการทำไฮเลนยังเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างเซรามิกและเรซินซีเมนต์ อีกทั้งยังช่วยลดมุมสัมผัสและเพิ่มความสามารถในการเปียกของพื้นผิวเซรามิก (Matinlinna et al., 2018; Meng et al., 2011)

เรซินซีเมนต์ (resin cement)

เรซินซีเมนต์มีองค์ประกอบคล้ายวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เมทริกซ์อินทรีย์ (organic matrix), สารเติมอนินทรีย์ (inorganic fillers) และสารเชื่อมประสาน (coupling agents) ข้อแตกต่างสำคัญคือเรซินซีเมนต์จะลดสัดส่วนสารเติมอนินทรีย์ลงเมื่อเทียบกับเรซินคอมโพสิต เพื่อให้มีความหนืดต่ำและชั้นฟิล์มบาง แนบสนิทกับขอบชิ้นงานได้ดี (Tian et al., 2014) มีความเหมาะสมในการยึดลิเทียมไดซิลิเกตสูงกว่าซีเมนต์ชนิดอื่น (Bernal et al., 1993) เนื่องจากเรซินซีเมนต์สามารถไหลซึมเข้ารูพรุน สร้างพันธะที่สมบูรณ์ ช่วยลดแรงดึงในวัสดุและเพิ่มความทนทานต่อการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญ (Groten & Pröbster, 1997; Behr et al., 2003) อีกทั้งยังละลายตัวต่ำ ป้องกันการรั่วซึม และให้ความสวยงามเป็นธรรมชาติ (Gu & Kern, 2003; Paul, 1997))

ภาวะเสื่อมสภาพ (aging) ของลิเทียมไดซิลิเกต

ภาวะเสื่อมสภาพคือกระบวนการที่ทดสอบวัสดุภายใต้สภาวะต่างๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยจำลองผลกระทบของสภาวะแวดล้อมในช่องปาก เพื่อประเมินความทนทาน (durability) และความเสถียรของแรงยึดติดในระยะยาวที่อาจเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในสภาพแวดล้อมของช่องปากทำได้หลายวิธี เช่น การรับแรงทางกล (mechanical loading) เพื่อจำลองแรงบดเคี้ยว, การสัมผัสกับของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำลาย และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยการสลับไปมาระหว่างอุณหภูมิร้อนและเย็นเพื่อเลียนแบบสภาวะภายในช่องปาก (Teixeira et al., 2021; Vilde et al., 2022) โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการสร้างความเครียดทางกล (mechanical stress) จากการเปลี่ยนแปลงทางมิติ (dimensional changes) ซึ่งมักกำหนดที่ 10,000 รอบ เพื่อให้เทียบเท่ากับอายุการใช้งานในช่องปากประมาณ 1 ปี (Gale & Darvell, 1999)

การวัดความแข็งแรงยึดติดระหว่างวัสดุลิเทียมไดซิลิเกตกับเรซินซีเมนต์

การวัดความแข็งแรงยึดติดสามารถทดสอบได้ทั้งแบบระดับมหภาค (macro-test) หรือระดับจุลภาค (micro-test) ขึ้นกับขนาดของพื้นที่ยึดติด ถ้าประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตรหรือน้อยกว่าจะเป็นการทดสอบระดับจุลภาค (Tian et al., 2014) โดยคำนวณจากสูตรแรงที่มากที่สุด (maximum force) หารด้วยพื้นที่ยึดติด โดยมี ISO 11405 กำหนดแนวทางในการทดสอบความแข็งแรงยึดติดไว้

การทดสอบแบบเฉือน (Shear) และเฉือนระดับจุลภาค (Micro-shear) แม้จะทำได้ง่ายแต่มีปัญหาเรื่องการกระจายแรงที่ไม่สม่ำเสมอและความเสี่ยงจากการเกิดรอยร้าวขณะเตรียมชิ้นงาน (El Mourad, 2018; Tian et al., 2014) ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค (Micro-tensile bond strength test) จึงเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการทดสอบรอยต่อระหว่างเรซินซีเมนต์กับ ลิเทียมไดซิลิเกต (Marocho et al., 2013) เนื่องจากใช้ชิ้นงานขนาดเล็ก (≤ 1 ตารางมิลลิเมตร) ทำให้กระจายความเค้นได้สม่ำเสมอ และลดโอกาสการแตกหักภายในเนื้อวัสดุได้ดี (Tian et al., 2014; El Mourad, 2018)

สมมติฐานการวิจัย

- 1) ค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเรซินซีเมนต์และลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน
- 2) ค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเรซินซีเมนต์และลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ทั้งก่อนและหลังการผ่านสภาวะจำลองการใช้งานในช่องปากด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นแบบเป็นจังหวะมีค่าไม่แตกต่างกัน

วิธีการวิจัย

เตรียมชิ้นงานจากแท่งแคลคียมลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ 3 ชนิดกลุ่ม ได้แก่ IPS e.max CAD, Amber Mill และ CEREC Tessera ขนาด 18 x 14 x 12 ลูกบาศก์มิลลิเมตร แล้วทำการตัดแบ่งเป็นแท่งขนาด 16 x 14 x 4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ขัดด้านที่จะทำการยึดติดด้วยกระดาษทรายความละเอียด 400, 600, 800, 1200 ตามลำดับ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเผาตามคำแนะนำบริษัทผู้ผลิตและทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโดยใช้น้ำกลั่น หลังจากผ่านการเตรียมชิ้นงานลิเทียมไดซิลิเกตแล้ว นำแท่งลิเทียมไดซิลิเกต 2 ชิ้นในกลุ่มเดียวกันมากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 20 วินาที ยกเว้น CEREC Tessera ที่กัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 30 วินาที ตามที่บริษัทกำหนด จากนั้นทำความสะอาดด้วยการเป่าล้างด้วยสเปรย์น้ำและลม (air-water spray) และเป่าแห้ง แล้วทา G-Multi PRIMER ที่มีไซเลน จากนั้นยึดประกบกันด้วยเรซินซีเมนต์ (G-Cem ONE™) โดยให้แรงกดคงที่ขนาด 750 กรัม แล้วฉายแสงเป็นเวลา 20 วินาทีต่อตำแหน่ง ทั้งหมด 4 ด้านของ ลิเทียมไดซิลิเกต จากนั้นนำชิ้นงานลิเทียมไดซิลิเกตที่ยึดเรซินซีเมนต์แล้วมาตัดเป็นชิ้นตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นแท่งพื้นที่หน้าตัด 1.0x1.0 ตารางมิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน (Buehler, ISOMET 4000) ความเร็วรอบต่ำ 400 รอบต่อนาที อัตราป้อน 1.2 มิลลิเมตรต่อนาที และเปิดน้ำหล่อระหว่างตัดชิ้นงาน

นำชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 3 กลุ่ม กลุ่มละ 20 ชิ้น แช่น้ำกลั่นและวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นสุ่มและแบ่งชิ้นตัวอย่างในแต่ละกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มย่อยละ 10 ชิ้น โดยแบ่งเป็นกลุ่มไม่ผ่านการจำลองอายุการใช้งานในช่องปากซึ่งนำไปทดสอบทันที และกลุ่มผ่านการจำลองอายุการใช้งานในช่องปาก โดยจะนำชิ้นตัวอย่างผ่านเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบร้อนเย็นเป็นจังหวะ (thermocycler) 10,000 รอบ ระหว่างอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส (± 2 องศาเซลเซียส) และ 55 องศาเซลเซียส (± 2 องศาเซลเซียส) แช่รอบละ 30 วินาที และระยะพัก 10 วินาที

หลังจากผ่านขั้นตอนการจำลองอายุการใช้งานในช่องปากแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (LRX-Plus) ด้วยความเร็วหัวทดสอบ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแตกหัก บันทึกแรงยึดติดเป็นหน่วย นิวตัน หาค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค ดังสมการ $\mu\text{TBS} = F/A$

โดย μTBS คือ ค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค หน่วยเมกะปาสคาล (MPa)

F คือ แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหักออกจากกันหน่วย นิวตัน (N)

A คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง หน่วยตารางมิลลิเมตร (mm^2)

จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่แตกหัก ส่องดูที่กล้องขยาย 80 และ 120 เท่า เพื่อระบุลักษณะรูปแบบของการแตกหัก ดังนี้

รูปแบบ 1: ความล้มเหลวแบบยึดติดโดยเกิดระหว่างรอยต่อของเรซินซีเมนต์และลิเทียมไดซิลิเกต ร้อยละ 80 ถึง 100

รูปแบบ 2: ความล้มเหลวแบบเชื่อมแน่น

รูปแบบ 2.1: ความล้มเหลวแบบเชื่อมแน่นโดยเกิดภายในลิเทียมไดซิลิเกต ร้อยละ 80 ถึง 100

รูปแบบ 2.2: ความล้มเหลวแบบเชื่อมแน่นโดยเกิดภายในเรซินซีเมนต์ ร้อยละ 80 ถึง 100

รูปแบบ 3: ความล้มเหลวแบบผสมโดยพบทั้งความล้มเหลวแบบยึดติดและแบบเชื่อมแน่นในชิ้นตัวอย่างเดียวกัน

การทดสอบความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) ก่อนและหลังกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

เพื่อประเมินคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) ทำการเตรียมตัวอย่างเพิ่มเติมโดยมีการขัดและเผาตามขั้นตอนตาม แต่ละกลุ่มทดลอง กลุ่มละ 1 ชิ้น โดยมีขนาด $16 \times 14 \times 2 \text{ mm}^3$ สำหรับการวัดค่ามุมสัมผัส (contact angle) โดยใช้เครื่อง goniometer ทำการวัดบนพื้นผิวตัวอย่างแต่ละชิ้นใน 3 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยการหยดน้ำกลั่นปริมาตร 2 μL ลงบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดค่ามุมสัมผัสหลังผ่านไป 5 วินาที และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์

การศึกษาลักษณะผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (SU3900) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เพื่อดูลักษณะโครงสร้างผลึกของลิเทียมไดซลิเกตแต่ละชนิดหลังกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกในแต่ละกลุ่ม กลุ่มละ 1 ชิ้น

การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคมาวิเคราะห์ด้วยสถิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ SPSS (IBM SPSS statistics V29.0, IBM Corp., NY, USA) ตรวจสอบการแจกแจงข้อมูลแบบปกติด้วย Shapiro-Wilk test พบว่าข้อมูลแจกแจงเป็นปกติ และตรวจสอบด้วย Levene's test พบความแปรปรวนเท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 จึงวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคด้วยสถิติ Two-way ANOVA ตามด้วย One-way ANOVA และทำการทดสอบ Post-hoc multiple comparison ด้วย Tukey HSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ผลการวิจัย

ความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค

ตารางที่ 1 แสดงค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคของกลุ่มตัวอย่างในสภาวะที่ต่างกัน

กลุ่ม	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาค (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานSD)	
	ไม่ผ่านการจำลองอายุการใช้งาน	ผ่านการจำลองอายุการใช้งาน
IPS e.max CAD	63.67 (3.26) ^{a,*}	49.39 (3.22) ^{A,**}
Amber Mill	53.14 (3.10) ^{b,*}	41.75 (4.47) ^{B,**}
CEREC Tessera	56.50 (3.86) ^{b,*}	41.78 (3.56) ^{B,**}

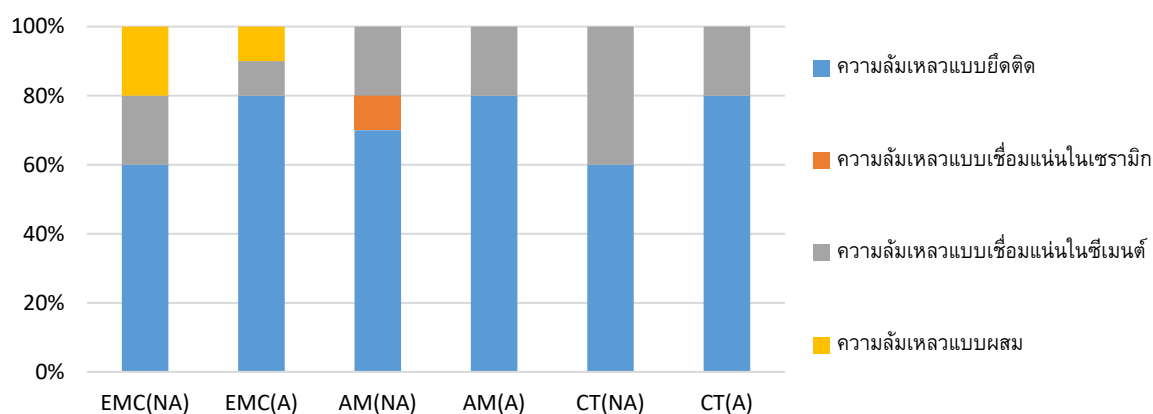
a-b: ตัวอักษรเดียวกันบ่งชี้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในสภาวะไม่ผ่านการจำลองอายุการใช้งาน;

A-B: ตัวอักษรเดียวกันบ่งชี้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในสภาวะผ่านการจำลองอายุการใช้งาน;

*,** บ่งชี้ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสภาวะที่ต่างกันในกลุ่มเซรามิกชนิดเดียวกัน

ชนิดของวัสดุลิเทียมไดซลิเกตและการจำลองอายุการใช้งานมีผลต่อค่าความแข็งแรงยึดติดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย IPS e.max CAD ให้ค่าความแข็งแรงยึดติดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทั้งสองสภาวะ นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นเป็นจังหวะ

การวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวหลังการแตกหัก



ภาพที่ 1 แสดงสัดส่วนของรูปแบบความล้มเหลวหลังการแตกหัก

EMC แทนกลุ่ม IPS e.max CAD, AM แทนกลุ่ม Amber Mill, CT แทนกลุ่ม CEREC Tessera, NA แทนกลุ่มที่ไม่ผ่านการจำลองอายุการใช้งานในช่องปาก, A แทนกลุ่มที่ผ่านการจำลองอายุการใช้งานในช่องปาก พบความล้มเหลวทุกรูปแบบ แต่พบความล้มเหลวแบบยึดติดมากที่สุด โดยหลังการจำลองอายุการใช้งานในช่องปากมีแนวโน้มเพิ่มสัดส่วนของความล้มเหลวแบบยึดติดเล็กน้อย

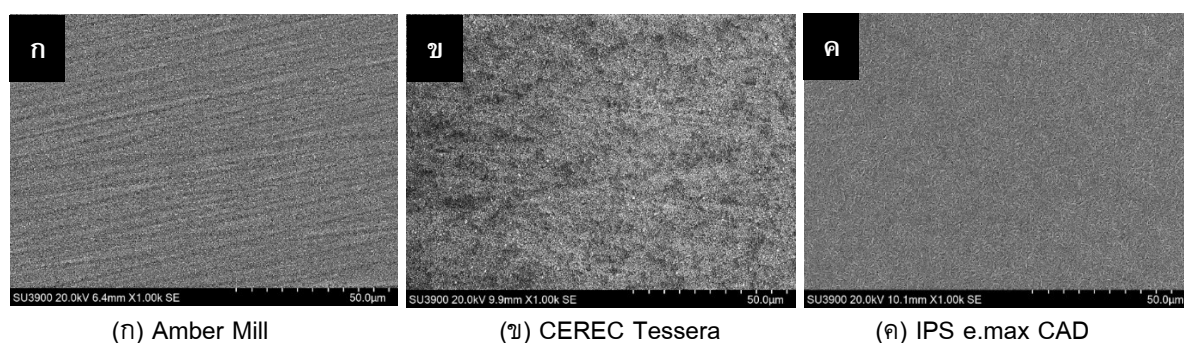
ความสามารถในการเปียกผิวของลิเทียมไดซิลิเกต

การทดสอบความสามารถในการเปียกผิวของลิเทียมไดซิลิเกตโดยการทดสอบค่ามุมสัมผัส พบว่าในทุกกลุ่มทดสอบของลิเทียมไดซิลิเกต การเตรียมพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แสดงถึงการเพิ่มความสามารถในการเปียกของพื้นผิวลิเทียมไดซิลิเกต โดย CEREC Tessera มีค่ามุมสัมผัสต่ำที่สุดทั้งก่อนและหลัง เตรียมพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งบ่งชี้ว่ามีพื้นผิวที่เปียกได้ง่ายที่สุด ขณะที่ IPS e.max CAD มีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุดในกลุ่มควบคุม แต่ลดลงอย่างมากหลังเตรียมผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

ตารางที่ 2 แสดงผลค่ามุมสัมผัส

กลุ่ม	การเตรียมพื้นผิว	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัส (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
IPS e.max CAD	ควบคุม	47.13° (1.68)
	กรดไฮโดรฟลูออริก	13.51° (0.97)
Amber Mill	ควบคุม	32.55° (0.26)
	กรดไฮโดรฟลูออริก	19.14° (1.63)
CEREC Tessera	ควบคุม	10.21 ° (0.12)
	กรดไฮโดรฟลูออริก	7.09 ° (1.12)

โครงสร้างผลึกของลิเทียมไดซิลิเกต



ภาพที่ 2 โครงสร้างผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตแต่ละกลุ่มหลังเตรียมพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตแต่ละชนิดหลังกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก พบความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มชัดเจนโดย Amber Mill มีลักษณะผลึกเป็นรูปเข็มหรือแท่งที่มีขนาดเล็กและสันกระจายตัวเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและละเอียดมากทั่วทั้งพื้นผิว ดูมีความสม่ำเสมอสูงและแทบไม่เห็นช่องว่างขนาดใหญ่ของกลาสมเมทริกซ์ ส่วน CEREC Tessera โครงสร้างผลึกมีขนาดเล็กและมีลักษณะเกาะกลุ่มกันแบบหลวมๆ ทำให้พื้นผิวดูมีความขรุขระแบบละเอียดคล้ายรูปพรุนเล็กๆ กระจายตัวอยู่ทั่วกลาสมเมทริกซ์ ขณะที่ IPS e.max CAD โครงสร้างผลึกมีลักษณะเป็นรูปแท่งยาวคล้ายเข็ม โดยผลึกเหล่านี้เรียงตัวสานไขว้กันไปมาคล้ายร่างแหอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิว

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคระหว่างเรซินซีเมนต์และ ลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์หลายชนิด ทั้งก่อนและหลังผ่านสภาวะจำลองการใช้งานในช่องปากด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นแบบเป็นจังหวะ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถปฏิเสธสมมติฐานการวิจัยข้อ 1 และ 2 กล่าวคือ ความแตกต่างของชนิดเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตแบบก่อนเกิดผลึกสมบูรณ์ส่งผลกระทบบต่อค่าความแข็งแรงยึดติดอย่างมีนัยสำคัญ ตลอดจนกระบวนการจำลองอายุการใช้งานก็ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงยึดติดลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกกลุ่มวัสดุเช่นกัน

ความแตกต่างของชนิดลิเทียมไดซิลิเกตส่งผลต่อค่าความแข็งแรงยึดติดอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่ม IPS e.max CAD ให้ค่าความแข็งแรงยึดติดสูงสุดทั้งก่อนและหลังการจำลองอายุการใช้งาน เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกคล้ายเข็ม และเรียงตัวสานกันไปมาคล้ายร่างแห จึงสามารถสร้างพื้นที่ยึดติดเชิงกลที่มีคุณภาพ ทำให้สามารถยึดติดกับเรซินซีเมนต์ได้ดี ขณะที่ Amber Mill และ CEREC Tessera ให้ค่าความแข็งแรงยึดติดต่ำในทั้งสองสภาวะ ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก Amber Mill มีลักษณะโครงสร้างผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 ไมครอน (Alhomuod et al., 2023) ผลึกที่มีโครงสร้างขนาดเล็กนี้อาจไม่สามารถสร้างร่างแหความขรุขระที่มีความแข็งแรงมากพอที่จะรองรับแรงยึดติดทางกล และสำหรับ CEREC Tessera มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กจำนวนมากรวมถึงผลึกลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกต (virgillite) ซึ่งอาจทำให้การกัดกร่อนของไฮโดรฟลูออริกเกิดลักษณะที่แตกต่างออกไป หรือทำให้พื้นผิวกลาสเมทริกซ์ที่เหลืออยู่ไม่แข็งแรงพอที่จะทนต่อแรงดึงในระดับสูงได้เมื่อเทียบกับ IPS e.max CAD

นอกจากโครงสร้างและขนาดของผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตที่แตกต่างกันในแต่ละยี่ห้อแล้ว อีกปัจจัยที่สำคัญ คือ การเตรียมพื้นผิวของลิเทียมไดซิลิเกตเพื่อทำการยึดติด จากการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการเตรียมพื้นผิวด้วยกรด ไฮโดรฟลูออริก พบค่ามุมสัมผัสดลงในทุกกลุ่ม แสดงถึงการเพิ่มความสามารถในการเปียกของพื้นผิวลิเทียมไดซิลิเกต ส่งผลให้เรซินซีเมนต์แทรกซึมเข้าสู่พื้นผิวเซรามิกได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาค (Tian et al., 2014) โดยกลุ่ม CEREC Tessera มีค่ามุมสัมผัสต่ำที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการเปียกผิวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น อาจเป็นผลมาจากระยะเวลาในการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกที่นานกว่า เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการละลายของ glass matrix มากขึ้น และเพิ่มความขรุขระของพื้นผิว ส่งผลให้ของเหลวสามารถไหลแผ่ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวไม่สามารถอธิบายได้จากระยะเวลาในการกัดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของวัสดุ CEREC Tessera มีผลต่อการตอบสนองต่อกรด ไฮโดรฟลูออริกแตกต่างจากวัสดุอื่น อีกทั้งการศึกษานี้ไม่ได้ใช้ระยะเวลาในการกัดเท่ากันในทุกกลุ่ม จึงไม่สามารถแยกผลของระยะเวลาในการกัดออกจากอิทธิพลของชนิดวัสดุได้ อย่างไรก็ตามแม้กลุ่ม CEREC Tessera มีค่ามุมสัมผัสต่ำที่สุด แต่กลับไม่ได้มีค่าความแข็งแรงยึดติดสูงสุด แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการเปียกเพียงอย่างเดียวไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่กำหนดประสิทธิภาพของแรงยึดติดทั้งหมด แต่โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของกลาสเมทริกซ์มีบทบาทสำคัญเช่นกัน

สำหรับการจำลองอายุการใช้งาน โดยผ่านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบร้อนเย็นเป็นจังหวะ 10,000 รอบ ซึ่งเทียบเท่าการใช้งานจริงในช่องปาก 1 ปี (Gale & Darvell, 1999) พบว่า ค่าความแข็งแรงยึดติดในทุกกลุ่มวัสดุมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้าของ Alhomuod et al. (2023) ซึ่งรายงานว่า กระบวนการเสื่อมสภาพของชั้นยึดติดอาจเกิดจากการดูดซึมน้ำและการเสื่อมสภาพจากการสลายตัวของน้ำของเรซินซีเมนต์ รวมถึงความเครียดจากอุณหภูมิที่เกิดจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างเซรามิกและเรซินซีเมนต์ นอกจากนี้การอ่อนตัวและการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของชั้นไฮไลต์ที่บริเวณรอยต่อก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้แรงยึดติดหลังผ่านการจำลองอายุการใช้งานมีค่าลดลง (Matinlinna et al., 2018; Vilde et al., 2022) นอกจากนี้หลังการจำลองอายุการใช้งานพบสัดส่วนของความล้มเหลวแบบยึดติดเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่ม บ่งชี้ว่ากระบวนการเสื่อมสภาพมีผลลดความแข็งแรงยึดติด (Alhomuod et al., 2023)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังคงมีข้อจำกัดบางประการ การศึกษานี้ศึกษาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานในช่องปาก อย่างไรก็ตามในช่องปากยังมีแรงกดเคี้ยวที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงควรศึกษาผลจากการรับแรงกดเคี้ยวร่วมด้วย เพื่อให้วัสดุอยู่ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับในช่องปากมากขึ้น นอกจากนี้ควรมีการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณหรือการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction เพื่อระบุสัดส่วนของเฟสผลึกและกลาสมเมทริกซ์ที่แน่นอน เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างขนาด การเรียงตัวของผลึกและองค์ประกอบทางเคมี ต่อกลไกการยึดติดของวัสดุเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตแต่ละชนิดอย่างชัดเจน

สรุปผลการวิจัย

ชนิดของเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่แตกต่างกัน มีผลต่อค่าความแข็งแรงแรงยึดติด โดยกลุ่มวัสดุ IPS e.max CAD ให้ค่าความแข็งแรงแรงยึดติดสูงที่สุด ทั้งในสภาวะก่อนและหลังการจำลองอายุการใช้งาน

การจำลองสภาวะการใช้งานในช่องปากด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นแบบเป็นจังหวะจำนวน 10,000 รอบ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงแรงยึดติดแบบดึงระดับจุลภาคลดลงอย่างมีนัยสำคัญในเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตทุกกลุ่ม การเตรียมพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกผิว โดยลดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตได้ในทุกกลุ่ม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการไหลแผ่ของเรซินซีเมนต์

รูปแบบความล้มเหลวหลังการแตกหักที่พบมากที่สุดในการทดสอบคือ ความล้มเหลวแบบยึดติด บ่งชี้ว่า ค่าความแข็งแรงแรงยึดติดที่วัดได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างเซรามิกและเรซินซีเมนต์

เอกสารอ้างอิง

- Alhomud, M., Phark, J. H., & Duarte Jr, S. (2023). Bond strength to different CAD/CAM lithium disilicate reinforced ceramics. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 35(1), 129-137.
- Behr, M., Rosentritt, M., Mangelkramer, M., & Handel, G. (2003). The influence of different cements on the fracture resistance and marginal adaptation of all-ceramic and fiber-reinforced crowns. *International Journal of Prosthodontics*, 16(5).
- Bernal, G., Jones, R. M., Brown, D. T., Munoz, C. A., & Goodacre, C. J. (1993). The effect of finish line form and luting agent on the breaking strength of Dicor crowns. *International Journal of Prosthodontics*, 6(3).
- El Mourad, A. M. (2018). Assessment of bonding effectiveness of adhesive materials to tooth structure using bond strength test methods: A review of literature. *The Open Dentistry Journal*, 12, 664.
- Gale, M. S., & Darvell, B. W. (1999). Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *Journal of Dentistry*, 27(2), 89-99.
- Groten, M., & Pröbster, L. (1997). The influence of different cementation modes on the fracture resistance of feldspathic ceramic crowns. *International Journal of Prosthodontics*, 10(2).
- Gu, X. H., & Kern, M. (2003). Marginal discrepancies and leakage of all-ceramic crowns: Influence of luting agents and aging conditions. *International Journal of Prosthodontics*, 16(2).
- Lu, Y., Bierman, T. E., Dal Piva, A. M. D. O., Tribst, J. P. M., Feilzer, A. J., & Kleverlaan, C. J. (2024). Effect of surface treatment and resin cement on the bond strength of an advanced lithium disilicate. *European Journal of Dentistry*, 18(3), 869-876.
- Marocho, S. M., Ozcan, M., Amaral, R., Bottino, M. A., & Valandro, L. F. (2013). Effect of resin cement type on the microtensile bond strength to lithium disilicate ceramic and dentin using different test assemblies. *J Adhes Dent*, 15(4), 361-8.

- Matinlinna, J. P., Lung, C. Y. K., & Tsoi, J. K. H. (2018). Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: A review. *Dental Materials*, 34(1), 13-28.
- Meng, X., Yoshida, K., Taira, Y., Kamada, K., & Luo, X. (2011). Effect of siloxane quantity and pH of silane coupling agents and contact angle of resin bonding agent on bond durability of resin cements to machinable ceramic. *Journal of Adhesive Dentistry*, 13(1).
- Paul, S. J. (1997). Light transmission of composite luting resins. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry Japan*, 5, 175-183.
- Phark, J. H., & Duarte Jr, S. (2022). Microstructural considerations for novel lithium disilicate glass ceramics: A review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(1), 92-103.
- Qualtrough, A. J., & Piddock, V. (2002). Dental ceramics: What's new?. *Dental Update*, 29(1), 25-33.
- Ritzberger, C., Apel, E., Höland, W., Peschke, A., & Rheinberger, V. M. (2010). Properties and clinical application of three types of dental glass-ceramics and ceramics for CAD-CAM technologies. *Materials*, 3(6), 3700-3713.
- Sağlam, G., Cengiz, S., Köroğlu, A., Şahin, O., & Velioglu, N. (2023). Comparison of the micro-shear bond strength of resin cements to CAD/CAM glass ceramics with various surface treatments. *Materials*, 16(7), 2635.
- Saint-Jean, S. J. (2014). Dental glasses and glass-ceramics. In *Advanced ceramics for dentistry* (pp. 255-277). Butterworth-Heinemann.
- Spitznagel, F. A., Boldt, J., & Gierthmuehlen, P. C. (2018). CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth. *Journal of Dental Research*, 97(10), 1082-1091.
- Teixeira, G. S., Pereira, G. K. R., & Susin, A. H. (2021). Aging methods—An evaluation of their influence on bond strength. *European Journal of Dentistry*, 15(3), 448-453.
- Tian, T., Tsoi, J. K. H., Matinlinna, J. P., & Burrow, M. F. (2014). Aspects of bonding between resin luting cements and glass ceramic materials. *Dental Materials*, 30(7), e147-e162.
- van Noort, R. (2002). *Introduction to dental materials*. 2nd ed. Edinburgh: Mosby.
- Vilde, T., Stewart, C. A., & Finer, Y. (2022). Simulating the intraoral aging of dental bonding agents: A narrative review. *Dentistry Journal*, 10(1), 13.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Conflicts of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.



Copyright: © 2026 by the authors. This is a fully open-access article distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).