

# ผลของการปรับสภาพพื้นผิวโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน ด้วยกรดซัลฟูริกต่อความแข็งผิวระดับจุลภาค และลักษณะจุลสัณฐานวิทยา

## Effects of Surface Pretreatment on Polyetheretherketone with Sulfuric Acid on Microhardness and Microscopic Morphology

ศศิประภา ประคำสาย<sup>1</sup>, พัชราวรรณ ศิลธรรมพิทักษ์<sup>2</sup>, พิลัยศิษฐ์ ชัยจรินนท์

<sup>1</sup>โรงพยาบาลผาง จังหวัดเชียงใหม่

<sup>2</sup>ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Sasiprapha Prakhamsai<sup>1</sup>, Patcharawan Silthampitag<sup>2</sup>, Pisaisit Chaijareenon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fang Hospital, Chiang Mai

<sup>2</sup>Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chiang Mai University

ชม. ทันตสาร 2560; 38(3) : 77-88

CM Dent J 2017; 38(3) : 77-88

### บทคัดย่อ

**วัตถุประสงค์:** เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อความแข็งผิวระดับจุลภาคและลักษณะจุลสัณฐานวิทยา

**ระเบียบและวิธีการวิจัย:** นำโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 98.5 มิลลิเมตรหนา 18 มิลลิเมตร มาตัดด้วยเครื่องไอโซเมท ได้ชิ้นงานขนาด 5×5×2 มิลลิเมตร จำนวน 40 ชิ้น ยึดลงในแม่แบบวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตรด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง ขัดพื้นผิวชิ้นงานให้เรียบด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายเบอร์ 400 800 1,200 และ 2,000

### Abstract

**Objectives:** The purpose of this study was to investigate the effects of surface pretreatment with sulfuric acid at different concentrations on microhardness and microscopic morphology of polyetheretherketone.

**Methods:** Forty specimens of Polyetheretherketone (5×5×2 mm<sup>3</sup>) were embedded in a metal ring diameter 18 mm, height 10 mm with an auto-polymerizing acrylic resin. The specimens were polished with P400, P800, P1200 and P2000 grit

Corresponding Author:

พิลัยศิษฐ์ ชัยจรินนท์

อาจารย์ ดร. ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Pisaisit Chaijareenon

Lecturer, Dr., Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry,  
Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

E-mail: yodent@hotmail.com

แบ่งชิ้นงานเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 8 ชิ้น ได้แก่ กลุ่มควบคุม ซึ่งไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และกลุ่มทดลองจำนวน 4 กลุ่มที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 70 80 90 และ 98 เป็นเวลา 1 นาที ภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออนทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง ณ อุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ส ระดับจุลภาคและวิเคราะห์ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด วิเคราะห์ทางสถิติด้วยความแปรปรวนแบบทางเดียวและการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทุกยี่ห้อที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ )

**ผลการศึกษา:** กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ให้ค่าของความแข็งผิวระดับจุลภาคน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 8.08 เมกะปาสคาล ในขณะที่กลุ่มกรดซัลฟูริกร้อยละ 70 80 และ 90 มีค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคเท่ากับ 25.12 25.62 และ 24.58 เมกะปาสคาลตามลำดับ ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยซัลฟูริก ร้อยละ 70 80 และ 90 พบลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีรูพรุนกระจายโดยทั่วไป โดยมีขนาดและจำนวนของรูพรุนเพิ่มขึ้นตามลำดับและกลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 98 พบลักษณะโครงสร้างตาข่าย

**สรุปผลการศึกษา:** ผลของการศึกษาของการทดลองนี้สรุปได้ว่าการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ปรับสภาพพื้นผิวเป็นระยะเวลา 1 นาที ส่งผลให้พื้นผิวโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตนเกิดการกัดกร่อนที่มากเกินไปทำให้ระดับความแข็งผิววิกเกอร์สลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

**คำสำคัญ:** โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน กรดซัลฟูริก ความแข็งผิววิกเกอร์ส

silicon carbide papers. The specimens were divided into 5 surface pretreatment groups ( $n=8$ ): control group (no surface pretreatment), 70% sulfuric acid, 80% sulfuric acid, 90% sulfuric acid and 98% sulfuric acid, respectively. Sulfuric acid was applied 1 min to each surface. After etching, the specimens were rinsed thoroughly with deionized water and ultrasonically cleaned for 10 min. Subsequently, all specimens were dried at room temperature before Vickers microhardness test and scanning electron microscopy analysis on the surface of specimens. One-way ANOVA following by Tukey's multiple comparisons were tested ( $p < 0.05$ ).

**Results:** The group of 98% sulfuric acid pretreatment showed the statistically significantly lowest Vickers microhardness (8.08 Mpa). The group of 70%, 80% and 90% sulfuric acid presented 25.12, 25.62 and 24.58 Mpa, respectively. The pretreatment Polyetheretherketone with 70%, 80% and 90% sulfuric acid showed microscopic morphology of surfaces with increasing pits and pores, respectively. Fiber-like frameworks were distributed throughout the surfaces in the 98% sulfuric acid etching group.

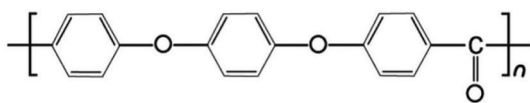
**Conclusions:** Within the limitation of this study, it can be concluded that surface pretreatment with 98% sulfuric in 60 s highly corroded of Polyetheretherketone surface, which affected the lowest Vickers microhardness.

**Keywords:** polyetheretherketone, sulfuric acid, vickers microhardness

**บทนำ**

การสูญเสียฟันธรรมชาติทำให้ผู้ป่วยเกิดปัญหาในระบบการบดเคี้ยวส่งผลต่อความสวยงามและบุคลิกภาพ การบูรณะช่องปากด้วยการใส่ฟันเทียมทดแทนจึงมีความสำคัญ ในปัจจุบันทันตกรรมเพื่อความสวยงามมีบทบาทมากยิ่งขึ้นจึงมีความพยายามคิดค้นวัสดุใหม่ที่มีความแข็งแรงและสวยงามเหมือนฟันธรรมชาติมาใช้ทดแทนโลหะ

โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone) หรือ พียูอีเค (PEEK) เป็นวัสดุโพลีเมอร์เทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (semi-crystalline thermoplastic polymer) จัดอยู่ในสกุลเดียวกับโพลีเอริลอีเทอร์คีโตน (polyaryletherketone; PEAK) มีโครงสร้างประกอบไปด้วยสายวงแหวนอะโรมาติกซ้ำกันสามหน่วย (three aromatic ring repeating units) เชื่อมต่อกันด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ชนิดอีเทอร์ (ether) สองพันธะ และคีโตน (ketone) หนึ่งพันธะ<sup>(1,2)</sup>



**รูปที่ 1** โครงสร้างโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน (พียูอีเค)<sup>(1)</sup>

**Figure 1** Structure of polyetheretherketone (PEEK)

พียูอีเคเป็นโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนรูปด้วยความร้อน (Thermoplastic polymer) ณ อุณหภูมิห้องมีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งมีความแข็งและเปราะ ในช่วงอุณหภูมิ 143 องศาเซลเซียสมีลักษณะเป็นทรานสิชันแก้ว (glass transition phase; Tg) พียูอีเคจะอ่อนตัวและยืดตัวได้ เมื่อถึงช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (crystalline melt transition temperature; Tm) ที่ 343 องศาเซลเซียสเกิดการหลอมตัว ดังนั้นจึงสามารถนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ด้วยวิธีการต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้แก่ กระบวนการฉีด (injection molding) กระบวนการอัดรีด (extrusion molding) และกระบวนการอัด (compression molding) เป็นต้น และชิ้นงานจะแข็งตัวคงรูปเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานลดลง<sup>(1)</sup> พียูอีเค มีสมบัติทางกลที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี<sup>(2,3)</sup> ทนต่อกัมมันตรังสี จึงสามารถทำให้ปลอดเชื้อได้ด้วยวิธีการ

ฆ่าเชื้อด้วยความร้อนและรังสีแกมมาโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ มีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ<sup>(4)</sup> ต้านทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) การสึก (wear) การเสียดสี (friction) ในบริเวณที่รับแรงสูง (bearing area)<sup>(5)</sup> และคงทนต่อการละลายตัวจากสารละลายทางเคมี ยกเว้นกรดซัลฟูริก<sup>(7,10,14,15)</sup> พียูอีเคบริสุทธิ์ (pure PEEK) หรือชนิดแบบเนื้อเดียวกัน (homogenous form) มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นอยู่ที่ 3-4 จิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งยังมีค่าต่ำและไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในบริเวณที่รับแรงสูง ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวโดยเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุอัดแทรก (filler) เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว หรือเซรามิก ให้มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นใกล้เคียงกับกระดูกทึบ (18 GPa) นำไปใช้เป็นกระดูกเทียมได้ดีกว่าการใช้วัสดุกลุ่มโลหะชนิดไทเทเนียม (110 GPa)<sup>(1)</sup> นอกจากนี้ยังมีการเติมสารอัดแทรกทางชีวภาพ (bioactive filler) เช่น ไฮดรอกซีแอปาทิต (hydroxyapatite) เพื่อให้มีความเข้ากันกับเนื้อเยื่อ (biocompatibility) ได้ดีขึ้น<sup>(6)</sup> ดังนั้นพียูอีเคจึงเป็นวัสดุที่โดดเด่นและนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการแพทย์

พียูอีเคถูกนำมาใช้ในทางทันตกรรมมากขึ้น ยี่ห้อพียูอีเคที่นิยมนำมาใช้ นั้น เป็นชนิดที่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุอัดแทรก ได้แก่ BioHPP, Bredent GmbH (นาโนเซรามิกร้อยละ 20), Dentokeep disc, NT Trading (นาโนเซรามิกร้อยละ 20 และไทเทเนียมไดออกไซด์) ข้อดีของพียูอีเคคือ มีความแข็งแรงสูง ต้านทานต่อการแตกหักโดยสามารถรับแรงบดเคี้ยวได้ถึง 1,400 นิวตัน<sup>(7,8)</sup> มีน้ำหนักเบาใกล้เคียงกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (polymethylmethacrylate, PMMA) กรอแต่งได้ง่ายและมีสีขาวใกล้เคียงฟันธรรมชาติ จึงนำมาเป็นวัสดุทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้โลหะ เช่น เป็นหลักยึดชั่วคราวของรากเทียมในฟันหน้า โครงสร้างฐานฟันเทียมชนิดติดแน่นและถอดได้ รวมทั้งส่วนประกอบของแผ่นปิดเพดานโหว่ (maxillary obturator)<sup>(9,10)</sup> เป็นต้น แต่มีข้อเสียในแง่ของความสวยงามเนื่องจากความทึบแสงของวัสดุทำให้ไม่สามารถใช้งานเป็นวัสดุบูรณะแบบชิ้นเดียวได้ (monolithic restoration) จำเป็นต้องปิดสีด้วยชั้นวีเนียร์หรือเรซินคอมโพสิตเพื่อให้มีความสวยงามมากขึ้น อย่างไรก็ตามพียูอีเคมีความเฉื่อย มีแรงดึงผิวต่ำและต้านทานต่อการปรับสภาพฟันผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ ทำให้เกิด

ปัญหาการยึดติดที่ดีกับสารยึดติดทางทันตกรรม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการศึกษาต่าง ๆ ในการหาวิธีการปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ที่เหมาะสมและพัฒนาความแข็งแรงยึดติดในห้องปฏิบัติการเพื่อสร้างการยึดติดที่ดี สามารถใช้งานได้อย่างคงทนและยาวนาน (long term durability) และประสบความสำเร็จในทางคลินิก

การปรับสภาพพื้นผิว (surface pretreatment) ฟลูออไรด์สามารถแบ่งตามวิธีทำได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. วิธีการเชิงกล (mechanical pretreatment) ได้แก่ การขัดด้วยกระดาษทราย การพ่นด้วยอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide) และการเคลือบผิวด้วยซิลิกา (silica coating)<sup>(8,11,12)</sup>

2. วิธีการทางเคมี (chemical pretreatment, chemical etching, solvent degreasing) ได้แก่ การกัดผิวด้วยสารละลายปิรันยา (piranha solution) (กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยสัดส่วน 1:1 หรือ 10:3)<sup>(13,14)</sup> และการกัดผิวด้วยกรดซัลฟูริก (sulfuric acid)<sup>(8,11,15-17)</sup> ร่วมกับการทาสารยึดติดไพรเมอร์ (primer) และเรซิน (resin)<sup>(12,18,19)</sup>

3. วิธีการทางกายภาพ (physical pretreatment) ได้แก่ การพ่นบนพื้นผิวด้วยอาร์กอนพลาสมา (argon plasma)<sup>(20)</sup> และการใช้เลเซอร์ (laser treatment)<sup>(21)</sup>

การปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 พบว่าให้ค่าความแข็งแรงยึดเหนี่ยว (shear bond strength, SBS) ระหว่างฟลูออไรด์กับเรซินคอมโพสิตสูงกว่าการเป่าทรายหรือการเคลือบซิลิกา<sup>(8)</sup> ซึ่งการปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถสร้างพื้นผิวฟลูออไรด์ให้มีพันธะหรือองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการยึดติดทางเคมีด้วยหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3\text{H}$ )<sup>(15)</sup> และสร้างลักษณะผิวที่ขรุขระทำให้เกิดการยึดติดเชิงกลในระดับจุลภาค (micro-mechanical locking)<sup>(8,17)</sup> อย่างไรก็ตามโครงสร้างฟลูออไรด์อาจเกิดความอ่อนแอจากการถูกรัดกัดผิวจนสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลได้<sup>(15)</sup>

ความแข็งแรงผิวเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่นิยมใช้ทดสอบวัสดุทั้งทางอุตสาหกรรมและทางทันตกรรม เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้น โดยพบว่าสัมพันธ์กับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูป (deformation behavior) จุดคราก (yield point) ความต้านทานการสึกกร่อน (wear resistance) และมอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) โดยความแข็งแรงผิวแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness) เป็นการวัดค่าความแข็งแรงที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถวัดค่าความแข็งแรงได้ในช่วงที่กว้างและมีหน่วยของค่าความแข็งแรงเดียวคือ VHN สำหรับค่าน้ำหนักหนึ่ง ๆ ทำให้สามารถทดสอบวัสดุได้หลายชนิด โดยรอยกดที่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งทำให้สามารถวัดเส้นทแยงมุมได้ชัดเจนและลดความผิดพลาดในการกำหนดระยะของการวัด<sup>(22,23)</sup> มีการศึกษาความแข็งแรงผิวแบบวิกเกอร์สในฟลูออไรด์ชนิดคอมโพสิตเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงผิวเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างอนุภาค (inter-particle distance) ของวัสดุอัดแทรกลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมความแข็งแรงด้วยขนาดอนุภาคระดับนาโนและการเติมปริมาณอนุภาคให้มากขึ้น<sup>(22,24,25)</sup>

การปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ด้วยระยะเวลา 1 นาที ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างฟลูออไรด์ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อสรุปแน่ชัดว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุด ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ทำให้เกิดลักษณะของพื้นผิวที่เอื้อต่อการยึดติดและคงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกในความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อลักษณะผิวฟลูออไรด์ที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งการทดสอบเชิงกลภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่างกันที่มีผลต่อลักษณะจุลสัณฐานวิทยาและความแข็งแรงระดับจุลภาคของโพลีเอทีเทอร์คิโตน โดยมีสมมติฐานหลักคือไม่มีความแตกต่างกันของความแข็งแรงระดับจุลภาคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกต่างความเข้มข้น

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อทางการค้า บริษัทผู้ผลิต และส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

**Table 1** Trade names, manufacturers and compositions of experimental materials

ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์ (Trade names)	บริษัทผู้ผลิต (Manufacturers)	ส่วนประกอบ (Compositions)	เลขที่ผลิต (Lot.No)
Dentokeep	Nt-trading, Germany	Polyetheretherketone Titanium dioxide pigments (ceramic filled 20%)	13DK1801
Autopolymerizing acrylic resin	Lang, Wheeling, Illinois, USA	Methyl Methacrylate 99-97-8 N, N-dimethyl-p-toluidine	1880-13AA
Sulfuric acid	RCI Labscan Limited, Bangkok, Thailand	98% Sulfuric acid	7664-93-9

### ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพีอีอีเค

นำแผ่นพีอีอีเค (Dentokeep PEEK, Nt-trading, Karlsruhe, Germany) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 98.5 มิลลิเมตร หนา 18 มิลลิเมตร ตัดด้วยเครื่องตัดไอโซเมท (Isomet<sup>®</sup> 1000 precision saw, Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA) ความเร็ว 300 รอบต่อนาทีได้ชิ้นงานขนาด 5x5x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร<sup>(20)</sup> จำนวน 40 ชิ้น ยึดชิ้นงานลงในแม่แบบโลหะวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง (Orthojet, Lang, Wheeling, Illinois, USA) โดยกำหนดให้ตำแหน่งจุดตัดของเส้นทแยงมุมชิ้นงานมีระยะห่างจากขอบแม่แบบ 9 มิลลิเมตร และขัดผิวชิ้นงานให้เรียบได้มาตรฐานเดียวกันด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย (Grinding/Polishing Machine, MoPao 160E, MEGA Advance, China) ด้วยความละเอียด

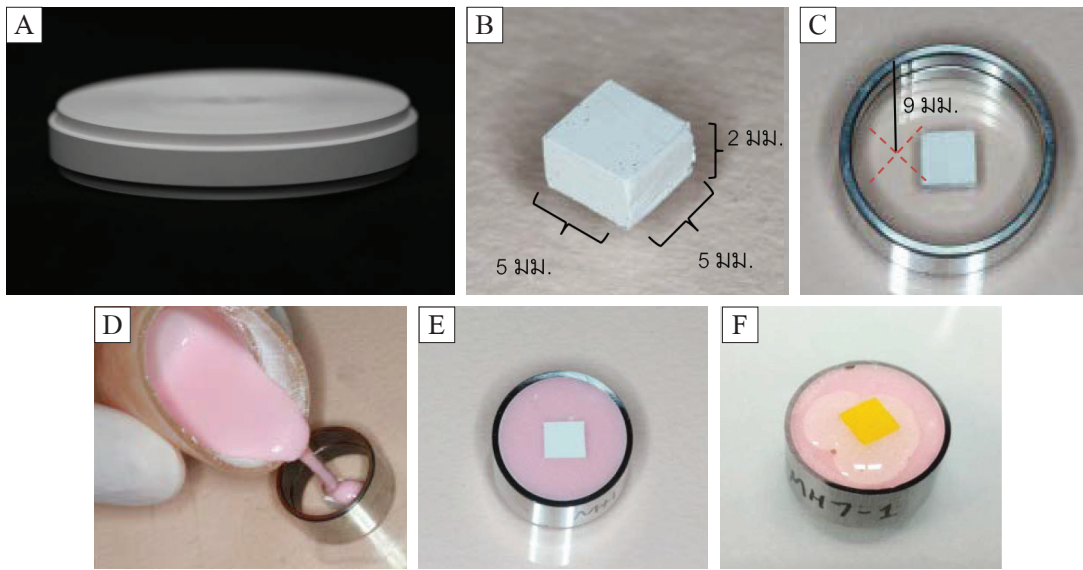
400 800 1,200 และ 2,000 กริต เป็นระยะเวลา 1 นาทีต่อความละเอียด จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนในเครื่องอัลตราโซนิก (Transsonic T700, Elma, Singen, Germany) เป็นเวลา 10 นาที

แบ่งกลุ่มทดลองเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 8 ชิ้น ได้แก่ กลุ่มควบคุมซึ่งไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและกลุ่มทดลองจำนวน 4 กลุ่มที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว ด้วยกรดซัลฟูริก ร้อยละ 70 80 90 และ 98 เป็นเวลา 1 นาที ตามลำดับ สารละลายกรดซัลฟูริก ร้อยละ 70 80 และ 90 เตรียมได้จากการเจือจางความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ร้อยละ 98 ด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยมีสัดส่วนของปริมาตรกรดซัลฟูริกและน้ำปราศจากไอออนดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนปริมาตรของน้ำปราศจากไอออนต่อปริมาตรของกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 70, 80, 85 และ 90

**Table 2** Proportion of volume of deionized water to the volume of 98% sulfuric acid required in preparation of 10 ml diluted sulfuric acid concentration at 70%, 80%, 85% and 90%

Diluted sulfuric acid (%)	Volume of deionized water (ml)	Volume of 98% sulfuric acid (ml)
70	2.86	7.14
80	1.84	8.16
85	1.33	8.67
90	0.82	9.18



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- A) แผ่นพีอีเคียท์ Dentokeep B) ตัดแผ่นพีอีเคียท์ให้มีขนาดชิ้นงานขนาด 5×5×2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
- C) ตำแหน่งการวางชิ้นงานในแม่แบบโลหะวงแหวน D) การยึดชิ้นงานด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง
- E) ลักษณะชิ้นงานภายหลังการขัดพื้นผิวให้เรียบเป็นมาตรฐานเดียวกัน
- F) การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก

Figure 2 Specimens preparation

- A) Dentokeep disc B) PEEK specimen size 5×5×2 mm<sup>3</sup> was sectioned from PEEK disc
- C) Position of PEEK specimen in metal ring
- D) PEEK specimen was embedded in an auto-polymerization acrylic resin E) A specimen after polishing
- F) Surface pretreatment with sulfuric acid

ภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออนและทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง นำไปตรวจสอบลักษณะจุลทรรศน์วิทยาของพื้นผิวชิ้นงานและความแข็งผิวระดับจุลภาค

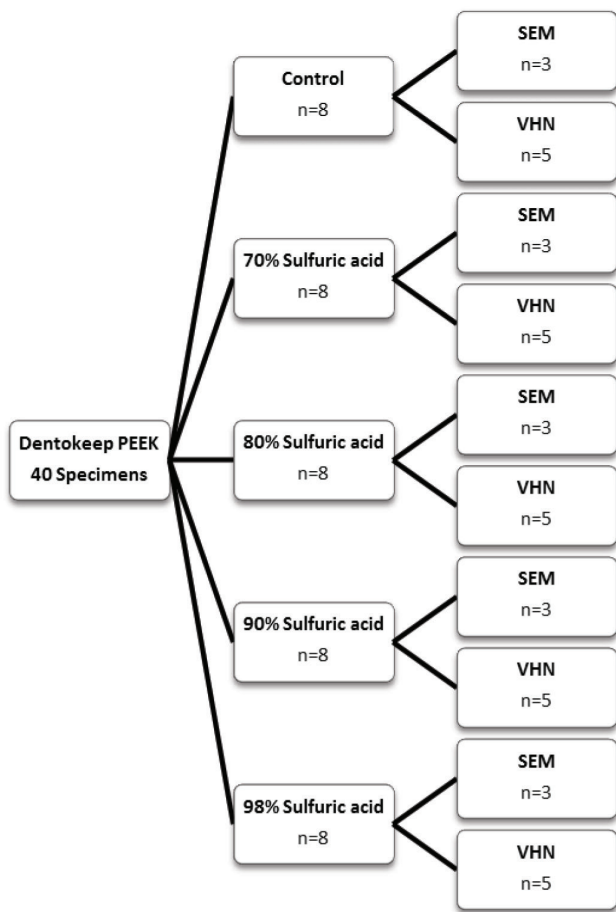
**การทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Vickers microhardness, VHN)<sup>(22)</sup>**

นำชิ้นงานทั้ง 5 กลุ่ม ๆ ละ 5 ชิ้นงานไปตรวจสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาค (STARTECH SMV-1000 Guiyang Sunproc International Trade Co.,Ltd., Guiyang, China) วัดความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สบนผิวชิ้นงานด้วยหัวกดเพชรขนาดแรงกด 100 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที จำนวน 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน โดยแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 100 ไมโครเมตร เริ่มต้น

ทดสอบรอยกดแรกบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน วัดความยาวเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสองเส้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า หลังจากนั้นปรับกล้องจุลทรรศน์ให้มีกำลังขยาย 50 เท่า ปรับตำแหน่งรอยกดที่ทดสอบแล้วให้อยู่มุมล่างของจอแสดงภาพ และกำหนดให้จุดรอยกดใหม่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของจอแสดงภาพ แล้วทำการทดสอบครั้งต่อไป นำค่าทั้งหมดมาเฉลี่ยและคำนวณเป็นค่าความแข็งผิวแบบวิกเกอร์สและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

**การตรวจสอบลักษณะจุลทรรศน์วิทยาของผิวชิ้นงาน (Microscopic morphology)**

นำชิ้นงานทั้ง 5 กลุ่ม ๆ ละ 3 ชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5910LV, JOEL, Peabody, Massachusette, USA) เคลือบชิ้นงานทดสอบด้วยทองคำด้วยทองและใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า



**รูปที่ 3** แผนผังการแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามการปรับสภาพพื้นผิวที่อีอีเคด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อทดสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (VHN)

**Figure 3** Diagram of test groups by surface pretreatment of PEEK with different concentrations of sulfuric acid for surface morphologic testing with scanning electron microscope (SEM) and Vickers microhardness testing (VHN)

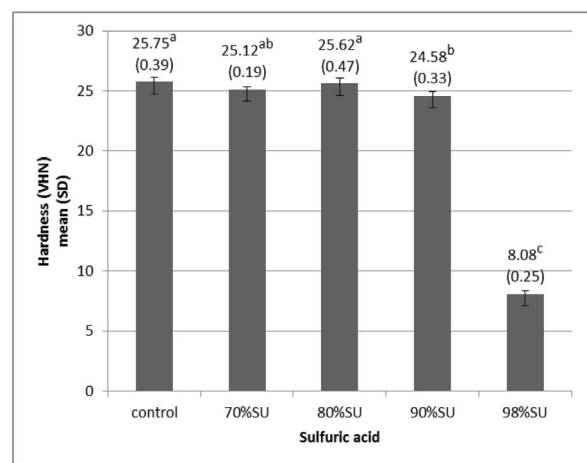
**การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ**

นำผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มมาตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลด้วยวิธีชาปิโร-วิลค์ (Shapiro-Wilk test) และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทูกีย์ (Tukey multiple comparison test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05)

**ผลการศึกษา**

**ผลการทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส**

จากการทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส พบว่าผิวพีอีเคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 มีค่าเฉลี่ยความแข็งผิวต่ำที่สุด (8.08±0.25 VHN) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ ดังแสดงในแผนภูมิที่ 1



**แผนภูมิที่ 1** แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ส (mean VHN) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

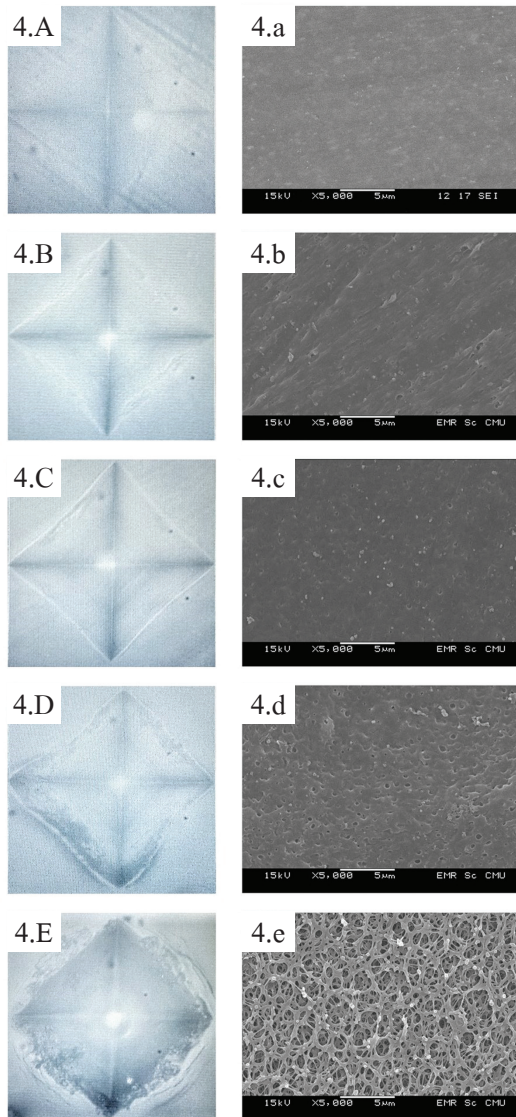
**Diagram 1** Mean and standard deviation (SD) of Vickers hardness number (VHN)

SU: Sulfuric acid

อักษรด้วยภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงค่า VHN ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 (p < 0.05)

Different capital superscript letters indicate that VNH were significantly different at p < 0.05.

ลักษณะของรอยกดที่ได้จากการทดสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า พบว่ากลุ่มควบคุม (รูปที่ 4.A) กลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 70 (รูปที่ 4.B) และกลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 80 (รูปที่ 4.C) มีความสมบูรณ์ของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมที่มีสมมาตรและขอบเขตชัดเจน ส่วนกลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 90 (รูปที่ 4.D) เริ่มมีรอยกดรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตร แต่ขอบเขตยังชัดเจน ส่วนกลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 98 (รูปที่ 4.E) มีรอยกดรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตร ขอบเขตไม่ชัดเจนและโค้งงอ



**รูปที่ 4** แถวซ้าย ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะรอยกดที่ได้จากการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส: 4.A) ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว 4.B) กรดซัลฟูริกร้อยละ 70 4.C) กรดซัลฟูริกร้อยละ 80 4.D) กรดซัลฟูริกร้อยละ 90 และ 4.E) กรดซัลฟูริกร้อยละ 98

**Figure 4** Left row images of stereomicroscope at magnification 500 X characterize indentations of the Vickers microhardness: 4.A) no pretreatment, 4.B) 70% sulfuric acid, 4.C) 80% sulfuric acid, 4.D) 90% sulfuric acid and 4.E) 98% sulfuric acid

**รูปที่ 4** แถวขวา ภาพ SEM กำลังขยาย 5,000 เท่าแสดงลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวพีอีเคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว: 4.a) ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว 4.b) กรดซัลฟูริกร้อยละ 70 4.c) กรดซัลฟูริกร้อยละ 80 4.d) กรดซัลฟูริกร้อยละ 90 และ 4.e) กรดซัลฟูริกร้อยละ 98

**Figure 4** Right row images of SEM at magnification 5,000 X characterize surface microscopic morphology of PEEK after surface pretreatment: 4.a) no pretreatment, 4.b) 70% sulfuric acid, 4.c) 80% sulfuric acid, 4.d) 90% sulfuric acid and 4.e) 98% sulfuric acid

**ผลการตรวจสอบลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของผิวชิ้นงาน**

เมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4 พบผิวพีอีเคกลุ่มควบคุม (รูปที่ 4.a) มีลักษณะเรียบ กลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 70 (รูปที่ 4.b) กลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 80 (รูปที่ 4.c) และ กลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 90 (รูปที่ 4.d) มีลักษณะผิวไม่เรียบ พบรูพรุนกระจายโดยทั่วไป โดยมีขนาดและจำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้นตามลำดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มซัลฟูริกร้อยละ 98 (รูปที่ 4.e) พบลักษณะพื้นผิวมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ากลุ่มอื่น ๆ ร่วมกับลักษณะโครงร่างตาข่าย

**บทวิจารณ์**

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความแข็งผิวระดับจุลภาค และลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพีอีเคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ กันซึ่งปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยพบว่ากรดซัลฟูริกร้อยละ 98 มีค่าเฉลี่ยความแข็งผิวต่ำที่สุดและแตกต่างจากกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) Abdul Halim และคณะ<sup>(26)</sup> กล่าวว่า การละลายตัวของพื้นผิวพีอีเคในกรดซัลฟูริกเกิดจากการสลายตัวของพีอีเคเมทริกซ์ (PEEK matrix) ด้วยปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (sulfonation) ซึ่งในการศึกษานี้พบว่าการที่ปรับสภาพพื้นผิวพีอีเคด้วยกรดซัลฟูริกจะพบลักษณะรูพรุนกระจายโดยทั่วไป โดยมีขนาดและจำนวนเพิ่มขึ้นจนมี



ลักษณะโครงร่างตาข่ายแปรผันตามความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้นซึ่งลักษณะจุลสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับการศึกษาของ Sproesser และคณะ<sup>(16)</sup>

การยึดติดของรอยประสานระหว่างวัสดุอัดแทรกและ โพลีเมอร์เมทริกซ์ (particle-matrix interfaces adhesion) เป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติเชิงกลของ โพลีเมอร์<sup>(27,28)</sup> พบว่าการลดช่องว่างระหว่างรอยประสาน ดังกล่าวด้วยการเติมวัสดุอัดแทรกที่มีขนาดเล็กลง มีปริมาณ เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวที่สามารถต้านทานการสึกของ วัสดุได้<sup>(24)</sup> และมีการศึกษาที่สนับสนุนการเติมวัสดุอัดแทรก ชนิดนาโนคอมโพสิตในพียอไอเคที่พบว่าให้ค่าความแข็งผิว ระดับจุลภาคสูงกว่าการเติมวัสดุอัดแทรกชนิดไมโคร คอมโพสิต<sup>(22)</sup> ดังนั้นในทางทันตกรรมจึงนิยมใช้พียอไอเคที่มี การเสริมวัสดุอัดแทรกกลุ่มนาโน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ยี่ห้อ Dentokeep ที่มีองค์ประกอบของนาโนเซรามิกร้อยละ 20 และ ไทเทเนียมไดออกไซด์

ในแง่ของการนำพียอไอเคมาใช้ในเป็นวัสดุบูรณะทาง ทันตกรรมเพื่อความสวยงามนั้น พบว่าพียอไอเคยังมีการยึดติด กับวีเนียร์คอมโพสิตที่ต่ำ ปัจจุบันจึงมีการศึกษามากมาย เกี่ยวกับการพัฒนาความแข็งแรงยึดติดระหว่างพียอไอเคและ เรซินคอมโพสิต<sup>(8,11,14,16,17,19,20,29,30)</sup> และพบการศึกษาที่ สนับสนุนวิธีการปรับสภาพพื้นผิวพียอไอเคด้วยกรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 98 ในระยะเวลา 1 นาที ร่วมกับการทา สารยึดติด ที่พบว่าให้ค่าการยึดติดแบบเฉือนสูงกว่าการเป่า ทราย การเคลือบซิลิกา และสารละลายยิบรันยา<sup>(8,30)</sup> มีหลาย การศึกษาอธิบายว่าลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุนเป็น ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงยึดติดทางเชิงกลจาก ความสามารถในการแทรกซึมของเรซินคอมโพสิต<sup>(8,11,17,30)</sup> อย่างไรก็ตามในอีกการศึกษาเมื่อปรับสภาพพื้นผิวพียอไอเค ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เป็นระยะเวลา 5 15 30 60 90 120 และ 300 วินาที พื้นผิวพียอไอเคจะเกิดลักษณะโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่ขึ้น และ เมื่อใช้ระยะเวลา มากกว่า 120 วินาที ค่าความแข็งแรงยึดเฉือน (SBS) ต่ำลงเมื่อยึดติดกับสารยึดติดทุกชนิด กล่าวได้ว่าผล ของค่าความแข็งแรงยึดเฉือนกับเรซินคอมโพสิตต่างชนิดกัน ไม่แปรผันตามหรือสัมพันธ์กับระยะเวลาในการกัดพื้นผิวของ พียอไอเคด้วยกรดซัลฟูริกและยังพบความล้มเหลวการแตกหัก ภายในพียอไอเคเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาปรับสภาพพื้นผิวมากขึ้น<sup>(16)</sup>

ดังนั้นแม้ว่าการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ปรับ สภาพพื้นผิวพียอไอเค จะทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนระหว่าง พียอไอเคและเรซินคอมโพสิตสูงในช่วง 8.3 MPa ถึง 27.1 MPa<sup>(8,11,17,30)</sup> อย่างไรก็ตามพื้นผิวพียอไอเคที่มีลักษณะรูพรุน มากเกินไปอาจส่งผลต่อการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลและ ความทนทานของการยึดติด (bond durability) ระหว่างวัสดุ ในระยะยาวได้

ในการศึกษานี้พื้นผิวพียอไอเคที่ถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วย กรดซัลฟูริกความเข้มข้นที่สูง จะพบการสลายตัวของ โครงสร้างโพลีเมอร์เมทริกซ์เพิ่มมากขึ้นจนเห็นลักษณะ โครงร่างตาข่าย มีความหนาแน่นของเนื้อวัสดุลดลง เกิดการ แยกตัวของรอยประสานระหว่างวัสดุอัดแทรกและโพลีเมอร์ เมทริกซ์ จึงส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป ของวัสดุลดลง<sup>(25)</sup> โดยพบค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบ วิกเกอร์สของกลุ่มกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 มีค่าต่ำที่สุดซึ่งมี การสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล สอดคล้องกับการศึกษาของ Shuai และคณะ<sup>(31)</sup> ที่กล่าวว่าความทนทานของพียอไอเค คอมโพสิต (PEEK-based composites) ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพ ของรอยประสานระหว่างโพลีเมอร์เมทริกซ์และวัสดุอัดแทรก จากการเก็บพียอไอเคไว้ในน้ำลายเทียมที่มีค่าความเป็นกรด เบสต่างกันที่ pH 3,7 และ 10 พบว่าพียอไอเคที่อัดแทรกด้วย เส้นใยคาร์บอน (CFR-PEEK) จะมีค่าความไวต่อการเปลี่ยน สถานภาพจากพลาสติกเป็นของเหลว (plasticity index) หรือมีความอ่อนตัวสูงกว่าและมีค่าการคืนรูปภายหลังการวัด ความแข็งแรงผิวระดับนาโน (nanoindentation recovery) ต่ำกว่าพียอไอเคบริสุทธิ์ (Pure PEEK) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแทรกซึมของโมเลกุลตัวทำละลายของ น้ำลายเทียมแทรกเข้าไปยังช่องว่าง (free space way) และทำลายแรงยึดติดภายในรอยประสานระหว่างโพลีเมอร์ เมทริกซ์และเส้นใยคาร์บอนในระดับนาโน ดังนั้นหากนำ พียอไอเคที่มีการแยกตัวของรอยประสาน (debonding) จาก การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูงดังกล่าว มาใช้ในช่องปาก อาจส่งผลทำให้เกิดรอยรั่วซึมของน้ำตาม ขอบวัสดุและเกิดความล้มเหลวของวัสดุบูรณะได้

จากการศึกษาครั้งนี้กล่าวได้ว่าการทำลายโครงสร้าง ของพียอไอเคสามารถเกิดได้จากการละลายตัวของโพลีเมอร์ เมทริกซ์และการขาดเสถียรภาพของรอยประสานระหว่าง โพลีเมอร์เมทริกซ์และวัสดุอัดแทรก ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติ

เชิงกลและความทนทานในระยะยาว (long term durability) ของวัสดุ<sup>(32)</sup> แม้ว่าวิธีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก ร้อยละ 98 ระยะเวลา 1 นาที เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่ม การยึดติดเชิงกลที่ติระหว่างพีอีอีเคและเรซินคอมโพสิต<sup>(30)</sup> อย่างไรก็ตามการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 อาจ เป็นวิธีการปรับสภาพพื้นผิวที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากพื้นผิว พีอีอีเคไม่ทนทานต่อแรงบดเคี้ยวในระยะยาวและเสื่อมสภาพ ภายใต้อาการเสียดสีในช่องปากได้ ซึ่งในทางคลินิกจะ เกิดรอยร้าวซึมตามขอบวัสดุ เกิดฟันผุต่อ วัสดุบูรณะหลุดและ เกิดความล้มเหลวของวัสดุบูรณะตามมา ดังนั้นจากผลการ ทดลองที่พบว่าทางเลือกใช้วิธีปรับสภาพพื้นผิวพีอีอีเคด้วย กรดซัลฟูริกในความเข้มข้นที่ต่ำหรือไม่ใช้กรดเลย (ผลจาก แผนภูมิที่ 1) อาจช่วยลดปัญหาการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล ของพีอีอีเคในระยะยาวได้<sup>(33)</sup> การศึกษาในครั้งนี้มีข้อจำกัด ของการวิจัยเนื่องจากใช้พีอีอีเคชนิดเดียวในการทดสอบ ซึ่ง ในกรณีที่มีการใช้พีอีอีเคชนิดอื่นที่เสริมวัสดุอัดแทรกต่าง ชนิดที่มีทั้งขนาด ปริมาณ และการเรียงตัวที่ต่างกันอาจ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงผิวที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้การศึกษา ผลของการปรับสภาพพื้นผิวพีอีอีเคด้วยกรดซัลฟูริกความ เข้มข้นต่าง ๆ และด้วยระยะเวลาอื่น ๆ ต่อความแข็งแรง ยึดติระหว่างพีอีอีเคและเรซินคอมโพสิตควรมีการศึกษา ต่อไป เพื่อหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและระยะเวลาใน การปรับสภาพพื้นผิวที่เหมาะสมและพีอีอีเคชนิดที่มีวัสดุ เสริมความแข็งแรงต่าง ๆ ที่ส่งเสริมให้เกิดการยึดติดที่ดีขึ้น ระหว่างพีอีอีเคและเรซินคอมโพสิต และยังคงคุณสมบัติ เชิงกลที่ดีภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว

**บทสรุป**

ภายใต้อาการเสียดสีการศึกษานี้สรุปได้ว่าการปรับสภาพ พื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้พื้นผิว พีอีอีเคเกิดรูพรุนที่มากขึ้นและจะพบลักษณะโครงสร้างตาข่าย เมื่อใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ซึ่งส่งผลทำให้ค่า ความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สของกลุ่มกรดซัลฟูริก ร้อยละ 98 ลดลงและมีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวได้ ว่ามีการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลซึ่งอาจส่งผลต่อความทนทาน ของวัสดุบูรณะภายใต้อาการเสียดสีในช่องปาก ดังนั้น การเลือกใช้วิธีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความ เข้มข้นที่ต่ำลงอาจช่วยลดการเกิดปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม

ก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติ เชิงกลประเภท อื่น ๆ เพื่อหาวิธีการปรับสภาพพื้นผิวด้วย กรดซัลฟูริกความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อชนิด พีอีอีเคที่มีวัสดุเสริมความแข็งแรงแตกต่างกันและให้ความ แข็งแรงยึดติดที่ติระหว่างพีอีอีเคและเรซินทางทันตกรรม ต่อไป

**กิตติกรรมประกาศ**

การศึกษานี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะ ทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขอขอบคุณ ดร. ธนพัฒน์ ศาสตร์ระจิก นักวิจัย ศูนย์วิจัยทางทันตแพทยศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และนายสุขแก้ว คำเมืองสา เจ้าหน้าที่ภาควิชาชีพสีกส์และวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำในการใช้ เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัยครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

1. Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials* 2007; 28: 4845-4869.
2. Kurtz SM. PEEK *Biomaterial Handbook*. 1<sup>th</sup> ed. Massachusetts; Elsevier; 2012: 2-4.
3. Chu XX, Wu ZX, Huang RJ, Zhou Y, Li LF. Mechanical and thermal expansion properties of glass fibers reinforced PEEK composites at cryogenic temperatures. *Cryogenics* 2010; 50: 84-88.
4. Celina M, Gillen KT, Malone GM, Clough RL, Nelson Jr WH. Polymer materials and component evaluation in acidic-radiation environments. *Radiat Phys Chem* 2001; 62: 153-161.
5. Zhang Z, Breidt C, Chang L, Friedrich K. Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. *Tribol Int* 2004; 37: 271-277.
6. Almasi D, Izman S, Assadian M, Ghanbari M, Abdul Kadir MR. Crystalline ha coating on peek via chemical deposition. *Appl Surf Sci* 2014; 314: 1034-1040.

7. Stawarczyk B, Eichberger M, Uhrenbacher J, Wimmer T, Edelhoff D, Schmidlin PR. Three-unit reinforced polyetheretherketone composite FDPs: influence of fabrication method on load-bearing capacity and failure types. *Dent Mater J* 2015; 34: 7-12.
8. Stawarczyk B, Beuer F, Wimmer T, Jahn D, Sener B, Roos M, et al. Polyetheretherketone-a suitable material for fixed dental prostheses. *J Biomed Mater Res Part B* 2013; 101: 1209-1216.
9. Costa-Paula S, Torrents-Nicolas J, Brufau de Barbera M, Cabratosa-Termes J. Use of polyetheretherketone in the fabrication of a maxillary obturator prosthesis: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 680-682.
10. Najeeb S, Zafar MS, Khurshid Z, Siddiqui F. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *J Prosthodont Res* 2016; 60: 12-19.
11. Schmidlin PR, Stawarczyk B, Wieland M, Attin T, Hämmerle CHF, Fischer J. Effect of different surface pre-treatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. *Dent Mater* 2010; 26: 553-559.
12. Fuhrmann G, Steiner M, Freitag-Wolf S, Kern M. Resin bonding to three types of polyaryletherketones (PAEKs)-durability and influence of surface conditioning. *Dent Mater* 2014; 30: 357-363.
13. Hallmann L, Mehl A, Sereno N, Hämmerle CHF. The improvement of adhesive properties of PEEK through different pre-treatments. *Appl Surf Sci* 2012; 258: 7213-7218.
14. Stawarczyk B, Jordan P, Schmidlin PR, et al. PEEK surface treatment effects on tensile bond strength to veneering resins. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 1278-1288.
15. Sproesser PR, Uhrenbacher J, Eichberger Ma, Roos M, Stawarczyk B. Work of adhesion between resin composite cements and PEEK as a function of etching duration with sulfuric acid and its correlation with bond strength values. *Int J Adhes* 2014; 54: 184-190.
16. Sproesser O, Schmidlin PR, Uhrenbacher J, Roos M, Gernet W, Stawarczyk B. Effect of sulfuric acid etching of polyetheretherketone on the shear bond strength to resin cements. *J Adhes Dent* 2014; 16: 465-472.
17. Zhou L, Qian Y, Zhu Y, Liu H, Gan K, Guo J. The effect of different surface treatments on the bond strength of PEEK composite materials. *Dent Mater J* 2014; 30: 209-215.
18. Uhrenbacher J, Schmidlin PR, Keul C, et al. The effect of surface modification on the retention strength of polyetheretherketone crowns adhesively bonded to dentin abutments. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 1489-1497.
19. Kern M, Lehmann F. Influence of surface conditioning on bonding to polyetheretherketone (PEEK). *Dent Mater* 2012; 28: 1280-1283.
20. Stawarczyk B, Bahr N, Beuer F, et al. Influence of plasma pretreatment on shear bond strength of self-adhesive resin cements to polyetheretherketone. *Clin Oral Investig* 2014; 18: 163-170.
21. Wilson A, Jones I, Salamat-Zadeh F, F Watt J. Laser surface modification of poly(etheretherketone) to enhance surface free energy, wettability and adhesion. *Inter J Adhes Adhes* 2015; 62: 69-77.
22. Goyal RK, Tiwari AN, Negi YS. Microhardness of PEEK/ceramic micro- and nanocomposites: correlation with Halpin-Tsai model. *Mater Sci Eng* 2008; A491: 230-236.
23. Koch T, Seidler S. Correlations between indentation hardness and yield stress in thermoplastic polymers. *Strain* 2009; 45: 26-33.
24. Fu SY, Feng XQ, Lauke B, Mai YW. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B* 2008; 39: 933-961.
25. Goyal RK, Madav VV, Pakankar PR, Butee SP. Fabrication and properties of novel polyetheretherketone/barium titanate composites with low dielectric loss. *J Electron Mater* 2011; 40: 2240-2247.

26. Yusof AHM, Amin MAM, Ismail AF, Anam MN, Mahmud NAN. Fabrication and effect of sulfonated poly(etheretherketone) with Cloisite15A nanoclays for microbial fuel cell application. *Int J Sust Con Eng Technol* 2013; 4: 63-74.
27. Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. *Composites Part B* 2012; 43: 2883-2892.
28. Friedrich K, Zhang Z, Schlarb AK. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Compos Sci Technol* 2005; 65: 2329-2343.
29. Keul C, Liebermann A, Schmidlin PR, Roos M, Sener B, Stawarczyk B. Influence of PEEK surface modification on surface properties and bond strength to veneering resin composites. *J Adhes Dent* 2014; 16: 383-392.
30. Silthampitag P, Chaijareenont P, Tattakorn K, Banjongprasert C, Takahashi H, Arksornnukit M. Effect of surface pretreatments on resin composite bonding to PEEK. *Dent Mater J* 2016; 35: 668-674.
31. Gao S, Gao S, Xu B, Yu H. Effects of different pH-values on the nanomechanical surface properties of PEEK and CFR-PEEK compared to dental resin-based materials. *Materials* 2015; 8: 4751-4767.
32. Dandy LO, Oliveux G, Wood J, Jenkins MJ, Leeke GA. Accelerated degradation of Polyetheretherketone (PEEK) composite materials for recycling applications. *Polym Degrad Stab* 2015; 112: 52-62.
33. Chemical Resistance Chart EPM, Rosemount, 6021 Innovation Blvd Shakopee, Minnesota 55379, United States.