

ผลของระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิวพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน ด้วยกรดซัลฟูริกต่อความแข็งผิวระดับจุลภาค และลักษณะจุลสัณฐานวิทยา

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

จุฬาลักษณ์ สมดี¹, พัชรารรณ ศีลธรรมพิทักษ์², พิลัยศิษฐ์ ชัยจรินนท์²
¹นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
²ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chulalak Somdee¹, Patcharawan Silthampitag², Pisaisit Chaijareenont²
¹Graduate student, Faculty of Dentistry, Chiang Mai University
²Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chiang Mai University

ชม. ทันตสาร 2561; 39(3) : 91-102
CM Dent J 2018; 39(3) : 91-102

Received : November 9, 2017
Revised : January 23, 2018
Accepted : February 2, 2018

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิวพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 90 ต่อความแข็งผิวระดับจุลภาคและลักษณะจุลสัณฐานวิทยา

ระเบียบและวิธีการวิจัย: เตรียมชิ้นงานพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนขนาด 5x5x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร จำนวน 48 ชิ้น ด้วยเครื่องไอโซเมท ยัดชิ้นงานในแบบหล่อโลหะรูปวงแหวนด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง ทำการขัดชิ้น

Abstract

Objectives: The purpose of this study was to investigate the effect of 90% sulfuric acid surface pretreatment duration of polyetheretherketone on microhardness and microscopic morphology.

Material and methods: Forty-eight specimens of polyetheretherketone (5x5x2 mm³) were prepared by Isomet cutting machine. The specimens were embedded in a metal ring using an auto-polymerizing

Corresponding Author:

พิลัยศิษฐ์ ชัยจรินนท์
อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Pisaisit Chaijareenont
Lecturer, Dr., Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry,
Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand
E-mail: yodent@hotmail.com

งานด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายน้ำความละเอียด 400 800 1,200 และ 2,000 กริต ตามลำดับ แบ่งชิ้นงานเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 8 ชิ้น ตามระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิว ได้แก่ กลุ่มควบคุมที่ไม่ทำการปรับสภาพพื้นผิว กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวเป็นเวลา 30 60 90 120 และ 300 วินาที ตามลำดับ ทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ระดับจุลภาค และวิเคราะห์ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยความแปรปรวนแบบทางเดียวและการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทุกียที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการศึกษา: ค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคในกลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลา 300 วินาที มีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 12.51 เมกะปาสคาล กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลา 90 และ 120 วินาที มีค่าของความแข็งผิวระดับจุลภาคเท่ากับ 21.76 และ 19.59 เมกะปาสคาลแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลา 30 และ 60 วินาที มีค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคเท่ากับ 25.42 และ 24.06 เมกะปาสคาลโดยไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาพื้นผิวพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีหลุมและรูพรุนกระจายทั่วไป โดยที่ขนาดและจำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาปรับสภาพพื้นผิวที่นานขึ้น

สรุปผลการศึกษา: การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ใช้ระยะเวลานานกว่า 60 วินาที ส่งผลต่อความแข็งแรงพื้นผิวของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยพบค่าความแข็งผิววิกเกอร์ต่ำสุดในกลุ่มปรับสภาพพื้นผิวนาน 300 วินาที

คำสำคัญ: ความแข็งผิวระดับจุลภาค ลักษณะจุลสัณฐานวิทยา กรดซัลฟูริก พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

acrylic resin and were polished with P400, P800, P1200 and P2000 grit silicon carbide papers. The 48 specimens were allocated to six groups of 8 specimens, according to the etching duration: 0s (control), 30s, 60s, 90s, 120s and 300s, respectively. Vicker's microhardness and Scanning electron microscopy were tested. One-way ANOVA following by Tukey's multiple comparisons were tested ($p < 0.05$) subsequently.

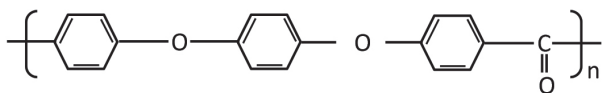
Results: The lowest value of Vicker's microhardness (12.51 Mpa) was presented in the group etched for 300s. The groups with 90s and 120s etching time showed the values of Vickers's microhardness significantly lower than the control group (21.76 and 19.59 Mpa). Whereas, the Vickers microhardness for etching time 30s and 60s groups showed no significant differences with the control group (25.42 and 24.06 Mpa). An impact of etching time on surface morphology was observed in the following ascending order from 0s to 300s. Thereby, the increase of irregular surface pattern, pits and pores according to etching time were presented.

Conclusions: Surface pretreatment with 90% sulfuric acid longer than 60s have influenced the surface hardness of polyetheretherketone. The lowest value of Vickers microhardness was presented in the group etched for 300s.

Keywords: microhardness, microscopic morphology, sulfuric acid, polyetheretherketone

บทนำ

พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone) หรือ พีโออีเค (PEEK) เป็นวัสดุชีวภาพคุณภาพสูงในกลุ่มเดียวกับ พอลิเอริลอีเทอร์คีโตน (polyaryletherketone) มีคุณสมบัติ เป็นวัสดุพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (semi-crystalline thermoplastic polymer) ที่มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยสายโซ่หลักอะโรมาติก (aromatic backbone) เชื่อมต่อกันด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ชนิดอีเทอร์ (ether) สองพันธะ และคีโตน (ketone) หนึ่งพันธะ^(1,2)



รูปที่ 1 โครงสร้างพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (พีโออีเค)
Figure 1 Structure of polyetheretherketone (PEEK)

ด้วยความพิเศษของโครงสร้างทางเคมีทำให้พีโออีเคเป็น วัสดุที่ทนต่อความร้อนได้มากกว่า 300 องศาเซลเซียส ไม่เสื่อมสลายจากสารเคมีและรังสี เข้ากันได้ดีกับสารเสริม ความแข็งแรง (reinforcing agents) จำพวกแก้วและเส้นใย คาร์บอน เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง จึงทำให้มีการนำ พีโออีเคมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม^(3,4) นอกจากนี้ยังพบว่าพีโออีเคมีคุณสมบัติสามารถเข้าได้ดีกับ เนื้อเยื่อ (biocompatibility) ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อ เนื้อเยื่อ ไม่ก่อให้เกิดการอักเสบ และที่สำคัญยังมีคุณสมบัติ ทางกล (mechanical properties) ใกล้เคียงกับกระดูกทibia ของมนุษย์ (human cortical bone) โดยมีค่ามอดูลัสของ สภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ประมาณ 8.3 GPa ซึ่ง ใกล้เคียงกับกระดูกทibia ที่มีค่า 17.7 GPa เมื่อเปรียบเทียบกับ โลหะไทเทเนียม (116 GPa) และโลหะโคบอลต์โครเมียม (210 GPa) จากคุณสมบัติต่าง ๆ ข้างต้นร่วมกับความสามารถของวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการกลึง (milling) และขัดแต่ง (grinding) ได้ง่าย⁽⁵⁾ จึงมีการนำพีโออีเคมาใช้ อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นสิ่งปลูกฝัง สำหรับยึดกระดูกสันหลัง (spinal implant) หรือเป็นวัสดุ ทดแทนกระดูกในรอยโรคกระดูกขนาดใหญ่ที่สูญเสียไปจาก อุบัติเหตุ เป็นต้น^(6,7)

พีโออีเคในส่วนของพอลิเมอร์ทางทันตกรรมนั้นจัดเป็นวัสดุ ใหม่ในการสร้างครอบฟัน สะพานฟัน และรากเทียม สามารถ สร้างให้เกิดความสวยงามได้เนื่องจากวัสดุมีสีขาวใกล้เคียง สีฟันธรรมชาติ⁽⁸⁾ มีความแข็งแรงสูงสามารถรองรับแรงกดได้ มากถึง 1,383 นิวตัน ซึ่งมากกว่าแรงบดเคี้ยวสูงสุดบริเวณ ฟันกรามใหญ่ที่มีค่า 909 นิวตัน จึงเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงบด เคี้ยวได้ดี^(1,9,10) วัสดุมีคุณสมบัติที่โปร่งรังสี (radiolucent) ทำให้สามารถวินิจฉัยและรักษารอยโรคได้โดยไม่ต้องรื้อหรือ เปลี่ยนวัสดุบูรณะ⁽¹⁾ แต่ในทางตรงกันข้ามพีโออีเค้นั้นมี ความทึบแสง (opaque) และมีสีวัสดุที่ขาวจนถึงเทา ถึงแม้ว่า จะมีการผลิตวัสดุที่มีสีเหมือนฟันให้เลือกใช้แต่ในแง่ ความสวยงามนั้นก็ยังไม่เพียงพอที่จะใช้เป็นวัสดุบูรณะแบบ ขึ้นเดียว (monolithic restoration) ในบริเวณที่ต้องการ ความสวยงามได้ จึงจำเป็นต้องมีการวีเนียร์ (veneer) พื้นผิว วัสดุด้วยเรซินคอมโพสิตเพื่อสร้างให้เกิดสวยงาม⁽¹¹⁾

เนื่องจากวัสดุพีโออีเคมีโครงสร้างแบบวงแหวน อะโรมาติกทำให้ส่งผลต่อวัสดุคือ มีความเฉื่อย (inert chemical performance) พลังงานผิวดำ (low surface energy) และ ทนทานต่อการปรับสภาพพื้นผิว ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงยึดติด ที่ต่ำเมื่อใช้ร่วมกับเรซินคอมโพสิต⁽¹²⁾ มีการศึกษาเกี่ยวกับ แรงยึดติดระหว่างวีเนียร์เรซินคอมโพสิตและโครงพีโออีเค ด้วยวิธีการปรับสภาพพื้นผิววิธีต่าง ๆ อาทิ การพ่นทราย ร่วมกับสารละลายปิรันยา (airborne particle abraded surface with piranha-etching)⁽¹³⁻¹⁶⁾ การกัดพื้นผิวด้วยกรด ซัลฟูริก^(9,11,17,18) และการใช้พลาสมาเย็น⁽¹⁹⁾ ผลการศึกษาที่ ได้ยังคงมีข้อขัดแย้งถึงประสิทธิภาพและไม่สามารถให้ ข้อสรุปได้ว่าวิธีการใดให้ค่าแรงยึดติดที่ดีที่สุด หลายการศึกษา ได้แนะนำว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น ร้อยละ 98 นั้นเป็นวิธีที่เหมาะสมในการสร้างให้เกิดรูพรุน บริเวณผิววัสดุ ส่งเสริมให้เกิดการยึดติดที่ติระหว่างพีโออีเค กับเรซินซีเมนต์^(5,9,11,18,20) การศึกษาของ Silthampitag และ คณะ⁽²¹⁾ แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-like porous fiber network) ภายหลังจาก ปรับสภาพพื้นผิวพีโออีเคด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น ร้อยละ 98 ซึ่งส่งเสริมให้เกิดการยึดติดเชิงกลในระดับจุลภาค (micromechanical locking) จากการแทรกซึมของสารยึดติด เข้าไปตามรูพรุนนี้ และเมื่อทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยว

ก็พบว่าค่าความแข็งแรงยึดเหนือนั้นสูงกว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ

ความแข็งผิวเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่นิยมใช้ทดสอบวัสดุทั้งทางอุตสาหกรรมและทางทันตกรรมสามารถชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุ ความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ (Vicker's hardness) เป็นการวัดค่าความแข็งที่ได้รับค่านิยมเนื่องจากสามารถวัดค่าความแข็งได้ในช่วงที่กว้างและมีหน่วยของค่าความแข็งเดียวคือ VHN สำหรับค่าน้ำหนักหนึ่ง ๆ ทำให้สามารถทดสอบวัสดุได้หลายชนิด^(22,23) จึงมีหลายการศึกษาที่ทดสอบค่าความแข็งผิวแบบวิกเกอร์เพื่อดูความแข็งแรงของวัสดุ^(22,24,25) การศึกษาความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (Vicker's microhardness) และลักษณะจุลสัณฐานวิทยา (microscopic morphology) พื้นผิวฟลูออไรด์เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 นั้นส่งผลให้ค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ ลดลงต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญส่วนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 นั้นไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของฟลูออไรด์และยังให้ค่าความแข็งแรงยึดเหนือนที่ดี⁽²⁶⁾ นอกเหนือจากปัจจัยด้านความเข้มข้นของกรดพบว่าการใช้ระยะเวลาที่นานเกินไปในการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดนั้นส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุอ่อนแอลงได้เช่นกัน^(11,18) การศึกษาถึงการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกโดยทั่วไปนั้นใช้เวลาปรับสภาพพื้นผิวนาน

60 วินาที^(5,15,16,20,21,26) มีการศึกษาของ Sproesser และคณะที่กล่าวว่าค่าความแข็งแรงยึดเหนือนี้อาจมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดในช่วงระหว่าง 60 วินาทีถึง 120 วินาที⁽¹⁸⁾

การปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ที่ระยะเวลา 1 นาทีนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างฟลูออไรด์อย่างมาก ในขณะที่การปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ระยะเวลา 1 นาทีนั้นส่งผลต่อโครงสร้างฟลูออไรด์น้อยกว่าให้ค่าความแข็งผิวของวัสดุมากกว่าและยังคงแสดงค่าความแข็งแรงยึดเหนือนที่ดี แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยด้านระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวก็มีความสำคัญต่อความแข็งแรงผิวของวัสดุเช่นกัน ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาใดแสดงถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ต่อลักษณะผิวฟลูออไรด์รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิวฟลูออไรด์ฟลูออไรด์ไอเทอโรคิโตนด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ต่อความแข็งผิวระดับจุลภาคและลักษณะจุลสัณฐานวิทยา โดยมีสมมติฐานคือไม่มีความแตกต่างกันของความแข็งผิวระดับจุลภาคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อทางการค้า บริษัทผู้ผลิต และส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Table 1 Trade names, manufactures and compositions of experimental materials

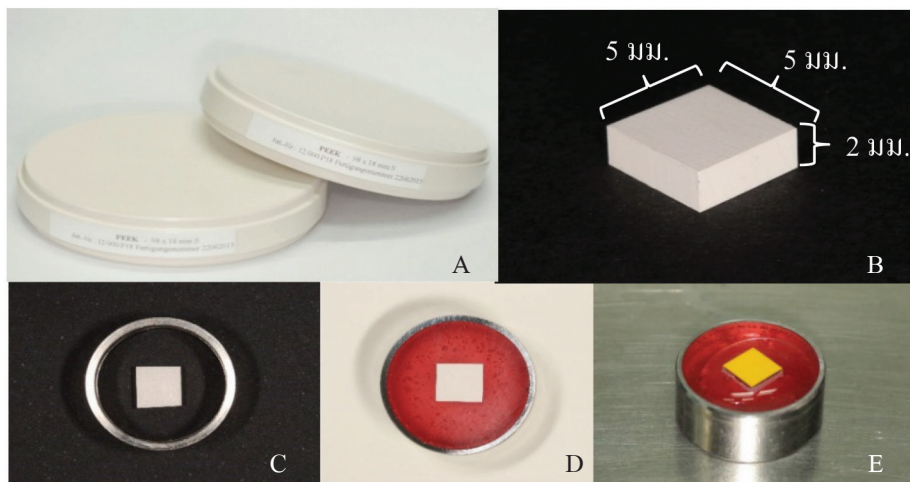
ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์ (Trade names)	บริษัทผู้ผลิต (Manufacturers)	ส่วนประกอบ (Compositions)	เลขที่ผลิต (Lot.No)
Dentokeep	Nt-trading, Germany	Polyetheretherketone Titanium dioxide pigments (ceramic filled 20%)	G15DK1801
Autopolymerizing acrylic resin	Lang, Wheeling, Illinois, USA	Methyl Methacrylate 99-97-8 N, N-dimethyl-p-toluidine	1380-16 A1
Sulfuric acid	RCI Labscan Limited, Bangkok, Thailand	98% Sulfuric acid	7664-93-9

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพีอีเค

เตรียมชิ้นงานขนาด 5x5x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร จำนวน 48 ชิ้น จากแผ่นพีอีเค (Dentokeep PEEK, Nt-trading, Karlsruhe, Germany) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตร หนา 18 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดไอโซเมท (Isomet® 1000 precision saw, Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA) โดยใช้ความเร็ว 300 รอบต่อนาที^(21,26) จำนวน 48 ชิ้น ยึดแผ่นชิ้นงานลงในแบบหล่อโลหะ รูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ในตำแหน่งกึ่งกลางแบบหล่อและขนานกับพื้นราบด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง (Orthojet, Lang, Wheeling, Illinois, USA) ที่ระยะเวลาจนอะคริลิกเรซิน

ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ ขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย (Grinding/Polishing Machine, MoPao 160E, MEGA Advance, China) ด้วยความละเอียด 400 800 1,200 และ 2,000 กริต เป็นระยะเวลา 1 นาทีในแต่ละความละเอียด เพื่อให้ผิวชิ้นงานเรียบเป็นมาตรฐานเดียวกัน จากนั้นทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Transsonic T700, Elma, Singen, Germany) โดยใช้ น้ำปราศจากอ็อกซิเจน เป็นเวลา 10 นาที

แบ่งกลุ่มทดลองออกเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 8 ชิ้น ตามระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิว ได้แก่ กลุ่มที่ทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการหยดกรดทิ้งไว้ที่ระยะเวลา 30 60 90 120 และ 300 วินาที ตามลำดับ โดยมีกลุ่มที่ไม่ทำการปรับ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ
 A) แผ่นพีอีเคยี่ห้อ Dentokeep 98x18 มม.
 B) แผ่นชิ้นงานพีอีเคขนาด 5x5x2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 C) ตำแหน่งการวางชิ้นงานในแม่แบบโลหะวงแหวน
 D) ชิ้นงานที่ยึดด้วยอะคริลิกเรซินชนิดบ่มเอง
 E) การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก

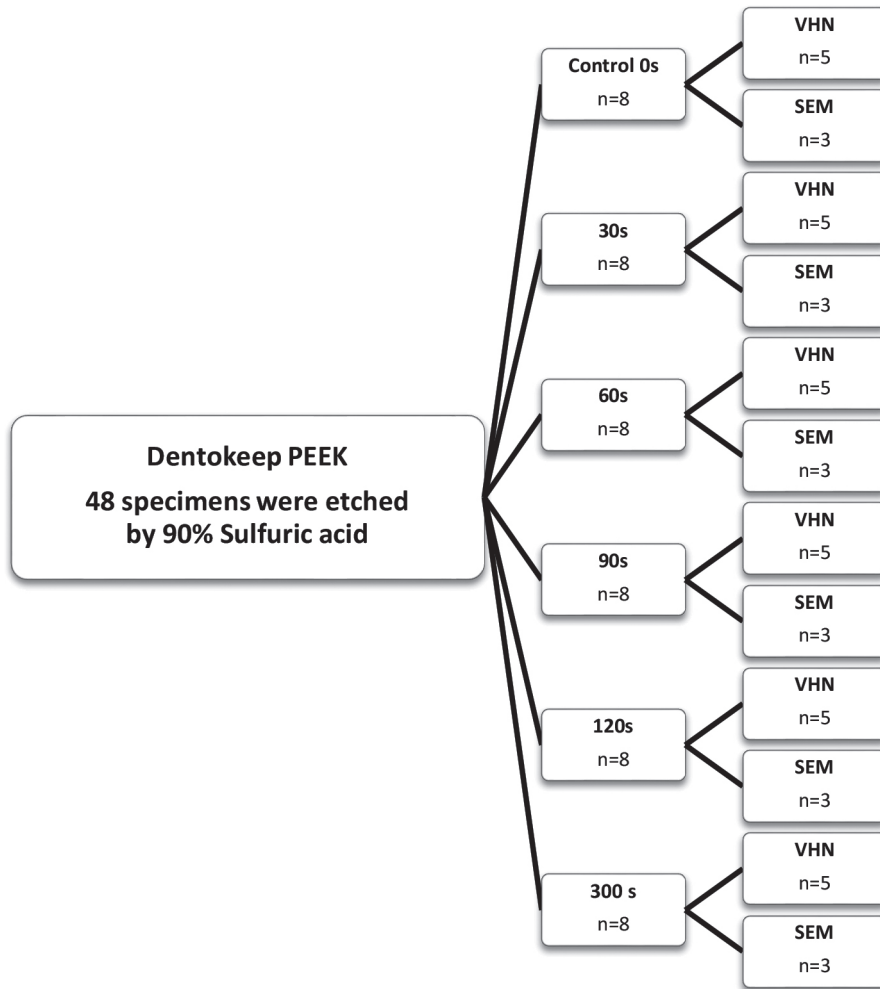
Figure 2 Specimens preparation
 A) Dentokeep PEEK disc 98x18 mm.
 B) PEEK specimen size 5x5x2 mm³
 C) PEEK specimen was positioned in a metal ring mold
 D) PEEK specimen was embedded in an auto-polymerization acrylic resin
 E) Surface pretreatment with sulfuric acid

สภาพพื้นผิวใด ๆ เป็นกลุ่มควบคุม และแบ่งชิ้นงานในแต่ละกลุ่มการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มย่อย เพื่อนำไปทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาค จำนวน 5 ชิ้นงานและลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจำนวน 3 ชิ้นงาน นำชิ้นงานทั้งหมดไปปรับสภาพพื้นผิวด้วยการหยดกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ได้จากการเจือจางกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 ด้วยน้ำปราศจากอออน โดยมีปริมาตรสัดส่วนกรดซัลฟูริก 9.18 มิลลิลิตรต่อน้ำปราศจากอออน 0.82 มิลลิลิตร ในการเตรียมสารละลาย 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นล้างออก

ด้วยน้ำปราศจากอออนให้สะอาดและทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปตรวจสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคและลักษณะจุลสัณฐานวิทยา

การทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (Vicker’s microhardness, VHN)⁽²²⁾

วัดความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ในชิ้นงานทั้ง 6 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 5 ชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาค (STARTECH SMV-1000 Guiyang



รูปที่ 3 แผนผังการแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิวที่อู่เคด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 เพื่อทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (VHN) และลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

Figure 3 Diagram of test groups by 90% Sulfuric acid surface pretreatment on PEEK with different duration of time for Vicker’s microhardness testing (VHN) and surface morphologic testing with scanning electron microscope (SEM)

Sunproc International Trade Co.,Ltd., Guiyang, China) โดยใช้หัวกดเพชรขนาดแรงกด 100 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที จำนวน 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน กำหนดระยะห่างในแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 100 ไมโครเมตร โดยเริ่มต้นทดสอบรอยกดแรกบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน นำค่าเฉลี่ยความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ บันทึกภาพรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital microscope DVM 6; Leica) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

การตรวจสอบลักษณะจุลทรรศน์วิทยาของผิวชิ้นงาน (Microscopic morphology)

นำชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ทุกกลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 3 ชิ้นงาน ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5910LV, JOEL, Peabody, Massachusette, USA) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า โดยทำการเคลือบชิ้นงานก่อนทดสอบด้วยตัวนำทอง

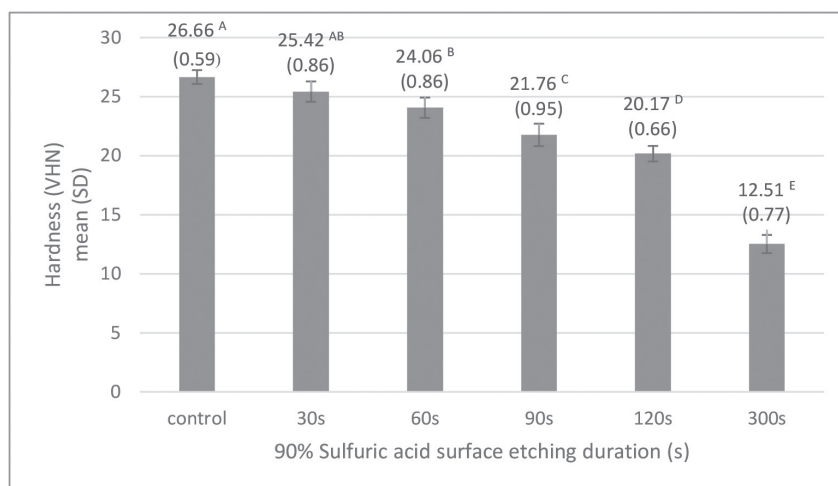
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยวิธีชาปิโรวิลค์ (Shapiro-Wilk test) และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทูกีย์ (Tukey multiple comparison test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการศึกษา

ผลการทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์

ภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์มีค่าเฉลี่ยความแข็งผิวลดต่ำลงเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวเป็นระยะเวลา 90 วินาที (21.76±0.95 VHN) 120 วินาที (19.59±1.18 VHN) และ 300 วินาที (12.51±0.77 VHN) ตามลำดับ



แผนภูมิที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ (mean VHN) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

Diagram 1 Mean and standard deviation (SD) of Vicker's hardness number (VHN)

อักษรตัวภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงค่า VHN ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ($p < 0.05$)

Different capital superscript letters indicated that VHN were significantly different at $p < 0.05$.

โดยค่าเฉลี่ยความแข็งผิวต่ำที่ลดต่ำลงนั้นพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ทำการปรับสภาพพื้นผิวน้อยกว่า 90 วินาทีและควบคุมดังแสดงในแผนภูมิที่ 1

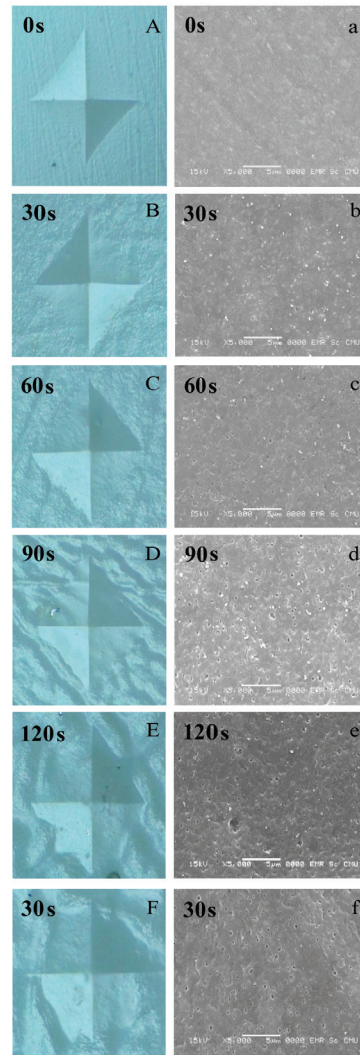
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลกำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะรอยกดที่เกิดขึ้น พบว่ากลุ่มควบคุม (รูป 4.A) กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่ 30 วินาที (รูป 4.B) และ 60 วินาที (รูป 4.C) ลักษณะรอยกดมีความสมบูรณ์ สมมาตร และมีขอบเขตรอยกดที่ชัดเจน กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่เวลา 90 วินาที (รูป 4.D) ลักษณะรอยกดเริ่มสูญเสียความสมมาตร ขอบรอยกดเริ่มขรุขระ กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่เวลา 120 วินาที (รูป 4.E) ลักษณะรอยกดมีความไม่สมมาตร และขอบรอยกดมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น และในกลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่เวลา 300 วินาที (รูป 4.F) ลักษณะรอยกดพบว่ามีขนาดใหญ่ ไม่สมมาตร ขอบเขตรอยกดไม่ชัดเจนและโค้งงอมากที่สุด

ผลการตรวจสอบลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของผิวชิ้นงาน

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4 แสดงลักษณะจุลสัณฐานวิทยาภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว ในกลุ่มพีอีเคที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิว (รูป 4.a) พบว่าผิวพีอีเคมีลักษณะเรียบ ไม่มีรูพรุน กลุ่มที่ทำการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบเกิดลักษณะของหลุมและรูพรุนกระจายทั่วไป โดยหลุมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาปรับสภาพพื้นผิวที่นานขึ้น

บทวิจารณ์

การสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล อาทิเช่น การลดต่ำลงของความแข็งผิวระดับจุลภาคอาจส่งผลกระทบต่อความทนทานของวัสดุบูรณะภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมในช่องปากได้ การเลือกใช้วิธีการปรับสภาพพื้นผิวที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของพีอีเคได้⁽²⁶⁾ การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของระยะเวลาการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ต่อความแข็งผิวระดับจุลภาคและลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวพีอีเคโดยมีสมมติฐานคือไม่มีความแตกต่างกันของความแข็งผิวระดับ



รูปที่ 4 แถวซ้าย ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลกำลังขยาย 2,000 เท่าแสดงลักษณะรอยกดที่ได้จากการทดสอบความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

Figure 4 Left row images of digital microscope at magnification 2,000X characterize indentations of the Vicker's microhardness after different pretreatment duration with 90% Sulfuric acid

รูปที่ 4 แถวขวา ภาพ SEM กำลังขยาย 5,000 เท่าแสดงลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวพีอีเคภายหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

Figure 4 Right row images of SEM at magnification 5,000X characterize surface microscopic morphology of PEEK after different pretreatment duration with 90% Sulfuric acid

จุลภาคภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลา 90 วินาที 120 วินาที และ 300 วินาที ค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์จะมีค่าลดลงตามเวลาการปรับสภาพพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น โดยพบความแตกต่างจากกลุ่มที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิว กลุ่มปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลา 30 วินาที และ 60 วินาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จึงปฏิเสธสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างกันของความแข็งผิวระดับจุลภาคภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาแตกต่างกัน การลดลงของค่าความแข็งผิวนี้นพบในศึกษาของ Prakhamsai⁽²⁶⁾ ที่ศึกษาค่าความแข็งผิวภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าการปรับสภาพพื้นผิวฟิออีเคด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 ที่เวลา 60 วินาทีนั้นมีความแข็งผิวต่ำสุด (8.08 ± 0.25 VHN) แต่ที่ระยะเวลาเดียวกันเมื่อปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 90 พบมีค่าความแข็งผิว 24.58 ± 0.33 VHN สอดคล้องกับการศึกษาที่พบค่าความแข็งผิว 24.06 ± 0.86 VHN เมื่อปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่เวลา 60 วินาที

ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิออีเคภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ในการศึกษาที่พบว่าเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ พื้นผิวฟิออีเคจะพบมีลักษณะหลุมและรูพรุนขนาดเล็กกระจายทั่วไป โดยหลุมและรูพรุนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการปรับสภาพพื้นผิวโดยไม่ปรากฏลักษณะโครงร่างตาข่าย ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาในการศึกษาที่สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Prakhamsai⁽²⁶⁾ ที่ทำการศึกษาลงผลของการปรับสภาพพื้นผิวฟิออีเคด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าการปรับสภาพพื้นผิวฟิออีเคด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 ที่เวลา 60 วินาทีนั้นทำให้เกิดลักษณะของหลุมและรูพรุนกระจายโดยทั่วไปบนพื้นผิวฟิออีเคเช่นเดียวกับที่พบในการศึกษาที่ และลักษณะโครงร่างตาข่ายจะพบเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 การศึกษาของ Sproesser และคณะ^(11,18) ทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ นั้นพบลักษณะโครงร่างตาข่ายในทุกช่วงเวลาการ

ปรับสภาพพื้นผิวโดยโครงร่างตาข่ายจะมีลักษณะที่ลึกและกว้างขึ้นไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การศึกษาของ Zhou และคณะ⁽²⁰⁾ พบลักษณะการละลายของผิวฟิออีเคเป็นรูพรุนคล้ายถุงน้ำ (blister-like) เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 ที่เวลา 60 วินาที

ฟิออีเคมีคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพที่ดีเหมาะแก่การนำมาใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมประดิษฐ์ แต่ด้วยข้อจำกัดด้านความสวยงามทำให้ต้องมีการใช้เรซินคอมโพสิตเพื่อปกปิดพื้นผิว เนื่องจากฟิออีเคมีความเฉื่อยพลังงานผิวต่ำ และทนทานต่อการปรับสภาพพื้นผิว ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาในการยึดติดกับเรซินคอมโพสิต⁽¹²⁾ ในกระบวนการยึดติดนั้นความหยابผิวของฟิออีเคควรมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะเอื้อให้เกิดการยึดติดเชิงกลขึ้น วิธีการสร้างให้เกิดความหยาบบนพื้นผิวจึงมีความสำคัญ⁽²⁰⁾ ในปัจจุบันมีการศึกษามากมายถึงวิธีการในการปรับสภาพผิวเพื่อพัฒนาความแข็งแรงยึดติดระหว่างฟิออีเคและเรซินคอมโพสิต^(5,9,14,15,18-21,27) โดยพบว่าทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ที่ระยะเวลา 1 นาที ร่วมกับการทาสารยึดติดนั้นให้ค่าแรงยึดติดเฉือนสูงสุด^(5,9,18,21) การใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูงปรับสภาพพื้นผิวทำให้เกิดลักษณะรูพรุนคล้ายโครงร่างตาข่าย ส่งผลให้สารยึดติดสามารถแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนนี้เกิดการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาค (micro-mechanical retention) ค่าแรงยึดติดจึงเพิ่มขึ้น^(5,9,20,21,28) ลักษณะโครงร่างตาข่ายนี้เกิดจากการสลายตัวอย่างมากของโครงสร้างพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุลดลงเกิดการแยกตัวของรอยประสานระหว่างวัสดุอัดแทรกและพอลิเมอร์เมทริกซ์ (particle-matrix interfaces adhesion)⁽²⁵⁾ การยึดติดของรอยประสานระหว่างวัสดุอัดแทรกและพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นปัจจัยสำคัญพื้นฐานที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์^(29,30) ดังนั้นหากเกิดการละลายตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์จะทำให้สูญเสียเสถียรภาพรอยประสานระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และวัสดุอัดแทรกได้ส่งผลให้ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุลดลง จึงพบว่าค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของพื้นผิวฟิออีเคที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 มีค่าต่ำที่สุด⁽²⁶⁾ เป็นการแสดงถึงการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไป

นอกเหนือจากปัจจัยด้านความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ส่งผลต่อลักษณะจุลสัณฐานวิทยาและความแข็งผิวระดับจุลภาค ปัจจัยด้านระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวก็มีความสำคัญเช่นกัน การศึกษาของ Sproesser และคณะ⁽¹⁸⁾ ศึกษาผลของระยะเวลาในการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 98 ต่อความแข็งแรงยึดเหนี่ยว พบลักษณะพื้นผิวโครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้นในทุกช่วงเวลากการปรับสภาพพื้นผิว แต่เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวที่เวลา 120 วินาทีหรือมากกว่า พบว่าลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีความลึกและความกว้างมากขึ้น และเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวเป็นเวลา 300 วินาทีลักษณะของโครงสร้างตาข่ายนั้นจะขาดความต่อเนื่องและเริ่มเสีรูปร่าง นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาพพื้นผิวที่ระยะเวลาสั้นเกินไปไม่ได้ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นแต่ตรงกันข้ามกลับมีค่าลดต่ำลงเมื่อยึดติดกับสารยึดติดทุกชนิด และเมื่อทดสอบชนิดความล้มเหลวที่เกิดขึ้นพบว่าความล้มเหลวนั้นมีลักษณะเป็นการแตกหักภายในวัสดุพีอีเอ⁽¹⁸⁾ เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวจะเกิดขึ้นของพื้นผิวที่ถูกปรับสภาพ (surface-modified layer) ชั้นนี้ควรมีความบางที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เนื่องจากชั้นของพื้นผิวที่ถูกปรับสภาพนั้นหากมีความหนาที่มากเกินไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและการทำหน้าที่ของวัสดุ โดยพบว่าชั้นของพื้นผิวที่ถูกปรับสภาพที่หนาเกินไปอาจเกิดการแยกตัวออกจากส่วนของวัสดุที่เหลือได้⁽²⁾ การใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 98 ถึงแม้จะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพีอีเอและเรซินคอมโพสิตสูงแต่ขณะเดียวกันกลับทำให้พื้นผิวเกิดรูพรุนมากเกินไปจนส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกล ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวพีอีเอด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูงอาจไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพีอีเอเนื่องจากการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลอาจส่งผลต่อความทนทานของวัสดุภายใต้สภาวะแวดล้อมในช่องปากได้⁽²⁶⁾

เพื่อลดปัญหาการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของพีอีเอในระยะยาว การปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีที่เหมาะสมมีความสำคัญ การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 90 สามารถสร้างให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีระหว่างพีอีเอและเรซินคอมโพสิต และไม่ทำให้ค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ลดต่ำลง⁽²⁶⁾ จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 90

ที่เวลา 60 วินาทีหรือน้อยกว่า (จากแผนภูมิที่ 1) จะยังคงให้ค่าความแข็งผิวที่ดี แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษารังนี้ใช้พีอีเอชนิดเดียวในการทดสอบ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างวัสดุประกอบด้วยส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน (amorphous) ร่วมกับส่วนผลึก (crystalline) ที่ส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์เกิดความแตกต่างกันไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ทั้งทั้งพื้นผิว⁽²⁾ อีกทั้งการเติมวัสดุอัดแทรกที่แตกต่างกันทั้งขนาดปริมาณ หรือแม้กระทั่งการเรียงตัวที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวที่แตกต่างกันด้วย⁽²²⁾ ดังนั้นจึงอาจส่งผลให้พีอีเอต่างชนิดหรือแม้กระทั่งชนิดเดียวกันเกิดลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันได้ภายหลังการปรับสภาพพื้นผิว⁽²⁾ เพื่อพัฒนาวิธีในการปรับสภาพพื้นผิวมาตรฐานของวัสดุพีอีเอ การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก ร้อยละ 90 ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมในวัสดุพีอีเอชนิดต่าง ๆ จึงควรมีการศึกษาต่อไป

บทสรุป

ภายใต้ขอบเขตการศึกษานี้สรุปได้ว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นที่เหมาะสมภายใต้ระยะเวลาที่เหมาะสม จะช่วยสร้างให้เกิดลักษณะจุลสัณฐานวิทยาที่เอื้อต่อการยึดติดระหว่างวัสดุพีอีเอและเรซินคอมโพสิต โดยยังไม่สูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไป แต่อย่างไรก็ตามผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก ร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่มีต่อแรงยึดติดระหว่างวัสดุพีอีเอและเรซินคอมโพสิตนั้นยังคงต้องมีการศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศทางทันตกรรม รากเทียม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขอขอบคุณ ดร.ธนพัฒน์ ศาสตร์ระจุก นักวิจัยศูนย์วิจัยทางทันตแพทยศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และนายวัทธิกร สร้อยหล้า นักวิทยาศาสตร์ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Kurtz SM, Devine JN. PEEK Biomaterials in Trauma, Orthopedic, and Spinal Implants. *Biomaterials* 2007; 28(32): 4845-4869.
2. Kurtz SM. Chapter 1 - An Overview of PEEK Biomaterials. *PEEK Biomaterials Handbook*. Oxford: William Andrew Publishing; 2012: 1-7
3. May R. Polyetheretherketones. In: Mark HF, Bikales NM, Oververger CG, Menges G, Kroschiwitz JJ, editors. *Encyclopedia of polymer science and engineering*. New York: Wiley; 1988: 313-320.
4. Rigby RB. Polyetheretherketone. In: Margolis JM, editor. *Engineering thermoplastics: properties and applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1985: 299-314.
5. Schmidlin PR, Stawarczyk B, Wieland M, Attin T, Hämmerle CH, Fischer J. Effect of different surface pre-treatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. *Dent Mater* 2010; 26(6): 553-559.
6. Klingler JH, Kruger MT, Sircar R, Kogias E, Scholz C, Volz F, et al. PEEK cages versus PMMA spacers in anterior cervical discectomy: comparison of fusion, subsidence, sagittal alignment, and clinical outcome with a minimum 1-year follow-up. *Sci World J* 2014; 396-398.
7. O'Reilly EB, Barnett S, Madden C, Welch B, Mickey B, Rozen S. Computed-tomography modeled polyether ether ketone (PEEK) implants in revision cranioplasty. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2015; 68(3): 329-338.
8. Hunter A, Archer CW, Walker PS, Blunn GW. Attachment and proliferation of osteoblasts and fibroblasts on biomaterials for orthopedic use. *Biomaterials* 1995; 16(4): 287-295.
9. Stawarczyk B, Beuer F, Wimmer T et al. Polyetheretherketone-a suitable material for fixed dental prostheses? *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2013; 101(7): 1209-1216.
10. Waltimo A, Kononen M. Maximal bite force and its association with signs and symptoms of craniomandibular disorders in young Finnish non-patients. *Acta Odontol Scand* 1995; 53(4): 254-258.
11. Sproesser O, Schmidlin PR, Uhrenbacher J, Eichberger M, 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.
12. Noiset O, Schneider YJ, Marchand-Brynaert J. Adhesion and growth of CaCO₂ cells on surface-modified PEEK substrata. *J Biomater Sci polym Ed* 2000; 11(7): 767-786.
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(18): 7213-7218.
14. 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(4): 383-392.
15. Stawarczyk B, Jordan P, Schmidlin PR et al. PEEK surface treatment effects on tensile bond strength to veneering resins. *J Prosthet Dent* 2014; 112(5): 1278-1288.
16. 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(6): 1489-1497.
17. Schwitalla A, Muller WD. PEEK dental implants: a review of the literature. *J Oral Implantol* 2013; 39(6): 743-749.
18. 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(5): 465-472.
19. 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(1): 163-170.
 20. 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* 2014; 30(8): e209-215.
 21. 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(4): 668-674.
 22. Goyal RK, Tiwari AN, Negi YS. Microhardness of PEEK/ceramic micro- and nanocomposites: Correlation with Halpin-Tsai model. *Mater Sci Eng* 2008; 49(1-2): 230-236.
 23. Koch T, Seidler S. Correlations Between Indentation Hardness and Yield Stress in Thermoplastic Polymers. *Strain* 2009; 45(1): 26-233.
 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: Engineering* 2008; 39(6): 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 Elect Mater* 2011; 40(11): 2240-2247.
 26. Prakhamsai S. Effects of Surface Pretreatment with Different Concentration of Sulfuric Acid Etching on Roughness, Microhardness and Shear Bond Strength of PEEK [dissertation]. Chiangmai: Chiangmai University; 2016 (in Thai).
 27. Kern M, Lehmann F. Influence of surface conditioning on bonding to polyetheretherketon (PEEK). *Dent Mater* 2012; 28(12): 1280-1283.
 28. 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.
 29. Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering* 2012; 43(7): 2883-2892.
 30. Friedrich K, Zhang Z, Schlarb AK. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Compos Sci Technol* 2005; 65(15): 2329-2343.