

# อิทธิพลของความล้าต่อการยึดติดระหว่างวัสดุบูรณะฟันเซรามิก ชนิดเฟลสปาติกและผิวเคลือบฟันธรรมชาติของมนุษย์

## The Influence of Fatigue in Resin-Bonded Ceramic/Enamel Bonds

ทพญ. ภาวินีย์ ปฏิพัทธ์วุฒิกุล<sup>1</sup>

Prof. Lawrence H Mair<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาทันตกรรมทั่วไป คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

<sup>2</sup> School of Dentistry, University of Central Lancashire, UK

### บทคัดย่อ

วัสดุบูรณะฟันหลายชนิดที่นิยมแพร่หลายในปัจจุบันรวมถึงวัสดุบูรณะฟันเซรามิกชนิดเฟลสปาติก (Feldspathic porcelain) ถูกนำมายึดติดกับเคลือบฟันหรือเนื้อฟันด้วยสารยึดติดชนิดเมตาคริลเลตเรซิน และคอมโพสิต วัสดุบูรณะฟันเหล่านี้ได้รับแรงบดเคี้ยวซึ่งเป็นแรงกระทำซ้ำๆ และอาจมีค่าสูงถึง 800 นิวตัน ก่อให้เกิดความล้าในตัววัสดุบูรณะ และส่งผลต่อการยึดติดระหว่างวัสดุบูรณะและเคลือบฟันหรือเนื้อฟัน วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือศึกษาอิทธิพลของความล้าต่อการยึดติดระหว่างเซรามิกชนิดเฟลสปาติก และผิวเคลือบฟันธรรมชาติของมนุษย์ โดยทำการทดสอบความต้านทานต่อความล้า (Fatigue resistance) ของชั้นทดสอบ และทำการศึกษาวิเคราะห์การแตกหักและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์ชนิด Incident light microscope ในชั้นทดสอบที่ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ )

เซรามิกจำนวน 61 ชิ้นถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการเผาหลอมผงเซรามิก<sup>1</sup> ในเตาเผาไฟทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 4 มิลลิเมตร เซรามิก 10 ชิ้นถูกนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรง เนื้อด้วยเครื่อง Universal Testing Machine สำหรับชิ้นเซรามิกที่เหลือผิวด้านหนึ่งของชิ้นเซรามิกถูกเป่าทราย, กัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 9.5% เป็นเวลา 15 นาที และได้รับการปรับสภาพผิวด้วยสารไฮเลนไพรเมอร์ ชิ้นเซรามิกถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 17 ชิ้น โดยการสุ่ม ฟันกรามใหญ่ของมนุษย์ 51 ซี่ซึ่งถูกถอนและเก็บไว้ในสารละลายไทมอลเป็นระยะเวลาไม่เกิน 3 เดือน ผิวเคลือบฟันด้านหนึ่งได้รับการกัดด้วยกรดฟอสฟอริก 37.5% เป็นเวลา 30 วินาที ล้างและเป่าแห้ง ชิ้นเซรามิกถูกยึดติดกับผิวเคลือบฟันมนุษย์โดยใช้สารยึดติดชนิดเรซิน 3 ระบบคือ Calibra<sup>2</sup>, Nexus<sup>3</sup>, และ Panavia<sup>4</sup> ชั้นทดสอบถูกนำไปทดสอบความต้านทานต่อความล้า ในเครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) โดยใช้วิธีการทดสอบแบบขั้นบันได (Staircase method) กำหนดจำนวนรอบครั้งที่ 5000 รอบ และอัตราเร็วของการทดสอบ 80 รอบต่อนาที ชั้นทดสอบที่แตกหักระหว่างการทดลองถูกนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ส่วนชั้นทดสอบซึ่งไม่แตกหักถูกนำไปย้อมด้วยสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรท และได้รับการตัดแต่งเพื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Incident light microscope

<sup>1</sup> Vitadur, Vivadent, <sup>2</sup> Calibra with Prime and Bond resin, Dentsply, <sup>3</sup> Nexus with Optibond resin, Kerr,

<sup>4</sup> Panavia with Clearfil SE Bond resin, Kuraray.

ผลการทดสอบความต้านทานต่อความล้าคือ Calibra  $13.74 \pm 0.1$  MPa, Nexus  $11.41 \pm 1.44$  MPa, Panavia  $12.28 \pm 2.66$  MPa ผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในทุกกลุ่มทดลองสามารถพบรอยแตกร้าว (crack) ซึ่งเกิดจากความล้าของวัสดุ โดยรอยแตกร้าวนี้เริ่มเกิดในชั้นเซรามิกหรือเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเซรามิกและผิวเคลือบฟัน รอยแตกร้าวดำเนินผ่านชั้นวัสดุคอมโพสิตแต่ไม่ทำให้ผิวเคลือบฟันแตกการย้อมสีด้วยซิลเวอร์ในเตรทพบว่ามีความเสียหายและรอยร้าวเกิดขึ้นในวัสดุเซรามิกและมีการรั่วซึมบริเวณรอยต่อระหว่างเซรามิกและเรซินคอมโพสิต

งานวิจัยนี้พบว่าชั้นทดสอบแตกหักในลักษณะผสมคือมีการแตกหักทั้งในตัววัสดุและในบริเวณรอยต่อของวัสดุและสารยึดติดการย้อมสีชั้นทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นเซรามิกก่อนเกิดการแตกหัก แสดงว่าความอ่อนแอของวัสดุเซรามิกเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการแตกหักของชั้นทดสอบ

## Abstract

Many modern dental restorations including feldspathic ceramic are bonded to tooth surface by metacrylate resins and composites. These restorations are usually subjected to cyclic masticatory forces with peak loads of 800N. In this study, resin-bonded ceramic specimens were subjected to cyclic loading. Fracture and damage were studied using SEM and incident light microscopy was used to investigate specimens stained with  $\text{AgNO}_3$ .

Sixty-one ceramic cylinders ( $\Phi=5\text{mm} \times 4\text{ mm}$ ) were fabricated by sintering porcelain powder.<sup>1</sup> Ten ceramic cylinders were tested in the Universal Testing Machine for shear strength. The rest of ceramic cylinders were sandblasted and etched with 9.5% hydrofluoric acid for 15 minutes. The ceramic surface was treated with a primer (silane) and randomly divided into 3 groups of 17. Each group was treated with one of three resin cement systems<sup>2-4</sup> (Calibra, Nexus, Panavia). The enamel of 51 extracted teeth those were kept in thymol solution no more than 3 months was etched with 37.5% phosphoric acid for 30 seconds and the resin applied. The well prepared cylinders were then attached and bonded to the enamel surface. The specimen was held in a fatigue testing machine and subjected to a staircase<sup>1</sup> fatigue test using 5000 cycles at 80 cycles/ min. The fracture surfaces of the failed specimens were examined in a SEM. Other non-fractured samples were stained with  $\text{AgNO}_3$  and prepared for incident light microscopy.

The fatigue limit results were Calibra  $13.74 \pm 0.1$  MPa, Nexus  $11.41 \pm 1.44$  MPa, Panavia  $12.28 \pm 2.66$  MPa. In all systems, the fatigue crack initiated at either the ceramic or the ceramic/resin interface. The crack propagated through the bonding composite and did not fracture the underlying tooth. Staining indicated damage in the ceramic and leakage along the ceramic resin interface. In this study, the specimens failed by mixed mode fracture. Staining indicated that there was ceramic damage prior to failure. It was shown that the weakness of ceramic was the important factor causes specimen fracture.

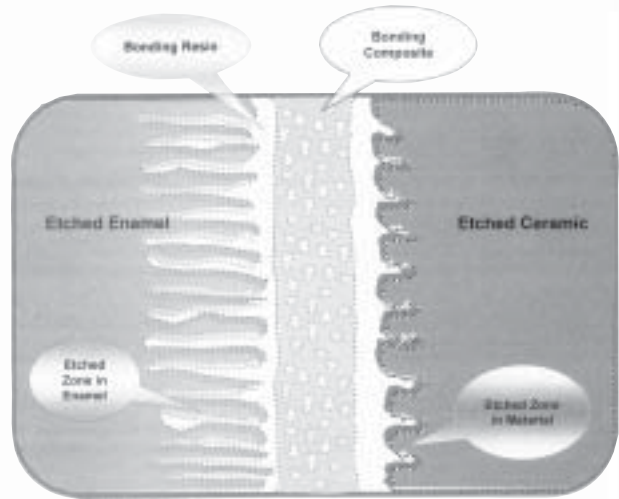
**Keywords:** Fatigue resistance, Bonding, Ceramic, Adhesion, Fractography

<sup>1</sup> Vitadur, Vivadent, <sup>2</sup> Calibra with Prime and Bond resin, Dentsply, <sup>3</sup> Nexus with Optibond resin, Kerr,

<sup>4</sup> Panavia with Clearfil SE Bond resin, Kuraray.

## บทนำ/ Introduction

เทคโนโลยีสำคัญที่เกิดขึ้นและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในวงการทันตกรรมและทันตวัสดุศาสตร์ในช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมาคือสารยึดติดเรซินซึ่งสามารถยึดติดวัสดุบูรณะฟันชนิดต่างๆ รวมถึงวัสดุเซรามิกชนิดเฟลสปาติคกับฟันได้อย่างเหนียวแน่น สารยึดติดชนิดเรซินทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ 1) ทำหน้าที่ยึดวัสดุบูรณะฟันให้อยู่กับที่ และ 2) ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุบูรณะฟันและช่วยป้องกันการเกิดรอยแตกร้าว (Crack initiation) และการดำเนินของรอยแตกร้าวนั้น (Crack propagation) สารยึดติดเรซินจะยึดพื้นผิวด้านยึดติด (Bonding surface) ทั้งหมดของวัสดุบูรณะเข้ากับผิวฟัน ดังนั้นถ้าเกิดความล้มเหลวของการยึดติดนี้อาจส่งผลให้เกิดการหลุดหายของวัสดุบูรณะทั้งชิ้นหรือส่งผลให้เกิดการแตกหักหรือเกิดรอยแตกร้าวในชั้นวัสดุบูรณะฟันได้ กลไกหลักของการยึดติดด้วยสารยึดติดชนิดเรซินประกอบด้วย 1) การทำให้เกิดการแทรกซึมของสารเรซินที่ได้รับการดัดแปลง (Modified resin) เข้าไปในพื้นผิวของฟันที่ผ่านการกัดด้วยกรดฟอสฟอริกแล้วและพื้นผิวของวัสดุเซรามิกที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกแล้ว 2) การกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการก่อตัวของวัสดุเมตาคริลเลตเรซินโดยการฉายแสงที่พื้นผิวทั้งสอง ขั้นตอนนี้ทำให้สารเมตาคริลเลตเรซินซึ่งแทรกซึมลงไปในพื้นที่ผิวทั้งสองเกิดแข็งตัวและเกิดการยึดติดทางกล (Micromechanical attachment) กับพื้นผิว 3) การยึดติดพื้นผิวทั้งสองเข้าด้วยกันด้วยสารยึดติดชนิดเรซินคอมโพสิตซึ่งมีการเติมสารเติม (Fillers) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และสามารถเกิดการทำปฏิกิริยาชนิด cross polymerize กับกลุ่มไวนิล ( $-C=C$  vinyl group) ในชั้นเรซิน กลไกทั้งหมดนี้ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างการยึดติดของชั้นต่างๆเข้าด้วยกันซึ่งอาจเรียกว่า “Resin-bonded sandwich” ดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 Resin-bonded sandwich

งานวิจัยทางทันตวัสดุศาสตร์มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างวัสดุเซรามิกและผิวฟัน แต่การทดสอบส่วนใหญ่ที่แล้วมานิยมใช้การทดสอบแบบ monotonic tests เช่นการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) ความแข็งแรงกด (Compressive test) หรือความแข็งแรงเฉือน (Shear test) การทดสอบเหล่านี้จะใช้แรงในการดึงหรือให้แรงกระทำต่อวัสดุในลักษณะกดหรือเฉือน โดยแรงที่กระทำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบ ซึ่งถึงแม้ว่าการทดสอบเหล่านี้จะสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว แต่แรงกระทำในลักษณะนี้ไม่สอดคล้องกับแรงบาดเจ็บที่เกิดขึ้นจริงในช่องปากซึ่งมีลักษณะเป็นแรงกระทำซ้ำๆ (cyclic forces) และทำให้เกิดการแตกหักจากความล้าของวัสดุบูรณะฟัน จากการค้นคว้าผลงานวิจัยในลักษณะเดียวกันที่ได้รับการตีพิมพ์ มีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดด้วยการทดสอบความล้า และงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบในการทดสอบความล้าอยู่ในช่วง 2-12 กิโลกรัม โดย 80% ของงานวิจัยใช้แรงกระทำต่ำกว่า 5 กิโลกรัม [1-4] ซึ่งไม่สอดคล้องกับแรงบาดเจ็บในช่องปากที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.5-16 กิโลกรัม และอาจมีค่าสูงถึง 80 กิโลกรัมในผู้ป่วยที่มีการบาดเจ็บผิดปกติหรือผู้ป่วยที่มีอาการนอนกัดฟัน [5-8]

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย/ Aims

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อความล้มของการยึดติดระหว่างวัสดุเซรามิกชนิดเฟลสปาติกและผิวเคลือบฟันของมนุษย์ 2) เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวที่แตกหักจากความล้มโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด 3) เพื่อศึกษาลักษณะของรอยแตกร้าว (crack) ที่เกิดในชั้นทดสอบที่ไม่แตกหักซึ่งถูกย้อมสีด้วยซิลเวอร์ไนเตรท [9,10] ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Incident light microscope

## อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย/ Material and method

### การเตรียมชิ้นเซรามิก

ชิ้นเซรามิกจำนวน 61 ชิ้นถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการเผาหลอมผงเซรามิก (Vitadur Alpha, VITA Zahnfabrik, Germany) ในเตาเผาไฟโดยใช้

เตาเผาสุญญากาศ (vacuum furnace, Multimat MC II, DeTray, Dentsply, Germany) ซึ่งทำให้ได้ชิ้นเซรามิกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 4 มิลลิเมตร โดยเซรามิกจำนวน 10 ชิ้นเตรียมไว้สำหรับการทดสอบความแข็งแรงเนื่องด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ผิวด้านหนึ่งของชิ้นเซรามิกที่เหลือถูกเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมครอนเป็นเวลา 30 วินาที และทำความสะอาดด้วยการแช่ในเครื่องสั่นชนิดอัลตราโซนิคเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงถูกกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 9.5% เป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำ 1 นาที เป่าแห้ง และได้รับการปรับสภาพผิวด้วยการทาสารไซเลนไพรมเมอร์สำหรับเซรามิก ชิ้นเซรามิกถูกแบ่งโดยการสุ่มเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 17 ชิ้น เพื่อยึดติดกับผิวเคลือบฟันด้วยสาร ยึดติดเรซิน 3 ระบบ ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารยึดติดชนิดเรซินใช้ในการทดลอง

ระบบสารยึดติดที่ใช้ในการทดสอบ	สารยึดติดเรซินคอมโพสิต	สารเมตาคริลเลตเรซิน	บริษัทผู้ผลิต	เลขรหัสของวัสดุ
<b>1.Calibra System</b>	2 paste dual cure* composite based on Bis-GMA.	Prime and Bond NT Single bottle Dual cure resin	Dentsply,USA	0207000948
<b>2.Panavia System</b>	2 paste tri-cure# system	ED-PrimerTwo liquid, dual cure resin	Kuraray,Japan	00013A
<b>3.Nexus System</b>	2 part dual cure* Base on Bis-GMA	Optibond Solo Plus Single liquid. Light cure resin	Kerr, USA	Base423969 Catalyst428992

\* light cure + subsequent chemical cure

# light cure + subsequent anaerobic and chemical cure.

### การเตรียมผิวเคลือบฟัน

ผิวเคลือบฟันได้จากฟันกรามใหญ่ของมนุษย์ 51 ซี่ซึ่งถูกถอน ทำความสะอาด และเก็บไว้ในสารละลายไทมอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาไม่เกิน 3 เดือน รากฟันถูกตัดออกและฟันด้านหนึ่งถูกฝังในอะคริลิกชนิดโพลีเมทิลเมตาคริเลท (Polymethylmetacrylate, PMMA) เหลือเพียงผิวฟันด้านหนึ่งโพล์ฟันผิวอะคริลิก ผิวเคลือบฟันได้รับการขัดแต่งเล็กน้อยด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 600 เพื่อให้มีระนาบแบนเหมาะกับการยึดติด ผิวเคลือบฟันถูกกัดด้วยกรดฟอสฟอริก 37.5% เป็นเวลา 30 วินาที ล้างด้วยน้ำ 20 วินาทีและเป่าแห้งจนผิวเคลือบฟันมีลักษณะขาวขุ่น

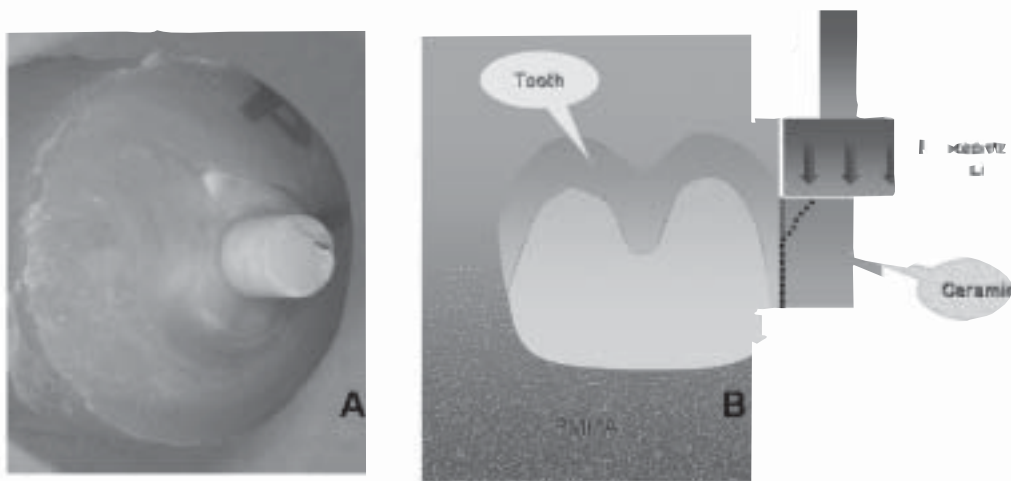
### การเคลือบฟันผิวที่ต้องการยึดติดด้วยสารเรซิน

ทั้งผิววัสดุเซรามิกและผิวเคลือบฟันซึ่งผ่านกรรมวิธีการกัดด้วยกรดแล้วถูกทาด้วยสารเมตาคริลเลตเรซิน ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 วินาที แล้งจึงเป่าลม

เบาๆ ให้สารทำละลายระเหยไป และฉายแสงเพื่อให้เรซินเกิดปฏิกิริยาก่อตัว กระบวนการนี้เป็นการแปลงสภาพพื้นผิวของเซรามิกและเคลือบฟันให้กลายเป็นพื้นผิวที่มีการแทรกซึมและเคลือบด้วยเรซิน

### การยึดติดสองพื้นผิวที่มีการแทรกซึมและเคลือบด้วยสารเรซินแล้ว

ชั้นเซรามิกซึ่งได้รับการเตรียมด้วยกรดและสารเรซินแล้วจะถูกทาด้วยสารยึดติดเรซินคอมโพสิตเฉพาะสำหรับแต่ละกลุ่มทดสอบและถูกนำไปยึดติดกับผิวเคลือบฟันที่เตรียมไว้ สารยึดติดส่วนเกินถูกกำจัดออกด้วยแปรงขนาดเล็ก แล้วจึงทำการฉายแสงเพื่อให้เกิดกระบวนการโพลีเมอไรเซชันของสารยึดติด โดยฉายแสงเป็นเวลา 40 วินาทีโดยรอบทั้ง 4 ด้าน ชั้นทดสอบซึ่งเตรียมเสร็จแล้วมีลักษณะดังรูปภาพที่ 2 ซึ่งชั้น ทดสอบทั้งหมดที่เตรียมเสร็จแล้วจะถูกเก็บไว้ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจนกระทั่งถูกนำมาทดสอบ



รูปภาพที่ 2 (A) ภาพชั้นทดสอบที่เตรียมเสร็จแล้ว  
(B) แผนภาพแสดงจุดที่ให้แรงกระทำต่อชั้นทดสอบและเส้นจุดไข่ปลาแสดงแนวการแตกหักของชั้นทดสอบ



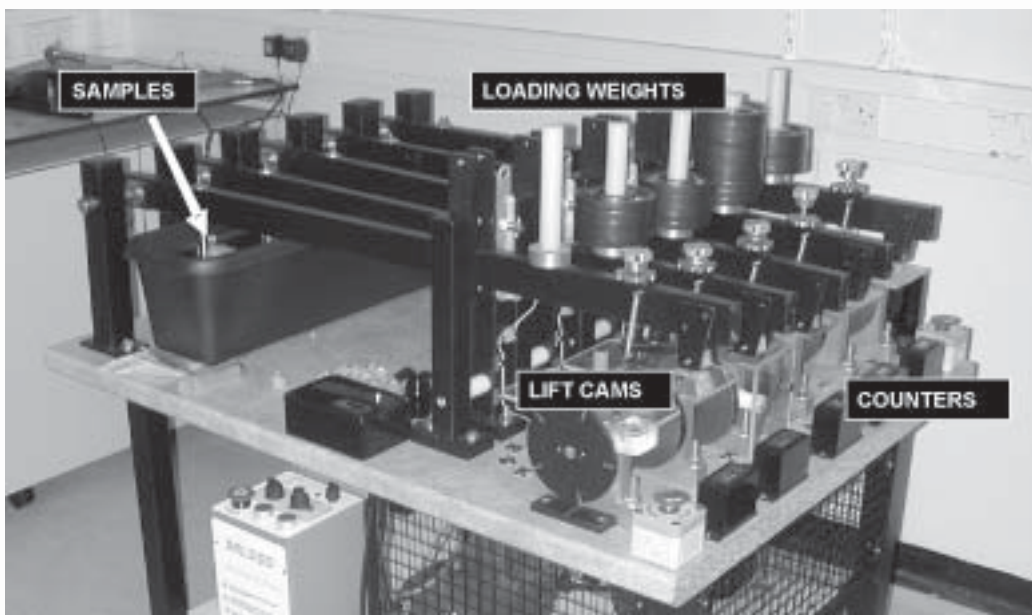
### การทดสอบความแข็งแรงเฉือนของเซรามิก

เซรามิก 10 ชิ้นถูกนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงเฉือนด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยตั้งค่าความเร็วของการให้แรง (cross head speed) ที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และคำนวณหาค่า 30% ของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือนเพื่อนำมาใช้เป็นค่าแรงเริ่มต้นในการทดสอบความล้าแบบขั้นบันไดต่อไป

### เครื่องทดสอบความล้า

เครื่องทดสอบความล้าได้ถูกสร้างขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ โดยเป็นเครื่องทดสอบความล้าแบบ 5 สถานีซึ่งสามารถทำการทดสอบขั้นทดสอบได้ถึง 5 ชั้นในเวลาเดียวกัน ความเร็วของเครื่องทดสอบสามารถ ปรับได้โดยการปรับระดับความเร็ว

ของตัวมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หมุนวงล้อข้างใต้แขนทดสอบ เครื่องทดสอบนี้จะให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบผ่านแท่งเหล็กซึ่งมีปลายตัดแบนแนบกับผิวของชิ้นทดสอบบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นเซรามิกและผิวเคลือบฟัน สำหรับทุกสถานีทดสอบแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบสามารถปรับได้โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนของวงแหวนน้ำหนักบนแกนรับน้ำหนักที่ปลายด้านหนึ่งของแขนทดสอบ ซึ่งสามารถปรับระดับน้ำหนักได้ตั้งแต่ 8 ถึง 100 กิโลกรัม การหมุนของวงล้อใต้แขนทดสอบจะยกปลายด้านหนึ่งของแขนขึ้นเป็นจังหวะซึ่งส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบเป็นจังหวะเช่นกัน สำหรับการทดลองนี้ได้ตั้งค่าอัตราเร็วของการทดสอบไว้ที่ 80 รอบต่อนาทีซึ่งสอดคล้องกับอัตราเร็วของการบดเคี้ยวในช่องปาก



รูปภาพที่ 3 เครื่องทดสอบความล้าแบบ 5 สถานีซึ่งสามารถให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบสูงถึง 100 กิโลกรัม

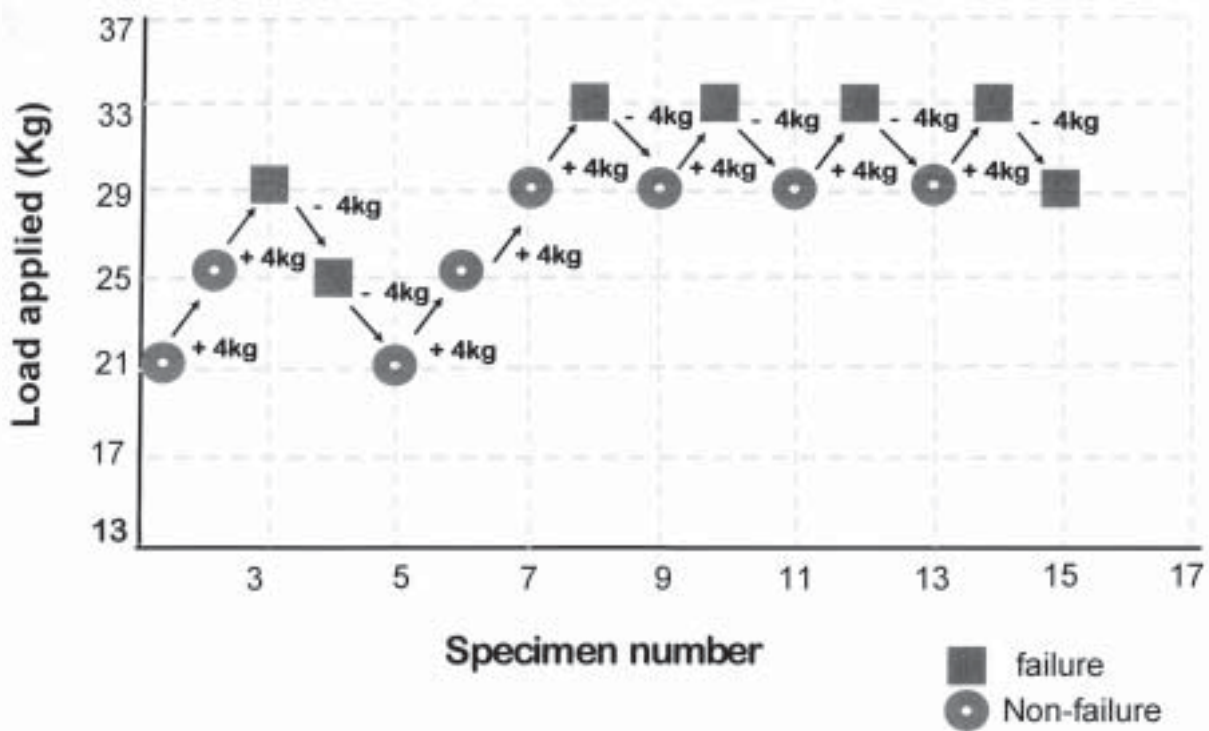
### การทดสอบความต้านทานต่อความล้า (Fatigue Resistance) ของชิ้นทดสอบ

การทดสอบความต้านทานต่อความล้าของชิ้นทดสอบกระทำโดยวิธีการทดสอบแบบขั้นบันได (Staircase Method) ซึ่งอ้างอิงจากบทความตีพิมพ์ของ Draughn (Draughn 1979) ในการทดสอบความต้านทานต่อความล้าแบบขั้นบันไดนี้ ชิ้นทดสอบ

จะได้รับการทดสอบเป็นจำนวนรอบที่คงที่โดยใช้แรงกระทำซึ่งมีค่าประมาณใกล้เคียงกับขีดจำกัดความล้า (Fatigue Limit) ของวัสดุหรือชิ้นตัวอย่าง โดยทั่วไปแล้วค่านี้คำนวณได้จากค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุ (Shear Strength) โดยค่าขีดจำกัดความล้ามีค่าประมาณคร่าวๆเท่ากับ 30% ของค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุ ถ้าชิ้นทดสอบแรกที่ได้รับการ

ทดสอบล้มเหลวหรือเสียหายภายในจำนวนรอบ (Cycles) ที่กำหนดไว้ สำหรับการทดลองนี้กำหนดจำนวนรอบคงที่ที่ 5000 รอบ ชั้นทดสอบต่อไปจะถูกทดสอบด้วยระดับแรงกระทำที่น้อยลงซึ่งลดลงเป็นค่าคงที่ (fixed increment) 4 kg. แต่ถ้าชั้นทดสอบแรกไม่มีความเสียหาย ชั้นทดสอบที่ 2 จะได้รับการทดสอบด้วยแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นเป็นค่าคงที่ (4 kg) เช่นกัน ชั้นทดสอบต่อไปได้รับการทดสอบในแบบเดียวกันโดยระดับแรงกระทำต่อชั้นทดสอบนั้นๆ

ขึ้นอยู่กับว่าชั้นทดสอบก่อนหน้าอยู่รอดหรือล้มเหลว จำนวนชั้นทดสอบที่ต้องใช้ในการทดสอบแบบขั้นบันไดนี้น้อยกว่าการทดสอบความล้าแบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้ต้องการชั้นทดสอบอย่างน้อยกลุ่มละ 15 ชั้นเพื่อการวิเคราะห์ทางสถิติที่ถูกต้อง ค่าอัตราเร็วของรอบแรงกระทำตั้งค่าไว้ที่ 80 รอบต่อนาที ซึ่งค่านี้นำมาจากค่าความเร็วของรอบการเคี้ยวในช่องปากมนุษย์ ตัวอย่างกระบวนการทดสอบแบบขั้นบันไดสามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 4



รูปภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบความล้าแบบขั้นบันได

จากรูปภาพที่ 4 ชั้นทดสอบชั้นแรกได้รับการทดสอบด้วยแรงกระทำ 21 กิโลกรัม (ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จาก 30% ของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือนของชิ้นเซรามิกจำนวน 10 ชิ้น) และอยู่รอดในจำนวนรอบที่กำหนดไว้ (เช่น 5,000 รอบ) แรงที่กระทำต่อชั้นทดสอบที่สองจึงเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนคงที่คือ 4 กิโลกรัม (เป็น 25 กิโลกรัม) ชั้นทดสอบที่สองยังคงอยู่รอดในจำนวนรอบที่กำหนด ดังนั้นแรงที่กระทำต่อชั้นทดสอบที่สามจึงเพิ่มขึ้นอีก 4 กิโลกรัม (เป็น 29 กิโลกรัม) เมื่อชั้นทดสอบที่สามล้มเหลวก่อนถึงจำนวนรอบที่กำหนด ชั้นทดสอบที่สี่จึงถูกทดสอบด้วยแรงกระทำที่ลดลง 4 กิโลกรัม (25 กิโลกรัม) ซึ่งเมื่อชั้นทดสอบที่สี่ล้มเหลวอีกในจำนวนรอบที่กำหนดจึงทำให้ชั้นทดสอบที่ห้าถูกทดสอบที่ 21 กิโลกรัม (ลดลง 4 กิโลกรัม) การทดสอบแบบขั้นบันไดดำเนินไปเช่นนี้จนครบทุกชั้นทดสอบ

### การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อความล้าของ ชั้นทดสอบ

จากตัวอย่างการทดสอบความล้าแบบขั้นบันไดในรูปภาพที่ 4 พบว่ามีชั้นทดสอบอยู่รอด 8 ชั้น และล้าเหลว 7 ชั้น การวิเคราะห์ผลขั้นแรกพิจารณาจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่า(อยู่รอดหรือล้าเหลว)ในการคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานต่อความล้าจะต้องทำการจัดข้อมูลในตารางดังตารางที่ 2 โดยค่าแรงกระทำต่ำสุดที่ชั้น

ตัวอย่างเกิดความล้าเหลวจะให้ค่าเป็น  $i=0$ , ค่าแรงกระทำระดับต่อไปจึงเป็น  $i=1, i=2, i=3, \dots$  ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยความต้านทานต่อความล้า ( $X$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $S$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 [11-15] โดยในสมการดังกล่าว, ค่า  $X_0$  คือค่าแรงกระทำที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดสอบ, ค่า  $d$  คือค่าแรงกระทำคงที่ที่ใช้เพิ่มหรือลดในระหว่างการทดสอบ (ในที่นี้คือ 4 กิโลกรัม)

ตารางที่ 2 ตารางการคำนวณผลการทดสอบความล้าแบบขั้นบันได

แรงกระทำ(กิโลกรัม)	$i$	$n_i$	$i n_i$	$i^2 n_i$
33	3	4	12	36
29	2	2	4	8
25	1	1	1	1
21	0	0	0	0
		$N = \sum n_i$ = 7	$A = \sum i n_i$ = 17	$B = \sum i^2 n_i$ = 45

$$\text{ค่าเฉลี่ย } (X) = X_0 + d \left( \frac{A + 1}{N + 2} \right) \quad [\text{สมการที่ 1}]$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน } (SD) = 1.62 d \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad [\text{สมการที่ 2}]$$

ในสมการที่ 1 จะใช้เครื่องหมายบวก(+) ต่อเมื่อเป็นการวิเคราะห์ซึ่งผลการทดสอบส่วนมากเป็นการอยู่รอดของชั้นทดสอบ, และจะใช้เครื่องหมายลบ (-) ต่อเมื่อชั้นทดสอบส่วนมากล้าเหลว เมื่อใส่ข้อมูลจากตารางที่ 1 ในสมการที่ 1 และ 2 แล้วได้ผลดังนี้

$$X = 21 + (4) \left( \frac{17 - 1}{7 + 2} \right) = 28.71 \text{ Kg}$$

$$SD = (1.62) (4) \left[ \frac{(7)(45) - (17^2)}{7^2} + 0.029 \right] = 3.63 \text{ Kg}$$

สำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มทดสอบใช้ Behrens-Fisher T-test ซึ่งสามารถใช้เพียงค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจำนวนชั้นทดสอบในการคำนวณ เนื่องจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลองนี้ไม่ได้คำนวณจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจริงของชั้นทดสอบแต่ละชั้น [16-18]



### การศึกษาพื้นผิวชั้นทดสอบที่แตกหัก

พื้นผิวที่แตกหักของชั้นทดสอบถูกนำมาเคลือบด้วยทองเพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JEOL JSM-35C, Cambridge, UK)

เซรามิก, รอยต่อระหว่างชั้นเซรามิกและเคลือบฟัน, และตัวฟัน หลังจากนั้นหน้าตัดของชั้นทดสอบจึงถูกนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

### การศึกษาชั้นทดสอบที่ไม่แตกหัก

ชั้นทดสอบที่ไม่แตกหักถูกนำมาแช่ในสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรท (5 mol/L) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงถูกตัดด้วยเครื่องตัดชั้นทดสอบ (Beuhler, Isomet 11-1180, Coventry, UK) ผ่านกึ่งกลางชั้นทดสอบ ในแนวตั้งเพื่อเผยให้เห็นชั้น

### ผลการวิจัย/ Result

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสามารถจำแนกกลุ่มทดสอบซึ่งมีผลการทดลองใกล้เคียงกันได้เป็น 2 กลุ่มย่อยดังตารางที่ 3 โดยกลุ่มทดสอบที่อยู่ในกลุ่มย่อยเดียวกันไม่มีความแตกต่างของผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 แสดงการจำแนกกลุ่มย่อยและค่าเฉลี่ยความต้านทานต่อความล้าและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MPa)

Subsets		
1	Calibra (13.74+ 0.1)	Panavia (12.28 +2.66)
2	Panavia (12.28+2.66)	Nexus (11.41+1.44)

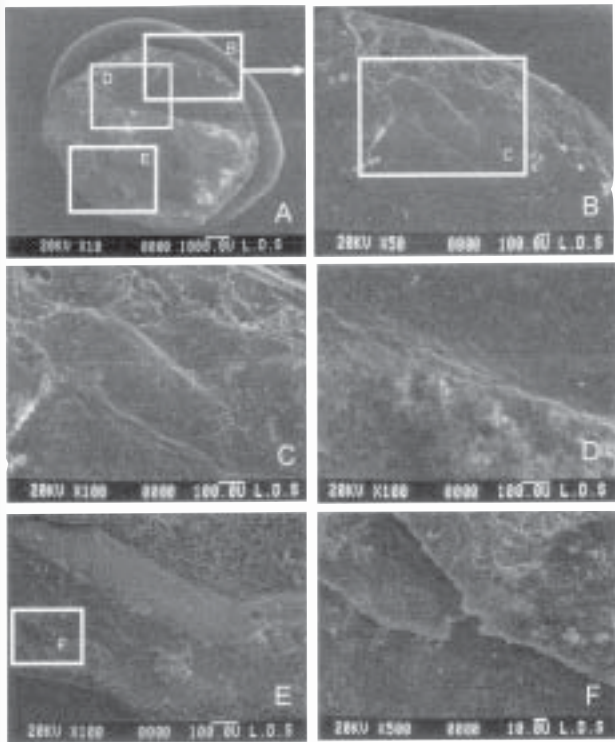
ในทุกกลุ่มการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานต่อความล้ามีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 แสดงค่าความต้านทานต่อความล้าเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงเฉือน

Bonding systems	Fatigue Limit (MPa $\pm$ SD)	Shear Bond Strength (MPa $\pm$ SD)	T Value	Probability
Calibra (Prime&Bond)	13.74 $\pm$ 0.1	21.22 $\pm$ 2.66	t = 11.75	p < 0.001
Panavia (Clearfill bond)	12.28 $\pm$ 2.66	16.14 $\pm$ 2.95	t = 3.50	P = 0.002
Nexus (Optibond)	11.41 $\pm$ 1.44	17.91 $\pm$ 5.09	t = 4.99	p < 0.001

## ผลการศึกษาชั้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

พบว่า 80% ของชั้นทดสอบมีรอยแตกร้าวก่เกิดขึ้นในชั้นเซรามิกบริเวณข้างใต้จุดที่มีแรงกระทำ รอยแตกร้าวดำเนินผ่านรอยต่อระหว่างเซรามิกและสารเรซิน และจึงผ่านเข้าไปในชั้นของสารยึดติดคอมโพสิต การศึกษาพื้นผิวของชั้นเซรามิกที่แตกหักพบว่า มีลักษณะเป็นขั้นของการแตกหัก (Fracture steps) ซึ่งขยาย ขนาดออกเป็นวงกว้าง และพบมีการแตกแขนงของรอยร้าวนในชั้นของสารยึดติดคอมโพสิต ทำให้เกิดเป็นชั้นๆ ที่ซ้อนเหลื่อมทับกันของคอมโพสิต



รูปภาพที่ 5 ภาพพื้นผิวของชั้นทดสอบที่แตกหัก

(A) ภาพถ่ายกำลังการขยายต่ำจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และแผนที่แสดงตำแหน่งของภาพ B-F, รอยร้าวดำเนินจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของภาพ

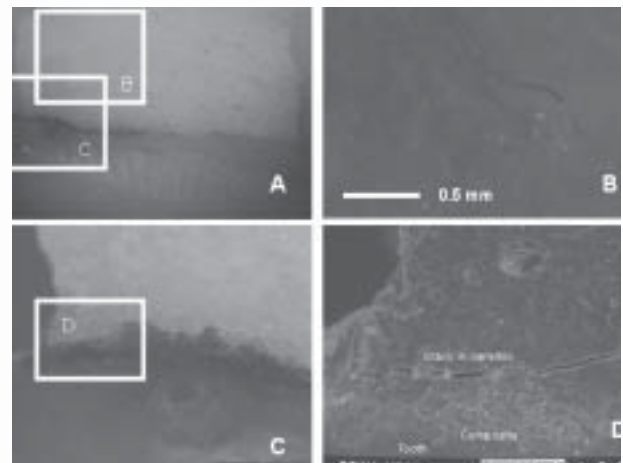
(B) ชั้นของการแตกหักที่เกิดขึ้นบนผิวที่แตกหักของเซรามิก

(C) ภาพขยายของภาพ (B) แสดงชั้นย่อยของการแตกหักที่เกิดบนพื้นผิวที่แตกหักของเซรามิก

- (D) รอยต่อระหว่างเซรามิก, เรซิน, และคอมโพสิต
- (E) รอยต่อระหว่างคอมโพสิต, เรซิน, และผิวฟัน
- (F) การแตกแขนงของรอยแตกหักในคอมโพสิต

## ผลการศึกษาชั้นทดสอบซึ่งถูกยึดด้วยสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรท

ชั้นทดสอบทุกชั้นมีการติดสีที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเซรามิกและผิวเคลือบฟัน ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณนี้มีโอกาสมากที่จะมีการแทรกซึมของของเหลวในช่องปากและคราบสีต่างๆ ชั้นทดสอบหลายชั้นมีการติดสีในชั้นเซรามิกเองและในบริเวณรอยต่อของชั้นเรซินและชั้นคอมโพสิต (รูปภาพที่ 5C และ 5D) เมื่อพิจารณาอย่างใกล้ชิดจะพบว่าการติดสีของรอยแตกร้าวล็กๆ ในบริเวณที่มีแรงกระทำซึ่งแสดงถึงความล้าในเนื้อเซรามิก



รูปภาพที่ 6 ชั้นทดสอบซึ่งถูกยึดด้วยสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรท

(A) ภาพถ่ายกำลังการขยายต่ำจากกล้องจุลทรรศน์ incident light microscope และแผนที่แสดงตำแหน่งของภาพ B, C

(B) รอยร้าวนในเซรามิกซึ่งติดสีย้อมซิลเวอร์ไนเตรท

(C) การติดสีย้อมซิลเวอร์ไนเตรทบริเวณรอยต่อระหว่างเซรามิก-คอมโพสิต-ผิวฟัน

(D) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของชั้นทดสอบในภาพ (C)

## สรุปและอภิปรายผลการวิจัย/ Results and Discussion

แม้ว่าผลจากการทดลองนี้จะบ่งชี้ว่าค่าความต้านทานต่อความล้าของการยึดติดของวัสดุเซรามิกและผิวเคลือบฟันมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของค่าแรงบดเคี้ยว ปกติในมนุษย์ แต่พึงตระหนักว่าพื้นที่ผิวของชิ้นทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ ผิวจริงของครอบฟันหรือหน้าฟันเทียม เนื่องจากความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างวัสดุบูรณะฟันและผิวฟันแปรผันตามขนาดของพื้นที่ผิวยึดติด จึงไม่น่าแปลกใจที่วัสดุบูรณะฟันเหล่านี้มีความคงทนเมื่อใช้ทำการบูรณะในผู้ป่วยที่มีแรงบดเคี้ยวปกติซึ่งมีค่าประมาณ 0.5-16 กิโลกรัม อย่างไรก็ตามในผู้ป่วยที่มีแรงบดเคี้ยว มากกว่าปกติ เช่น ผู้ป่วยที่นอนกัดฟันซึ่งอาจมีค่าแรงกัดขณะนอนหลับสูงถึง 80 กิโลกรัม ค่าความแข็งแรงของการยึดติดนี้ไม่เพียงพอ งานวิจัยนี้พบว่าในชิ้นทดสอบส่วนใหญ่รอยแตกร้าวเริ่มเกิดขึ้นในตัววัสดุเซรามิก ไม่ใช่ที่รอยต่อระหว่างวัสดุเซรามิกและผิวเคลือบฟัน แสดงว่าคุณสมบัติความต้านทานต่อความล้าของเซรามิกมี

ความสำคัญมากต่อความแข็งแรงของการยึดติดของวัสดุบูรณะฟันเซรามิกชนิดเฟลสปาทิกและผิวฟัน การพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัตินี้ของวัสดุจึงมีความสำคัญและส่งผลให้วัสดุบูรณะฟันมีความต้านทานต่อแรงบดเคี้ยวได้ดีขึ้น สภาวะที่เป็นจริงในช่องปากนั้นวัสดุบูรณะฟันถูกกระทำด้วยแรงบดเคี้ยวซึ่งมีค่าไม่คงที่ (dynamic load) และอยู่ภายใต้ความชื้นจากน้ำลายและอุณหภูมิในช่องปากที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงๆ อยู่ตลอดเวลาตามลักษณะอาหารที่รับประทาน ตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อความทนทานและอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะฟัน การศึกษาในขั้นต่อไปควรทำการทดลองภายใต้สภาวะจำลองดังกล่าว เพื่อสามารถหาบทสรุปของความทนทานและอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะฟันได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

การวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าซิลเวอร์ในเรซสามารถใช้ในการซ่อมสีรอยร้าวหรือรอยแยกซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวัสดุและในเนื้อเซรามิกได้อย่างชัดเจน จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้วิเคราะห์ร่องรอยความเสียหายในวัสดุได้นอกจากการใช้สีย้อมชนิดอื่น ๆ

## เอกสารอ้างอิง/ References

- [1] Saunders, W.P. (1990), Effect of fatigue upon the interfacial bond strength of repaired composite resins.
- [2] *J Dent*, 18, 158-162. Htang, A., Ohsawa, M., Matsumoto, H. (1995), Fatigue resistance of composite restorations: effect of filler content. *Dent Mater*, 11, 7-13.
- [3] Narva, K.K., Lassila, L.V., Vallittu, P.K. (2004), Fatigue resistance and stiffness of glass fiber-reinforced urethane dimethacrylate composite. *J Prosthet Dent*, 91, 158-163.
- [4] McCabe, J.F., Wang, Y., Braem, M. (2000), Surface contact fatigue and flexural fatigue of dental restorative materials. *J Biomed Mater Res*, 50, 375-380.
- [5] Garner, L.D., and Kotwal, N.S. (1973), Correlation study of incisive biting forces with age, sex and anterior occlusion. *J Dent Res*, 52, 698.
- [6] Fogle, L.L. and Glaros, A.G. (1995), Contribution of facial morphology, age and gender to EMG activity under biting and resting condition. A canonical correlation analysis. *J Dent Res*, 74, 1496.

- [7] Miyaura, K., Matsuka, Y., Morita, M., Yamashita, A., Watanabe, T. (1999), Comparison of biting forces in different age and sex groups: a study of biting efficiency with mobile and non-mobile teeth. *J Oral Rehabil*, 26, 223.
- [8] Nishigawa, K., Bando, E., Nakano, M. (2001), Quantitative study of bite force during sleep associated bruxism. *J Oral Rehabil*, 28, 485.
- [9] Mair, L.H. (1992), The colors of silver with silver nitrate staining in dental materials. *Dent Mater*, 8, 110-117.
- [10] Doremus, R.H. (1965), Optical properties of small silver particles. *J Chem Phys*, 42, 414-417.
- [11] Draughn, R.A. (1979), Compressive fatigue limits of composite restorative materials. *J Dent Res*, 58, 1093-1096.
- [12] Drummond, J.L. and Bapna, M.S. (2003), Static and cyclic loading of fiber-reinforced dental resin. *Dent Mater*, 19, 226-231.
- [13] Lohbauer, U., Von der Horst, T., Frankenberger, R., Kramer, N., Petschelt, A. (2003), Flexural fatigue behavior of resin composite dental restoratives. *Dent Mater*, 19, 435-440.
- [14] McCabe, J. (1985), In Vitro Wear Testing of composite resin. In: *Posterior Composite Resin Dental Restorative Materials*, Peter Szulc Publishing.
- [15] McCabe, J., Carrick, T., et al. (1990), Alternative approaches to evaluating the fatigue characteristics of materials, *Dent Mater*, 6, 24-28.
- [16] Best, D.I. and Rayner, C.W. (1987), "Welch's Approximate Solution for the Behren's-Fisher Problem," *Technometrics*, 29, 205 -210.
- [17] Lehmann, E.L. (1986), *Testing Statistical Hypotheses otheses*, New York: John Wiley & Sons.
- [18] Chase, W. and Bown, F. (1986), *General statistics*, New York: John Wiley & Sons.