

ผลของการปรับสภาพอนุภาคนาโนอลูมินาด้วยสารคู่ควบไซเลน ต่อความทนแรงอัด และการเปลี่ยนสีของซีฟันเรซิน อะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน

Effect of Silanized Alumina Nanoparticles on Compressive Strength and Color Alteration of Heat-polymerized Acrylic Resin Tooth

อวัศดาภรณ์ เกตุแห่ง¹, พิสมัยศิษฐ์ ชัยจรินนท์², บุญชัย เขาวนไถลวงศ์¹, ณัฐวรรณ ปลื้มสำราญ²,
ภัทริกา อังกสิทธิ์², แมนสรวง อักษรนุกิจ³, พิริยะ ยาวีราช²

¹สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Awutsadaporn Katheng¹, Pisaisit Chaijareenont², Boonchai Chaoklaiwong²,
Nathawat Pleumsamran², Pattarika Angkasith², Mansuang Arksornnukit³, Piriya Yavirach²

¹Division of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Naresuan University

²Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chiang Mai University

³Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University

ชม. ทันตสาร 2560; 38(2) : 97-110

CM Dent J 2017; 38(2) : 97-110

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนต่อคุณสมบัติความทนแรงอัด และการเปลี่ยนสีของซีฟันเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน

วัสดุและวิธีการ: เตรียมเรซินอะคริลิกสีเหมือนฟันชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนรูปทรงกระบอกจำนวน 84 ชิ้นงาน สำหรับทดสอบความทนแรงอัดมีความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ และชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 168 ชิ้นงาน สำหรับทดสอบ

Abstract

Objectives: To investigate the effects of non-surface treatments and surface treatments with a silane coupling agent for alumina nanoparticles on the compressive strength and color alteration of heat-polymerized acrylic resin tooth.

Methods: A total of 84 heat-polymerized acrylic resin cylinders and 168 heat-polymerized acrylic resin blocks were prepared. The length and diameter of the cylinders (ivory acrylic) for the

Corresponding Author:

พิริยะ ยาวีราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์
คณะทันตแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Piriya Yavirach

Assistant Professor; Dr. Department of Prosthodontics,
Faculty of Dentistry, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand

E-mail: piriya@chiangmai.ac.th

การเปลี่ยนสี แบ่งออกเป็นชนิดใสและชนิดสีเหมือนฟันมีความยาว 10 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานของแต่ละการทดสอบ แบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม (n=12) กลุ่มทดลองคือ กลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และกลุ่มควบคุมคือ กลุ่มที่ไม่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา นำชิ้นงานมาทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบสากลและดูการเปลี่ยนสีด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางและทดสอบเชิงซ้อนด้วยวิธีทูทีที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

ผลการศึกษา: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าความทนแรงอัดของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม โดยกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงอัดสูงสุด (294.41±20.24 เมกะปาสคาล) และกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงอัดต่ำสุด (227.67±15.20 เมกะปาสคาล) การทดสอบการเปลี่ยนสีของเรซินอะคริลิกชนิดใส พบว่า กลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดและในเรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟัน พบว่า กลุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีการเปลี่ยนสีน้อยที่สุด

สรุป: การเติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน ทำให้ค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงที่สุดแต่จะทำให้มีการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสีอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนอลูมินา ความทนแรงอัด สารอัดแทรกพอลิเมทิลเมทาไครเลต สารคู่ควบไซเลน

compressive strength tests were 9 mm and 6 mm, respectively. The length, width and thickness of the blocks for the color alteration tests (clear and ivory acrylic) were 10x10x2 mm, respectively. In each test, specimens were divided into seven groups (n=12). The specimens in the experimental groups were acrylic resin reinforced with alumina nanoparticles at loadings of 1, 3 and 5 wt%, with and without a silane coupling agent; those in the control group were not reinforced nor loaded with alumina nanoparticles. Compressive strength tests were performed using a universal testing machine, and color alterations were investigated using a spectrophotometer. Data were analyzed by two-way ANOVA and the Tukey HSD's test with a significance level of 0.05.

Results: There were significant differences in compressive strength between the control and the experimental groups. Among all groups, the 1 wt% group treated with silane coupling agent had the highest compressive strength of 294.41±20.24 MPa, and the 5 wt% group without a use of silane coupling agent had the lowest compressive strength of 227.67±15.20 MPa. The lowest color alteration was found in the 1 wt% (clear acrylic) and 5 wt% (ivory acrylic) alumina nanoparticle groups treated with silane coupling agent.

Conclusions: Compressive strength of heat-polymerized acrylic resin were optimally increased by adding silanized alumina nanoparticles at 1 wt%. However, the degree of color alteration was changed, but still acceptable for clinical use.

Keywords: Alumina nanoparticle, Compressive strength, Filler, Polymethyl methacrylate, Silane coupling agent

บทนำ

ผู้ป่วยที่มีฟันสึกบริเวณด้านบดเคี้ยวอย่างรุนแรง สาเหตุจากการรับประทานอาหารแข็ง อาหารที่มีความเป็นกรดสูง มีนิสัยบดเคี้ยวประเภททำงานนอกหน้าที่ (parafunctional habit) หรือมีการสูญเสียฟันหลัง ผลทำให้เกิดการสูญเสียมิติแนวตั้ง (vertical dimension) ของใบหน้า แนวทางในการรักษาส่วนใหญ่เป็นการบูรณะด้วยฟันเทียมชนิดติดแน่น (fixed prosthesis) ทั้งปาก หรือร่วมกับฟันเทียมบางส่วนถอดได้ (removable partial denture) เพื่อสร้างและแก้ไขมิติแนวตั้งของใบหน้าขึ้นมาใหม่และทำให้ระบบบดเคี้ยวใช้งานได้ตามเดิม แต่ในกรณีที่ผู้ป่วยมีข้อจำกัดในด้านเศรษฐกิจ สถานะทางการเงิน ลักษณะทางกายวิภาค หรือมีข้อพิจารณาทางการแพทย์ที่ไม่สามารถรักษาโดยฟันเทียมติดแน่นทั้งปาก⁽¹⁾ จึงทำให้ฟันเทียมบางส่วนถอดได้คร่อมฟัน (overlay removable partial dentures : ORPDs) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นฟันเทียมชั่วคราว (provisional prosthesis) หรือฟันเทียมเฉพาะกาล (interim prosthesis) ก่อนทำการฟื้นฟูสภาพช่องปาก (oral rehabilitation) อย่างถาวรได้⁽¹⁾

ในปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้ทำซี่ฟันเทียมสำหรับฟันเทียมบางส่วนถอดได้คร่อมฟัน คือ พอลิเมทิลเมทาไครเลต (poly-methyl methacrylate : PMMA) หรือ เรซินอะคริลิก (acrylic resin) เนื่องจากเป็นวัสดุที่ยึดติดกับฐานฟันเทียมได้ดี⁽²⁾ ไม่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก มีเสถียรภาพทางมิติ ปรับแต่งได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ราคาถูกและขึ้นรูปได้ง่าย⁽³⁾

ซี่ฟันเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนมีองค์ประกอบของพอลิเมทิลเมทาไครเลต เหมือนกับฐานฟันเทียมเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน แต่ซี่ฟันเทียมเรซินอะคริลิกมีขนาดของเม็ดพอลิเมอร์เล็กกว่า จึงมีเวลาแข็งตัว (setting time) เร็วกว่า และองค์ประกอบของเม็ดสีในซี่ฟันเรซินอะคริลิกใกล้เคียงกับสีฟันธรรมชาติมากกว่าอะคริลิกที่ใช้สร้างฐานฟันเทียม รวมทั้งการเชื่อมโยง (cross-linking) ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวบดเคี้ยว (occlusal surface) และพื้นผิวปลายฟัน (incisal surface) มีมากกว่าอะคริลิกที่ใช้สร้างฐานฟันเทียม นอกจากนี้นิยมใส่สารอึดแทรกอนินทรีย์ (inorganic filler) ลงในซี่ฟันเรซินอะคริลิกเพื่อส่งเสริมความมีเสถียรภาพทางมิติ และความต้านทานต่อ

การสึก (wear resistance)⁽⁴⁾ แต่ปัญหาซี่ฟันเทียมแตกหัก มีความแข็งแรงต่ำและมีการสึกจากการบดเคี้ยวยังคงพบเสมอ⁽¹⁾ และเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีหลายแนวคิดเพื่อพัฒนาความแข็งแรงของพอลิเมทิลเมทาไครเลตด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (mechanical properties)^(5,6) โดยการใส่วัสดุเข้าไปเสริมความแข็งแรง เช่น การเสริมด้วยเส้นใย (fiber) และสารอึดแทรกโลหะ (metal fillers) เป็นต้น จากการศึกษาของ Aydin และคณะ⁽⁷⁾ พบว่า การใช้เส้นใยแก้วในรูปแบบเส้นยาวให้ผลเพิ่มค่าความทนแรงตัดขวาง (transverse strength) ความทนแรงกระแทก (impact strength) และค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่เปลี่ยนสีของฐานฟันเทียม แต่การใช้เส้นใยแก้วในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกลดลง การเสริมความแข็งแรงด้วยสารอึดแทรกโลหะ เช่น อลูมินา (alumina)^(6,8) ซิลิกา (silica) ซิลเวอร์ (silver) เซอร์โคเนีย (zirconia)⁽⁹⁾ และไททานเนียม⁽¹⁰⁾ เป็นต้น จากการศึกษาของ Vojdani และคณะ⁽¹¹⁾ พบว่า พอลิเมทิลเมทาไครเลตที่ใช้สร้างฐานฟันเทียม เมื่อเติมสารอึดแทรกไมโครลูมินาร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงดัด (flexural strength) มากกว่ากลุ่มไม่เติมอย่างมีนัยสำคัญ Alhareb และ Ahmad⁽¹²⁾ ได้เสริมความแข็งแรงของฐานฟันเทียมเรซินอะคริลิกด้วยสารอึดแทรกไมโครลูมินาผสมเซอร์โคเนีย (Al₂O₃/ZrO₂) พบว่า การทนความเค้นต่อการแตกหัก (fracture toughness) และความทนแรงดึง (tensile strength) มีค่าสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารอึดแทรกอลูมินาต่อเซอร์โคเนียที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 และความทนแรงดัดมีค่าสูงสุดในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 Jasim และ Ismail⁽¹³⁾ ได้เสริมความแข็งแรงของฐานฟันเทียมเรซินอะคริลิกด้วยอนุภาคนาโนลูมินา พบว่า ความแข็งผิว (surface hardness) มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มการทดลอง (ร้อยละ 1 2 3) และความทนแรงดัดขวางมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเติมอนุภาคนาโนลูมินาร้อยละ 1 และ 2

อย่างไรก็ตามในบางการศึกษา⁽¹⁴⁾ พบว่า ไม่เกิดการยึดติดโดยตรงระหว่างพอลิเมทิลเมทาไครเลตกับสารอึดแทรกดังกล่าว จึงต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวของสารอึดแทรกก่อนนำไปใช้ โดยพบว่า สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ทางทันตกรรม เพื่อนำมาปรับปรุงสภาพพื้นผิวของสารอึดแทรกกับเรซิน เมทริกซ์

(resin matrix) ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงต่อพอลิเมทิล-เมทาโครเลตมากขึ้น^(6,15-18) นอกจากนี้ ความสวยงามยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยวัสดุที่นำมาสร้างซีฟันเทียมควรมีสีเหมือนฟันธรรมชาติและมีเสถียรภาพของสี (color stability) เพราะการเปลี่ยนสีเป็นสิ่งที่ผู้ป่วยสามารถสังเกตเห็นได้เป็นลำดับแรก⁽¹⁹⁾ อย่างไรก็ตาม การศึกษาถึงการใช้อีมพีเอสไซเลน (MPS silane) กับอนุภาคนาโนอลูมินาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลในด้านความทนแรงอัด (compressive strength) และดูการเปลี่ยนสีของซีฟันเทียมเรซินอะคริลิกในทางทันตกรรมยังมีน้อย ส่วนใหญ่มีการศึกษาเฉพาะในอนุภาคขนาดไมโครและเป็นการทดลองเกี่ยวกับเรซินอะคริลิกที่ใช้สร้างฐานฟันเทียมเป็นส่วนใหญ่

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงคุณสมบัติความทนแรงอัดและการเปลี่ยนสีของเรซินอะคริลิกที่ใช้สร้างซีฟันเทียมชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน (heat-polymerized acrylic resin) แบบที่ไม่เสริมด้วยอนุภาคนาโนอลูมินากับแบบที่ได้รับการเสริมด้วยอนุภาคนาโนอลูมินาในปริมาณที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและผ่านการปรับสภาพพื้นผิวอนุภาคนาโนอลูมินาด้วยเอมพีเอสไซเลน และมีสมมติฐานงานวิจัยหลักคือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนไม่มีผลต่อคุณสมบัติความทนแรงอัดและการเปลี่ยนสีของฟันเทียมเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ปรับและไม่ปรับสภาพพื้นผิว และวิธีการผสมเข้ากันกับผงฟันเทียมเรซิน อะคริลิก

ใช้อนุภาคนาโนอลูมินา (Al₂O₃ Nanoparticles, US Research Nanomaterials, Inc., USA) ลักษณะทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร พื้นที่ผิว 138 ตารางมิลลิเมตรต่อหนึ่งกรัม ทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silanization of alumina nanoparticle)⁽²⁰⁾ โดยใช้เอมพีเอสไซเลน (3-methacryloxy propyltrimethoxysilane: MPS, Sigma-Aldrich Co., USA) ที่สามารถเคลือบพื้นที่ได้น้อยที่สุด 314 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัมคำนวณปริมาณเอมพีเอสไซเลนโดยใช้สมการของอาร์เคล (Arkel's Equation)⁽²¹⁾ จากนั้นนำอนุภาคนาโนอลูมินา

ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเอมพีเอสไซเลนและกลุ่มควบคุมมาวิเคราะห์การคงอยู่ของธาตุซิลิกอน (Silicon deposition analysis)⁽²²⁾ ที่อยู่บนพื้นผิว โดยนำอนุภาคนาโนอลูมินาล้างในสารละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF, Carlo erba, Rodano, Milano, Italy) เป็นเวลา 2 นาที เทส่วนของเหลวที่ล้างในแต่ละครั้งนำมาตรวจสอบโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer, Nicolet Evolution 500, Thermoelectron Corp., WI, USA) จนกระทั่งสารละลายที่ล้างแสดงค่าสเปกตรัมดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 250 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมดูดกลืนแสงของสารละลายเตตระไฮโดรฟูแรนที่ไม่มีสารอื่นปนเปื้อน วิเคราะห์การคงอยู่ของธาตุซิลิกอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการใช้สเปกโตรมิเตอร์กระจายพลังงาน (energy dispersive spectrometer, EDS software)

นำอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเอมพีเอสไซเลนมาบดให้ละเอียดด้วยครกอาเกต (agate mortar) แล้วนำผงเรซินอะคริลิกสีเหมือนฟันชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน (Major hot curing, F4, Major, Italy) มาผสมกับอนุภาคนาโนอลูมินาแล้วปั่นเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่นผสม (non bubbling kneader, NBK-1, Nippon Seiki, Tokyo, Japan) โดยทำการเตรียมทั้งหมด 7 กลุ่ม กลุ่มละ 12 ชิ้น คือ กลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ร้อยละ 13 และ 5 โดยน้ำหนัก และกลุ่มควบคุมคือ กลุ่มที่ไม่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา

ขั้นตอนที่ 1: การทดสอบความทนแรงอัด

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความทนแรงอัดใช้แม่แบบเป็นแท่งแก้วรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 52 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น สร้างเข้าห่อชิ้นงานโดยผสมพลาสติกเรซิน (dental stone; Kromotypo3, Lascod, Florence, Italy) ตามอัตราส่วนที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด เทลงในภาชนะหล่อแบบทองเหลือง (Hanau flask) ถึงระดับขอบของภาชนะหล่อแบบล่าง (lower half) ทาสารคั่นกลาง (separating media) ที่แท่งแก้วแล้ววางแท่งแก้วทั้ง 3 ชิ้น ห่างกัน 10 มิลลิเมตร ให้ครึ่งหนึ่งของแท่งแก้วอยู่ระดับพอดีกับขอบภาชนะหล่อแบบล่าง โดยวางให้

ห่างจากขอบภาชนะหล่อแบบเท่าๆ กัน หลังจากพลาสติกเรซินแข็งตัวเต็มที่และเย็นลง นำมาขัดแต่งด้วยกระดาษทราย น้ำความละเอียด 600 และ 1,000 ตามลำดับ ทาสารคั่นกลาง บางๆ ให้ทั่วพื้นผิวพลาสติกเรซินและแม่แบบแห้งแล้ว ทิ้งไว้ให้แห้ง นำภาชนะหล่อแบบบน (upper half) มาประกอบให้สนิท และเทพลาสติกเรซินให้เต็มภาชนะ ปิดฝาบน รอให้พลาสติกเรซินแข็งตัวและเย็นลง แยกภาชนะหล่อแบบบนและล่างออกจากกัน แกะแม่แบบแห้งแล้วใส่ออกจากภาชนะหล่อแบบด้วยความระมัดระวัง จะได้แม่แบบพร้อมสร้างชิ้นงานตามต้องการ

จากนั้นผสมส่วนของเหลวและส่วนผงของพอลิเมทิลเมทาไครเลตตามอัตราส่วนที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด โดยส่วนผงนั้นจะใช้พอลิเมทิลเมทาไครเลตผสมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ได้เตรียมไว้แล้วข้างต้น ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ในแต่ละกลุ่ม การทดลอง นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแม่แบบที่เตรียมไว้และไปบ่มในน้ำร้อน ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที แล้วเพิ่มเป็น 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มจำนวน 3 ชิ้นงาน จึงนำไปตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน (Isomet 1000 Precision Saw, Buehler, USA) ให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 9 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ISO 1816-1979 ได้จำนวน 15 ชิ้นงาน นำมาขัดแต่งให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายน้ำความละเอียด 200, 400, 600, 800 และ 1000 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดระยะแบบดิจิตอล (digital vernier caliper, Mitutoyo, Kanagawa, Japan) เลือกชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ออก แล้วนำชิ้นงานจำนวน 12 ชิ้น ที่ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน ก่อนนำมาทดสอบเมื่อครบกำหนดนำชิ้นงานทั้งหมดไปทดสอบคุณสมบัติความทนแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบสากล⁽²³⁾ (universal testing machine model 5566, Instron Co., USA) เคลื่อนหัวกดด้วยความเร็ว (cross head speed) 5±1 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 10,000 นิวตัน บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แล้วนำมาคำนวณตามสูตร

$$UCS = \frac{4F}{\pi d^2}$$

สมการที่ 1 แสดงค่าความทนแรงอัดสูงสุด โดย UCS (Ultimate compressive strength) = ค่าความทนแรงอัดสูงสุด (เมกะปาสคาล: MPa), F = แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก (นิวตัน), d = เส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน (มิลลิเมตร), π = 3.14159 (ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์)

equation 1 shows the calculation of ultimate compressive strength, where USC = ULtimate compressive strength (Megapascal: MPa), F = the load at fracture (Newton) d = diameter of the specimen (millimeters) π = 3.14159 (constant value)

นำค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานของแต่ละกลุ่มมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จากนั้นวิเคราะห์ด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (two-way ANOVA) และเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มด้วยวิธีทดสอบทุกคู่โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ (SPSS statistics version 22, IBM, USA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจดูบริเวณรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM, JSM-5910LV, JEOL, Tokyo, Japan) ที่กำลังขยาย 50,000 และ 100,000 เท่า เพื่อดูลักษณะการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomeration) ของอนุภาคนาโนอลูมินา การเชื่อมยึด (bonding) และช่องว่าง (gap) ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเรซิน เมทริกซ์โดยรอบ

ขั้นตอนที่ 2: การทดสอบการเปลี่ยนสี

แบ่งกลุ่มการทดลองเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือกลุ่มที่ใช้เรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟัน และกลุ่มเรซินอะคริลิกชนิดใส เพื่อเป็นกลุ่มทดลองที่ตัดปัจจัยความไม่คงที่ของสีที่เกิดจากรงควัตถุสีเหมือนฟันออกไป โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับเรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟัน 7 กลุ่ม และชนิดใส 7 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา

ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และกลุ่มควบคุมคือ กลุ่มที่ไม่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา กลุ่มละ 12 ชิ้น โดยใช้แม่แบบขนาดความยาว 10±1 มิลลิเมตร ความกว้าง 10±1 มิลลิเมตร และความหนา 2±1 มิลลิเมตร (สำหรับวิธีการสร้างเข้าหล่อและวิธีการเตรียมชิ้นงานทำเหมือนกับขั้นตอนที่ 1) เมื่อได้ชิ้นงานนำไปทดสอบค่าความต่างของสี (ΔE) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer, Ultrascan XE, Hunter Lab, USA) คำนวณค่าความต่างของสีโดยเปรียบเทียบกับค่าของกลุ่มควบคุมตามระบบของ CIE L*a*b system จากสูตร⁽²⁴⁾

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

สมการที่ 2 แสดงการคำนวณค่าความต่างของสี (L^* หมายถึง ความสว่าง-มืด, a^* หมายถึง ปริมาณสีแดงและสีเขียว, b^* หมายถึง ปริมาณสีเหลืองและสีน้ำเงิน)

equation 2 shows the calculation of color alteration (where L^* represents brightness-darkness, a^* represents the red and green chroma, b^* represents yellow and blue chroma

นำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม และนำมาแปลผลทางคลินิก โดยมีเกณฑ์สำหรับการประเมินความต่างของสีคือ ระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัส (perceptibility threshold; PT) และ

ระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก (acceptability threshold; AT)^(25,26) ซึ่งเกณฑ์เหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการควบคุมคุณภาพ เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุทางทันตกรรม เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของสีทางคลินิก และเป็นเครื่องมือที่ช่วยแปลผลในงานวิจัยทางทันตกรรม โดยจากการทบทวนวรรณกรรม^(24,26) การเปรียบเทียบความต่างของสีในวัสดุบูรณะสีเหมือนฟัน ตามระบบของ CIE L*a*b เมื่อประเมินจากเกณฑ์ร้อยละ 50:50 PT ถ้าค่าความต่างของสีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.2 แสดงว่า การเปลี่ยนสีอยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัส เช่นเดียวกับค่าร้อยละ 50:50 AT เมื่อค่าความต่างของสีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.7 แสดงว่า การเปลี่ยนสีอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก ดังนั้น เมื่อได้ค่าความต่างของสีแล้วจะนำมาแปลผลตามเกณฑ์ข้างต้น เพื่อดูการเปลี่ยนสีในระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัสและระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก ตามลำดับ

ผลการศึกษา

ขั้นตอนที่ 1: การทดสอบความทนแรงอัด

ผลการทดสอบค่าความทนแรงอัดของทุกกลุ่มแสดงดังตารางและกราฟ (ตารางที่ 1 และกราฟที่ 1)

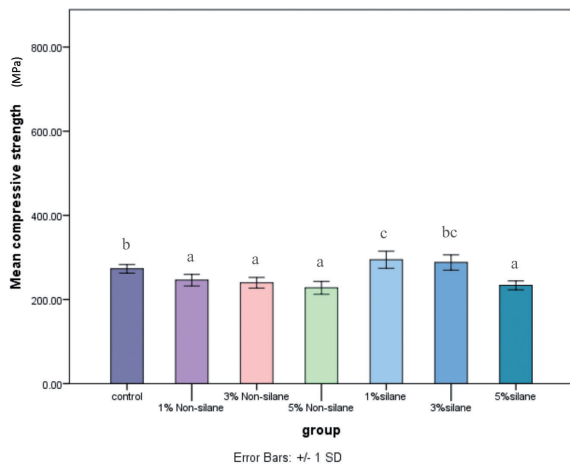
จากการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยความทนแรงอัดของกลุ่มควบคุมคือ 272.93±10.19 เมกะปาสคาล โดยกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ 294.41±20.24 เมกะปาสคาล และกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย (หน่วยเมกะปาสคาล ; MPa) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความทนแรงอัด โดยตัวอักษร ที่ต่างกัน จะแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

Table 1 Mean (MPa) and standard deviation of the compressive strength. The characters differ to demonstrate the difference was statistically significant ($p<0.05$).

Mean of compressive strength (MPa)

Amount of alumina nanoparticle	0%	1%	3%	5%
Specimens				
Control	272.93±10.19 ^b	-	-	-
Nonsilanized alumina nanoparticle	-	245.95±13.74 ^a	239.70±12.63 ^a	227.67±15.20 ^a
Silanized alumina nanoparticle	-	294.41±20.24 ^c	287.95±18.28 ^{bc}	233.52±10.48 ^a



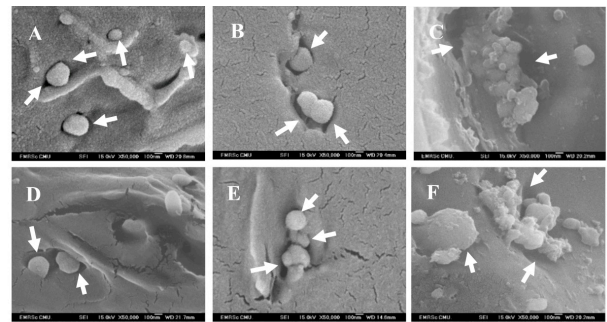
กราฟที่ 1 ค่าความทนแรงอัดของกลุ่มควบคุมและแต่ละกลุ่มทดลอง โดยตัวอักษรที่ต่างกันจะแสดงถึงความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

Graph 1 Compressive strength of control group and each experimental group. The characters differ to demonstrate the difference was statistically significant ($p < 0.05$).

กลุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดคือ 227.67 ± 15.20 เมกะปาสคาล ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเติมอนุภาคนาโนอลูมินามากกว่าร้อยละ 1 ทั้งกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน และไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าคุณสมบัติความทนแรงอัดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ พบว่ากลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (245.95 ± 13.74 , 239.70 ± 12.63 , 227.67 ± 15.20 เมกะปาสคาล ตามลำดับ) จะมีค่าความทนแรงอัดน้อยกว่ากลุ่มควบคุม (272.93 ± 10.19 เมกะปาสคาล) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

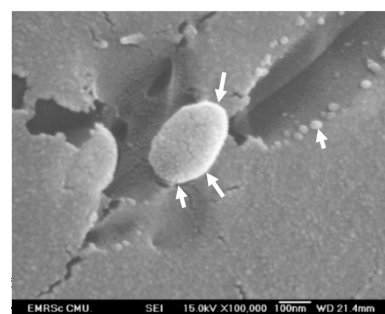
การตรวจสอบบริเวณที่แตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนอลูมินาในกลุ่มที่ปรับและไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่แตกต่างกัน (รูปที่ 1)

โดยพบว่า กลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนจะมีการกระจายตัวที่ดีและพบช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์แต่พบ



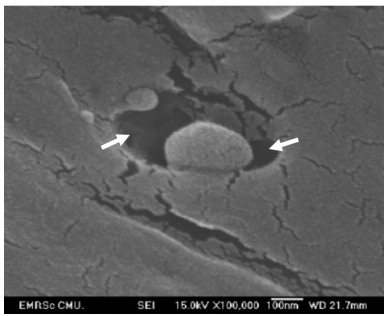
รูปที่ 1 การกระจายตัว และช่องว่างที่เกิดขึ้น (ลูกศรสีขาว) ระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์โดยรอบที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (A, B, C คือปริมาณร้อยละ 1 3 5 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนตามลำดับ D, E, F คือปริมาณร้อยละ 1 3 5 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนตามลำดับ)

Figure 1 Distribution and gap formed (white arrow) between alumina nanoparticle and surrounding matrix. Original magnification $\times 50,000$. (A, B, C : 1, 3, 5 wt% of alumina nanoparticles with silane coupling agent, respectively. D, E, F : 1, 3, 5 wt% of alumina nanoparticles without silane coupling agent, respectively.)



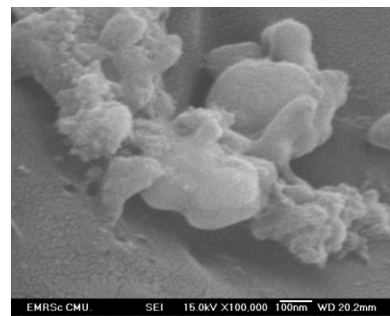
รูปที่ 2 การเชื่อมยึด (ลูกศรสีขาว) ของกลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนกับเมทริกซ์โดยรอบที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

Figure 2 The bonding (white arrow) of 1 wt% of alumina nanoparticles with silane coupling agent to the surrounding matrix. Original magnification $\times 100,000$.



รูปที่ 3 ช่องว่างที่เกิดขึ้น (ลูกศรสีขาว) ระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์โดยรอบ ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลงในกลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

Figure 3 Gap formation (white arrow) between alumina nanoparticles and surrounding matrix, which causes the decrease of mechanical properties of 1 wt% of alumina nanoparticles without silane coupling agent. Original magnification x100,000.



รูปที่ 4 อนุภาคนาโนอลูมินามีพลังงานพื้นผิวสูงจึงรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายในกลุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

Figure 4 Alumina nanoparticles have a high surface energy. As a result, it is easy to agglomerate by themselves of 5 wt% of alumina nanoparticle without silane coupling agent. Original magnification x100,000.

ช่องว่างขนาดใหญ่กว่าในกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (รูปที่ 1A, 1D) เมื่อเพิ่มกำลังขยาย (รูปที่ 2, 3) และพบอีกว่า กลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนจะลดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน มีการเชื่อมยึดระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์ได้ดีขึ้น (รูปที่ 2)

นอกจากนี้ พบว่า อนุภาคนาโนอลูมินาในกลุ่มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีแนวโน้มการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย (รูปที่ 4) และมักพบช่องว่างเกิดขึ้น

ระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์โดยรอบ (รูปที่ 3)

ขั้นตอนที่ 2: การทดสอบการเปลี่ยนสี

ผลการทดสอบค่าความต่างของสีของทุกกลุ่มทดลองแสดงดังตาราง (ตารางที่ 2)

พบว่า ทุกกลุ่มการทดลองของเรซินอะคริลิกชนิดใสมีค่าความต่างของสีที่มากกว่าระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก ($\Delta E > 2.7$) โดยเรซินอะคริลิกชนิดใสที่มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีมากที่สุดคือ กลุ่มร้อยละ 5 ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยความต่าง

ตารางที่ 2 ค่าการเปลี่ยนสีของเรซิน อะคริลิกชนิดใสและชนิดสีเหมือนฟัน (Mean±SD)

Table 2 The color alteration (ΔE) of clear and ivory acrylic resin. (Mean±SD)

Specimens	Color alteration of clear acrylic resin			Color alteration of ivory acrylic resin		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Nonsilanized alumina nanoparticle	7.07±1.06	15.36±1.56	12.65±0.42	2.70±0.33	3.36±0.34	3.25±0.85
Silanized alumina nanoparticle	6.70±0.69	12.48±0.63	17.94±1.60	1.31±0.26	1.08±0.32	0.99±0.36

ของสีเท่ากับ 17.94 พบว่ามีการเปลี่ยนสีอย่างเห็นได้ชัดเจนในทางคลินิก และกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดคือกลุ่มร้อยละ 1 ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยความต่างของสีเท่ากับ 6.70 ซึ่งยังมีการเปลี่ยนสีอย่างเห็นได้ชัดเจนในทางคลินิกเช่นกัน

เรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟันที่มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีมากที่สุดคือ กลุ่มร้อยละ 3 ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยความต่างของสีเท่ากับ 3.36 ซึ่งระบบของ CIE L*a*b ประเมินจากเกณฑ์ร้อยละ 50:50 ระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัสมากกว่า 1.2 และร้อยละ 50:50 ระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิกมากกว่า 2.7 แสดงว่า มีการเปลี่ยนสีอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดคือ กลุ่มร้อยละ 5 ของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยความต่างของสีเท่ากับ 0.99 แสดงว่า การเปลี่ยนสีไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในทางคลินิกและจัดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัส ซึ่งการเปลี่ยนสีที่สามารถยอมรับได้โดยประสาทสัมผัส พบในกลุ่มร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน และการเปลี่ยนสีที่สามารถยอมรับได้ทางคลินิก พบในกลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

บทวิจารณ์

การศึกษานี้ปฏิเสธสมมติฐานหลักในการทดลอง โดยพบว่าอย่างน้อยหนึ่งกลุ่มที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของค่าความทนแรงอัดและการเปลี่ยนสีในกลุ่มทดลองที่ผสมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านหรือไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

โดยการศึกษานี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิของอนุภาคนาโน เนื่องจากอนุภาคนาโนมีระยะทางระหว่างอนุภาคที่สั้น อนุภาคมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ ไม่โคร ทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกับสายพอลิเมอร์หรือเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ได้มากขึ้น จึงช่วยปรับปรุงค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นและความแข็งแรงของวัสดุให้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Crosby และ Lee⁽²⁷⁾ ที่พบว่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface per volume ratio) ของสารอัดแทรกเป็นปัจจัยหลักของการพัฒนาพอลิเมอร์

นาโนคอมโพสิต โดยอัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นปริมาณของการเชื่อมต่อนระหว่างผิวสัมผัส (interfacial bonding) ที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคนาโน ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติทางกลมากขึ้น และจากการศึกษาของ Ray และ Okamoto⁽²⁸⁾ พบว่า อนุภาคนาโนสามารถทำให้เพิ่มระยะทางในการขยายตัวของรอยร้าวขนาดเล็ก (microcracks) วัสดุจึงมีการทนความเค้น (toughness) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับแรงที่มากกว่าปกติ รอยร้าวที่เกิดขึ้นต้องอ้อมผ่านอนุภาคนาโนซึ่งมีพื้นที่ผิวมากทำให้ระยะทางในการเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้น จึงมีระยะเวลานานขึ้นก่อนที่จะเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ของวัสดุ

จากผลการวิจัยพบว่า ค่าความทนแรงอัดของกลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดและกลุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าความทนแรงอัดต่ำที่สุดและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากกลุ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักนั้นได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จึงช่วยปรับปรุงการกระจายตัว ลดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโนอลูมินา และช่วยปรับปรุงการเชื่อมยึดระหว่างอนุภาคนาโนอลูมินากับเมทริกซ์ให้ดีขึ้น (รูปที่ 1A, 2) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Guo และคณะ⁽²⁹⁾

การศึกษานี้เลือกใช้เอ็มพีเอสไซเลน เนื่องจากมีพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameters) ที่ใกล้เคียงกับเมทิลเมทาไครเลตจึงเกิดการละลายร่วมกันได้ดี ทำให้เอ็มพีเอสไซเลนสามารถเชื่อมต่อกับเรซินอะคริลิกได้ดี โดยบนผิวของอนุภาคนาโนอลูมินาเกิดขึ้นของไซเลนแบบสองชั้น ชั้นแรกติดกับผิวของอนุภาคนาโนอลูมินาเกิดการเชื่อมยึดกันอย่างแข็งแรงด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เรียกว่าเคมีซอร์บ (chemisorbed) ส่วนชั้นถัดมาเกิดการเชื่อมยึดกันไม่แข็งแรงด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals force) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) เรียกว่า ฟิสิซอร์บ (physisorbed) ซึ่งสามารถล้างออกได้ง่ายด้วยตัวทำละลายทางเคมี⁽²²⁾ โดยจากการศึกษาของ Ahmed และ Zainal⁽⁹⁾ พบว่า การปรับสภาพพื้นผิวอลูมินาและเซอร์โคเนียด้วยสารคู่ควบไซเลน ทำให้เกิดผิวสัมผัสที่ระหว่างสารอัดแทรกกับพอลิเมทิลเมทาไครเลต ช่วยเพิ่มความต้านทานหรือความสามารถในการดูดกลืนพลังงานขณะที่รับแรง เป็นการช่วย

ลดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) จากการศึกษาของ Chaijareenont และคณะ⁽²²⁾ พบว่า การปรับสภาพพื้นผิวไมโครลูมินาโดยใช้เอ็มพีเอสไฮเลนช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างพื้นผิวของสารอนินทรีย์และโมเลกุลของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีพันธะทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Guo และคณะ⁽²⁹⁾ ที่กล่าวว่า เอ็มพีเอสไฮเลนทำให้เกิดพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงมากกว่า แวนเดอวาล์ดและพันธะไฮโดรเจน โดยพบว่า พันธะเคมีช่วยให้มีการเชื่อมยึดระหว่างพื้นผิวของสารอัดแทรกกับเมทริกซ์ที่ดีขึ้น จึงช่วยส่งเสริมให้อนุภาคนาโนลูมินาเชื่อมโยงเป็นหน่วยเดียวกัน ทำให้เกิดการทนความเค้นและความแข็งแรงของเมทริกซ์เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ในกลุ่มร้อยละ 1 ของอนุภาคนาโนลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนมีความแข็งแรงอัดมากที่สุด อาจเนื่องจากการมีผิวสัมผัสที่สมบูรณ์ไม่มีรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างอนุภาคนาโนลูมินากับพอลิเมอร์ ทำให้เมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นภายในชิ้นงานเป็นไปได้ว่า รอยร้าวบางส่วนอาจวิ่งอ้อมอนุภาคนาโนลูมินา ตามที่ Ray และ Okamoto⁽²⁸⁾ ได้ศึกษาไว้ แต่อาจมีรอยร้าวบางส่วนที่วิ่งชนอนุภาคนาโนลูมินาที่มีความแข็งโดยตรงทำให้รอยร้าวไม่สามารถวิ่งต่อไปได้ ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าผิวสัมผัสโดยรอบอนุภาคนาโนลูมินามีช่องว่างหรือมีรูพรุน (กลุ่มร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก) เมื่อรับแรง รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายไปชนกับช่องว่างโดยรอบอนุภาคนาโนลูมินาซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอ แล้วแรงจะถูกส่งถ่ายไปยังเมทริกซ์โดยรอบ ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทบทวนวรรณกรรมของ Bayne⁽³⁰⁾

จากผลการวิจัยพบว่า ในกลุ่มร้อยละ 1 3 และ 5 ของอนุภาคนาโนลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนมีค่าความทนแรงอัดน้อยกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเติมอนุภาคนาโนลูมินามากกว่าร้อยละ 1 ทั้งกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนและไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนพบว่า มีแนวโน้มที่คุณสมบัติความทนแรงอัดมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคนาโนลูมินามีพลังงานพื้นผิว (Surface Energy) ที่สูงจึงเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย ดังนั้นกลุ่มร้อยละ 1 3 และ 5 ของอนุภาคนาโนลูมินาที่ไม่ผ่านการ

ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนจึงมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนลูมินาในพอลิเมอร์ไม่ดี และพบช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาโนลูมินากับเมทริกซ์โดยรอบส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลลดลง⁽²⁹⁾ และจากการศึกษาของ Alhaleb และ Ahmad⁽¹²⁾ พบว่า การเติมอนุภาคนาโนลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยไฮเลน ไม่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิเมทิลเมทาไครเลต เนื่องจากไม่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของสารอัดแทรกกับเมทริกซ์และทำให้ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากมีความเครียดสะสมบริเวณสารอัดแทรกที่มีปริมาณมากเกินไป ทำให้מודูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเรซินอะคริลิกมีค่าลดลง^(8,31)

นอกเหนือจากปัจจัยเรื่องความแข็งแรงของซีฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาไครเลตแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากันคือ เรื่องความสวยงาม ดังนั้น การเปลี่ยนสีที่สังเกตได้ทางคลินิกจึงเป็นสิ่งสำคัญซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดความสำเร็จของการสร้างฟันเทียม โดยจากการศึกษานี้ได้นำอนุภาคนาโนลูมินาในปริมาณที่แตกต่างกันทั้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเอ็มพีเอสไฮเลนผสมกับเรซินอะคริลิกชนิดใสและชนิดสีเหมือนฟัน และเมื่อนำค่า $L^* a^* b^*$ ของเรซินอะคริลิกชนิดใสมาคำนวณ พบว่า ค่าเฉลี่ยความต่างของสีในทุกกลุ่มมีค่าระหว่าง 6.70-17.94 ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนสีมากกว่าร้อยละ 50:50 AT ($\Delta E > 2.7$) ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับทางคลินิก ทั้งนี้เนื่องจากเรซินอะคริลิกชนิดใสไม่มีองค์ประกอบของเม็ดสี (pigment) จึงทำให้มีลักษณะใส ดังนั้น เมื่อนำมาผสมกับอนุภาคนาโนลูมินาซึ่งมีสีขาวจึงทำให้เห็นความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจน

เรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟันกลุ่มที่เติมอนุภาคนาโนลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนพบว่า มีค่าเฉลี่ยความต่างของสีอยู่ระหว่าง 2.70-3.36 ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนสีมากกว่าร้อยละ 50:50 AT ($\Delta E > 2.7$) นั่นคือ มีการเปลี่ยนสีเห็นได้ชัดเจนในทางคลินิก ทั้งนี้เนื่องจากการมีพลังงานพื้นผิวที่สูงของอนุภาคนาโนลูมินาเมื่อไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนจึงเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย มีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ที่ไม่ดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Guo และคณะ⁽²⁹⁾ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นก้อนสีขาวและมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนลูมินาใน

เมทริกซ์ โดยจะสังเกตได้ชัดมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนอลูมินา

เรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟันที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนพบว่า มีค่าเฉลี่ยความต่างของสีอยู่ระหว่าง 0.99-1.31 ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก (ร้อยละ 50:50 AT <2.7) เนื่องจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนสามารถต้านทานการเสื่อมสภาพ (aging resistance) และปกปิดสีของวัสดุอุดแทรกได้^(32,33) รวมทั้งสารคู่ควบไซเลนช่วยทำให้มีเสถียรภาพของสีที่ดีขึ้น⁽³⁴⁾ และจากการศึกษาของ Marzec และ Zaborski⁽³⁵⁾ พบว่า สารคู่ควบไซเลนช่วยป้องกันการย่อยสลาย (degradation) ของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิสของพันธะในสารคู่ควบไซเลน ส่งผลให้เกิดการหลุดของสารอุดแทรกและทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้⁽³⁶⁾ ดังนั้นในกลุ่มเรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟันที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินา ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนจึงมีการเปลี่ยนสีน้อยและอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก

จากผลการทดลอง พบว่า กลุ่มเรซินอะคริลิกสีเหมือนฟันที่เติมอนุภาคนาโนอลูมินาร้อยละ 5 ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีน้อยที่สุด (0.99±0.36) เนื่องจากเกิดกระบวนการจับตัวระหว่างไอออนและอิเล็กตรอนเข้าด้วยกัน โดยอลูมินามีคุณสมบัติเป็นโลหะและเม็ดสีในพอลิเมทิลเมทาไครเลตมีอะตอมของโลหะเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ทำให้เกิดความเข้ากันได้ และมีความสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน (electron affinity) จึงทำให้มีเสถียรภาพของสีเพิ่มขึ้น⁽²⁴⁾ และจากการศึกษาที่ว่า สารคู่ควบไซเลนจะช่วยป้องกันการเกิดการย่อยสลายของพอลิเมอร์ได้ จึงทำให้กลุ่มอะคริลิกสีเหมือนฟันเติมอนุภาคนาโนอลูมินาร้อยละ 5 ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดและมีการมองเห็นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยประสาทสัมผัส

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนสีของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความแตกต่างของสารเชื่อมไขว้ (crosslink agent) ตัวทำให้นุ่ม (plasticizer)⁽³⁷⁾ การปนเปื้อนที่พื้นผิว มีรูพรุนเกิดขึ้นในขั้นตอนสร้างชิ้นงาน^(38,39) ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ⁽⁴⁰⁾ กระบวนการขัดและความเรียบของชิ้นงาน⁽⁴¹⁾ ปฏิกริยาการ

เกิดพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันทำให้มีปริมาณของมอนอเมอร์ตกค้างที่แตกต่างกัน

ผลของการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางคลินิก เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาไครเลตบนพื้นเทียม บางส่วนถอดได้พร้อมฟันธรรมชาติ โดยพบว่า พอลิเมทิลเมทาไครเลตชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนที่ได้รับการเสริมความแข็งแรงด้วยอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนในกลุ่มร้อยละ 1 ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความทนแรงอัดได้สูงสุด และเมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนสีทางคลินิก พบว่า มีการเปลี่ยนสีเพียงเล็กน้อย อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางคลินิก (ร้อยละ 50:50 AT <2.7) และสามารถนำมาใช้ในบริเวณที่ต้องการความสวยงามได้

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้เป็นเพียงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น อีกทั้งเป็นเพียงการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบวิธีการทดลองให้คล้ายคลึงกับการใช้งานภายในช่องปากให้มากขึ้น เช่น สร้างตัวอย่างชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับซี่ฟันเทียม การนำชิ้นงานไปผ่านเครื่องเปลี่ยนอุณหภูมิร้อนเย็นแบบเป็นจังหวะ (thermocycling) นอกจากนี้การศึกษาค้างต่อไป อาจพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติความทนแรงอัดและการเปลี่ยนสีระหว่างซี่ฟันเทียมที่มีขายในท้องตลาดกับเรซินอะคริลิกสีเหมือนฟันเมื่อเติมอนุภาคนาโนอลูมินาร้อยละ 1 ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (ตามผลการทดลองนี้) รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อการสึก ความทนแรงดัดขวาง เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานทางคลินิก และนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตซี่ฟันเทียมขึ้นเองต่อไป

บทสรุป

ภายใต้ขอบเขตของการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า

1. ค่าความทนแรงอัดของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนที่ผสมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมอนุภาคนาโนอลูมินาร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าความทนแรงอัดของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนที่ผสมอนุภาคนาโนอลูมินาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีค่าเฉลี่ยลดลงเมื่อร้อยละของอนุภาค

นาโนอนุภาคนาโนที่เติมเพิ่มมากขึ้นและมีค่าน้อยกว่ากลุ่มไม่เติมอนุภาคนาโนอนุภาคนาโน (ควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. เรซินอะคริลิกชนิดใสที่ผสมอนุภาคนาโนอนุภาคนาโนที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนกลุ่มร้อยละ 1 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดและมากที่สุด ตามลำดับ

3. เรซินอะคริลิกชนิดสีเหมือนฟันที่ผสมอนุภาคนาโนอนุภาคนาโนที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีน้อยที่สุดและอนุภาคนาโนอนุภาคนาโนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนกลุ่มร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนสีมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และขอขอบคุณ ดร.ธนพัฒน์ ศาสตร์ระจิก สำหรับคำแนะนำในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Patel MB, Bencharit S. A treatment protocol for restoring occlusal vertical dimension using an overlay removable partial denture as an alternative to extensive fixed restorations: a clinical report. *Open Dent J* 2009; 3: 213-218.
2. Zarb GA, Bolender CL, Eckert S, Fenton A, Jacob R, R. MS. *Prosthetic treatment for edentulous patients: Complete dentures and implant supported prostheses*. 12th ed. St. Louis: Mosby; 2004: 345-350.
3. Sakaguchi RL, Powers JM. *Craig's restorative dental materials*. 13th ed. United State: Elsevier Mosby; 2012: 63-70.
4. Anusavice KJ, Shen C, Rawls HR. *Phillips' science of dental materials*. 12th ed. St.Louis: Elsevier Health Sciences; 2013: 495-496.

5. Jagger DC, Harrison A, Jandt KD. The reinforcement of dentures. *J Oral Rehabil* 1999; 26: 185-194.
6. Pholdee W, Chaijareenont P, Arksornnukit M. The Study of Tensile Bond Strength between Non-Reinforced and Reinforced Alumina Filler with Different Amount in Denture Base. *CM Dent J* 2015; 36: 99-110. (in Thai)
7. Aydin C, Yilmaz H, Çağlar A. Effect of glass fiber reinforcement on the flexural strength of different denture base resins. *Quintessence Int* 2002; 33: 457-463.
8. Ellakwa AE, Morsy MA, El-Sheikh AM. Effect of Aluminum Oxide Addition on the Flexural Strength and Thermal Diffusivity of Heat-Polymerized Acrylic Resin. *J Prosthodont* 2008; 17: 439-444.
9. Ahmed OA, Zainal AA. Effect of Al₂O₃/ZrO₂ reinforcement on the mechanical properties of PMMA denture base. *J Reinf Plast Compos* 2010; 30: 86-93.
10. Asar NV, Albayrak H, Korkmaz T, Turkyilmaz I. Influence of various metal oxides on mechanical and physical properties of heat-cured polymethyl methacrylate denture base resins. *J Adv Prosthodont* 2013; 5: 241-247.
11. Vojdani M, Bagheri R, Khaledi AAR. Effects of aluminum oxide addition on the flexural strength, surface hardness, and roughness of heat-polymerized acrylic resin. *J Dent Sci* 2012; 7: 238-244.
12. Alhareb AO, Ahmad ZA. Effect of Al₂O₃/ZrO₂ reinforcement on the mechanical properties of PMMA denture base. *J Reinf Plast Compos* 2010; 7: 189-195.
13. Jasim BS, Ismail IJ. The effect of silanized alumina nano-fillers addition on some physical and mechanical properties of heat cured polymethyl methacrylate denture base material. *J Baghdad Coll Dent* 2014; 26: 18-23.

14. Ash BJ, Siegel RW, Schadler LS. Mechanical behavior of alumina/poly (methyl methacrylate) nanocomposites. *Macromolecules* 2004; 37: 1358-1369.
15. Arksornnukit M, Takahashi H, Nishiyama N. Effects of Silane Coupling Agent Amount on Mechanical Properties and Hydrolytic Durability of Composite Resin After Hot Water Storage. *Dent Mater* 2004; 23: 31-36.
16. Matinlinna JP, Lassila LVJ, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK. An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. *J Prosthodont* 2004; 17: 155-164.
17. Nishiyama N, Horie K, Asakura T. Hydrolysis and condensation mechanisms of a silane coupling agent studied by ¹³C and ²⁹Si NMR. *J Appl Polym Sci* 1987; 34: 1619-1630.
18. Solnit GS. The effect of methyl methacrylate reinforcement with silane-treated and untreated glass fibers. *J Prosthet Dent* 1991; 66: 310-314.
19. Goiato MC, Dos Santos DM, Baptista GT, et al. Effect of thermal cycling and disinfection on colour stability of denture base acrylic resin. *Gerodontology* 2013; 30: 276-282.
20. Nincharoen S, Prayadsab P, Arksornnukit M, Chaijareenont P. Effect of Different Alumina Filler Amounts Reinforced into Acrylic Denture Base on Tensile Bond Strength between Denture Teeth and Denture Base. *CM Dent J* 2013; 34: 71-80. (in Thai)
21. Peterson Jr WR, Arkles BC. *Methods for the production of organic polysilanes*. Washington, DC: Patent and Trademark Office; 1981: 27.
22. Chaijareenont P, Takahashi H, Nishiyama N, Arksornnukit M. Effect of different amounts of 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane on the flexural properties and wear resistance of alumina reinforced PMMA. *Dent Mater* 2012; 31: 623-628.
23. Yadav P, Mittal R, Vijay Kumar S, Garg R. Effect of Incorporation of Silane-Treated Silver and Aluminum Microparticles on Strength and Thermal Conductivity of PMMA. *J Prosthodont* 2012; 21: 546-551.
24. Kiat-amnuay S, Beerbower M, Powers JM, Paravina RD. Influence of pigments and opacifiers on color stability of silicone maxillofacial elastomer. *J Dent* 2009; 37: 45-50.
25. Khokhar ZA, Razzoog ME, Yaman P. Color stability of restorative resins. *Quintessence Int* 1991; 22: 733-737.
26. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, et al. Color Difference Thresholds in Dentistry. *J Esthet Restor Dent* 2015; 27: S1-S9.
27. Crosby AJ, Lee JY. Polymer nanocomposites: the “nano” effect on mechanical properties. *Polym Rev* 2007; 47: 217-229.
28. Ray SS, Okamoto M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Prog Polym Sci* 2003; 28: 1539-1641.
29. Guo Z, Pereira T, Choi O, Wang Y, Hahn HT. Surface functionalized alumina nanoparticle filled polymeric nanocomposites with enhanced mechanical properties. *J Mater Chem* 2006; 16: 2800-2808.
30. Bayne SC. Dental biomaterials: where are we and where are we going?. *J Dent Educ* 2005; 69: 571-585.
31. Omrani A, Simon LC, Rostami AA. The effects of alumina nanoparticle on the properties of an epoxy resin system. *Mater Chem Phys* 2009; 114: 145-150.
32. Plueddemann EP. Silane coupling agents. New York, USA: Springer Science & Business Media; 2013: 55-60.

33. Sabu T, Kuruvilla J, Malhotra S, Goda K, Sreekala M. *Polymer Composites, Macro-and Micro-composites*. Weinheim Germany: Wiley CVH; 2012: 135-140.
34. Krysztafkiewicz A, Binkowski Sa, Wysocka I. Pigments on amorphous silica carriers. *Powder Technol* 2003; 132: 190-195.
35. Marzec A, Zaborski M. *Pigment and Dye Modified Fillers as Elastomeric Additives*. Croatia EU: Intech Open Access Publisher; 2012: 121-123.
36. Kheraif AAAA, Qasim SSB, Ramkrishnaiah R, Rehman Iu. Effect of different beverages on the color stability and degree of conversion of nano and microhybrid composites. *Dent Mater J* 2013; 32: 326-331.
37. Bohra PK, Ganesh P, Reddy MM, Ebenezar AR, Sivakumar G. Colour Stability of Heat and Cold Cure Acrylic Resins. *J Clin Diagn Res* 2015; 9: 12-15.
38. Huggett R, Brooks SC, Campbell AM, Satguranathan R, Bell GA. Evaluation of analytical techniques for measurement of denture-base acrylic resin glass-transition temperature. *Dent Mater* 1990; 6: 17-19.
39. Shimizu H, Kakigi M, Fujii J, Tsue F, Takahashi Y. Effect of surface preparation using ethyl acetate on the shear bond strength of repair resin to denture base resin. *J Prosthodont* 2008; 17: 451-455.
40. De Rezende Pinto L, Rodriguez Acosta EJT, Távora FFF, Da Silva PMB, Porto VC. Effect of repeated cycles of chemical disinfection on the roughness and hardness of hard relined acrylic resins. *Gerodontology* 2010; 27: 147-153.
41. Lai CP, Tsai MH, Chen M, Chang HS, Tay HH. Morphology and properties of denture acrylic resins cured by microwave energy and conventional water bath. *Dent Mater* 2004; 20: 133-141.