

Pengaruh Penambahan Titanium Dioksida Terhadap Kekasaran Permukaan dan Stabilitas Warna Pada Basis Gigi Tiruan Resin Akrilik Polimerisasi Panas

Revina Angelia* , Dwi Tjahyaning Putranti

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email : revinaangelia10738@gmail.com*

ABSTRAK

Resin akrilik polimerisasi panas (RAPP) merupakan bahan basis gigi tiruan yang paling umum digunakan namun memiliki kekurangan dalam sifat fisis dan mekanis. Titanium dioksida sebagai bahan penguat nanoteknologi dapat meningkatkan sifat material namun pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan dan stabilitas warna perlu dievaluasi. Mengetahui pengaruh penambahan titanium dioksida konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5% terhadap kekasaran permukaan dan stabilitas warna basis gigi tiruan RAPP. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan titanium dioksida (TiO_2) pada konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5% terhadap kekasaran permukaan dan stabilitas warna basis gigi tiruan resin akrilik polimerisasi panas, menganalisis signifikansi perubahan yang terjadi, serta menentukan konsentrasi optimal yang memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan sifat fisis dan pemeliharaan estetika. Penelitian eksperimental laboratoris dengan desain post only control group design. Sampel dibagi menjadi 4 kelompok: kontrol tanpa titanium dioksida, dan perlakuan dengan penambahan titanium dioksida 0,5%, 1%, dan 1,5% ($n=6$ setiap kelompok). Kekasaran permukaan diukur menggunakan surface roughness tester dan stabilitas warna menggunakan portable colorimeter. Data dianalisis dengan uji T independen ($p \leq 0,05$). Nilai rerata kekasaran permukaan menurun signifikan dari $0,192 \pm 0,004 \mu\text{m}$ (kontrol) menjadi $0,187 \pm 0,001 \mu\text{m}$ (0,5%), $0,156 \pm 0,006 \mu\text{m}$ (1%), dan $0,119 \pm 0,002 \mu\text{m}$ (1,5%) dengan $p < 0,05$. Nilai stabilitas warna meningkat signifikan dari $0 \pm 0 \Delta E$ (kontrol) menjadi $27,71 \pm 0,25 \Delta E$ (0,5%), $30,98 \pm 0,30 \Delta E$ (1%), dan $35,41 \pm 0,11 \Delta E$ (1,5%) dengan $p < 0,05$. Penambahan titanium dioksida secara signifikan menurunkan kekasaran permukaan dalam batas klinis yang dapat diterima namun meningkatkan perubahan warna yang melebihi batas klinis ($\Delta E > 3,7$).

Kata kunci: titanium dioksida; kekasaran permukaan; stabilitas warna

Abstract

Heat-polymerized acrylic resin (RAPP) is the most commonly used denture base material but has deficiencies in physical and mechanical properties. Titanium dioxide as a nanotechnology reinforcing material can improve material properties but its effects on surface roughness and color stability need evaluation. To determine the effect of titanium dioxide addition at concentrations of 0.5%, 1%, and 1.5% on surface roughness and color stability of RAPP denture base. The objective of this study is to evaluate the effect of adding titanium dioxide (TiO_2) at concentrations of 0.5%, 1%, and 1.5% on the surface roughness and color stability of heat-polymerized acrylic resin denture bases, analyze the significance of the observed changes, and determine the optimal concentration that provides the best balance between improved physical properties and aesthetic maintenance. Experimental laboratory

research with post only control group design. Samples were divided into 4 groups: control without titanium dioxide, and treatment groups with titanium dioxide addition of 0.5%, 1%, and 1.5% (n=6 each group). Surface roughness was measured using surface roughness tester and color stability using portable colorimeter. Data were analyzed using independent T-test ($p \leq 0.05$). Mean surface roughness values decreased significantly from $0.192 \pm 0.004 \mu\text{m}$ (control) to $0.187 \pm 0.001 \mu\text{m}$ (0.5%), $0.156 \pm 0.006 \mu\text{m}$ (1%), and $0.119 \pm 0.002 \mu\text{m}$ (1.5%) with $p < 0.05$. Color stability values increased significantly from $0 \pm 0 \Delta E$ (control) to $27.71 \pm 0.25 \Delta E$ (0.5%), $30.98 \pm 0.30 \Delta E$ (1%), and $35.41 \pm 0.11 \Delta E$ (1.5%) with $p < 0.05$. Titanium dioxide addition significantly reduces surface roughness within clinically acceptable limits but increases color changes beyond clinical limits ($\Delta E > 3.7$).

Keywords: *titanium dioxide; surface roughness; color stability*

PENDAHULUAN

Kehilangan gigi merupakan masalah global yang mempengaruhi kualitas hidup jutaan orang di seluruh dunia. Menurut World Health Organization (WHO), prevalensi kehilangan gigi meningkat seiring dengan bertambahnya usia, dimana sekitar 30% populasi lansia mengalami kehilangan gigi sebagian atau seluruhnya (Petersen & Yamamoto, 2005). Data epidemiologi menunjukkan bahwa di negara berkembang, angka kehilangan gigi prematur akibat karies dan penyakit periodontal mencapai 60–90% pada populasi dewasa (Kassebaum et al., 2014). Kondisi ini menimbulkan berbagai konsekuensi fungsional dan estetik yang signifikan, termasuk kesulitan mengunyah, gangguan bicara, perubahan dimensi vertikal wajah, dan penurunan kepercayaan diri pasien (Gerritsen et al., 2010; Slade & Spencer, 1994; Emami et al., 2013). Masalah kehilangan gigi yang tidak segera ditangani juga berdampak pada status gizi dan kualitas hidup secara keseluruhan.

Penggantian gigi yang hilang melalui rehabilitasi prostodontik merupakan solusi utama untuk mengatasi masalah kehilangan gigi. Gigi tiruan lepasan, baik sebagian maupun lengkap, tetap menjadi pilihan perawatan yang paling umum karena relatif terjangkau dan dapat diaplikasikan pada berbagai kondisi klinis (Zarb et al., 2013; Carlsson & Omar, 2010). Keberhasilan perawatan prostodontik tidak hanya ditentukan oleh desain dan retensi gigi tiruan, tetapi juga sangat bergantung pada kualitas bahan yang digunakan, khususnya bahan basis gigi tiruan yang berkontak langsung dengan jaringan oral pasien (Polyzois et al., 2011; Goiato et al., 2012). Sifat fisik dan biologis dari bahan basis gigi tiruan seperti polymethyl methacrylate (PMMA) menjadi faktor penting dalam menentukan kenyamanan, daya tahan, dan respon jaringan terhadap prosthesis (Anusavice et al., 2012).

Basis gigi tiruan merupakan komponen fundamental yang berfungsi sebagai fondasi untuk anasir gigi tiruan dan interface antara gigi tiruan dengan jaringan pendukung. Basis gigi tiruan harus mampu menggantikan tulang alveolar yang hilang, mengembalikan estetik wajah, menerima dan mendistribusikan beban fungsional dari oklusi ke jaringan pendukung, serta memberikan retensi dan stabilitas yang adequate (Martina et al., 2024). Selain itu, basis gigi tiruan juga berperan dalam memelihara kesehatan jaringan oral melalui biokompatibilitas yang baik dan karakteristik permukaan yang tidak mendukung pertumbuhan mikroorganisme patogen.

Resin akrilik polimerisasi panas (RAPP) telah menjadi gold standard untuk bahan basis gigi tiruan sejak diperkenalkan pada pertengahan tahun 1940-an. Popularitas RAPP disebabkan oleh berbagai keunggulan yang dimilikinya, termasuk estetika yang excellent dengan kemampuan meniru warna dan translucency gingiva alami, biokompatibilitas yang baik, stabilitas dimensi yang acceptable, kemudahan manipulasi dan reparasi, serta cost-effectiveness yang tinggi. Proses

polimerisasi panas memberikan keunggulan berupa working time yang lebih lama, tingkat konversi monomer yang lebih tinggi, dan sifat mekanis yang superior dibandingkan dengan resin akrilik self-cured.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, RAPP juga memiliki beberapa keterbatasan yang signifikan. Kekurangan utama meliputi kekuatan mekanis yang relatif rendah, terutama kekuatan impak dan fleksural, yang menyebabkan kecenderungan fraktur ketika terjatuh atau mengalami beban berlebihan. Selain itu, RAPP juga rentan terhadap perubahan warna seiring waktu, memiliki porositas yang dapat menjadi tempat akumulasi plak dan mikroorganisme, serta cenderung mengalami wear yang dapat mempengaruhi retensi dan stabilitas gigi tiruan dalam jangka panjang.

Karakteristik permukaan RAPP merupakan faktor kritis yang mempengaruhi kesehatan oral pasien pengguna gigi tiruan. Kekasaran permukaan yang berlebihan dapat menyebabkan akumulasi plak, debris makanan, dan mikroorganisme patogen seperti *Candida albicans*, yang merupakan penyebab utama denture stomatitis. Penelitian menunjukkan bahwa permukaan dengan kekasaran lebih dari $0,2\ \mu\text{m}$ cenderung mendukung adhesi dan kolonisasi bakteri. Oleh karena itu, achieving optimal surface smoothness merupakan objective penting dalam fabrikasi basis gigi tiruan untuk meminimalkan risiko komplikasi oral.

Stabilitas warna merupakan aspek estetik yang sangat penting dalam keberhasilan perawatan prostodontik. Perubahan warna basis gigi tiruan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk degradasi polimer akibat paparan cahaya UV, absorpsi stain dari makanan dan minuman, serta perubahan kimia internal material. Parameter stabilitas warna umumnya dievaluasi menggunakan sistem CIELAB dengan nilai ΔE , dimana perubahan warna dengan $\Delta E \leq 3,7$ masih dianggap acceptable secara klinis. Perubahan warna yang melebihi batas ini akan terdeteksi secara visual dan dapat mempengaruhi kepuasan pasien terhadap hasil perawatan.

Upaya untuk meningkatkan sifat fisis dan mekanis RAPP telah menjadi fokus penelitian material kedokteran gigi selama beberapa dekade. Berbagai pendekatan telah diexplore, termasuk modifikasi komposisi kimia, optimisasi proses polimerisasi, dan penambahan bahan penguat (reinforcement). Konsep reinforcement melibatkan inkorporasi filler atau serat ke dalam matriks polimer untuk meningkatkan sifat mekanis tanpa mengorbankan karakteristik positif yang sudah ada. Jenis reinforcement yang telah diteliti meliputi serat kaca, serat karbon, serat aramid, metal oxide nanoparticles, dan berbagai jenis filler anorganik.

Perkembangan nanoteknologi telah membuka peluang baru dalam pengembangan material dental. Nanoparticles metal oxide, khususnya titanium dioksida (TiO_2), zirconium dioksida (ZrO_2), dan aluminum oxide (Al_2O_3), telah menunjukkan potensi yang promising sebagai reinforcing agent untuk resin dental. Keunggulan nanoparticles terletak pada ratio surface area to volume yang tinggi, yang memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan matriks polimer dan distribusi stress yang lebih efektif. Selain itu, ukuran nano juga meminimalkan efek negative terhadap transparensi dan workability material.

Titanium dioksida merupakan salah satu nanoparticle yang paling menarik untuk aplikasi dental karena memiliki kombinasi properties yang ideal. TiO_2 memiliki biokompatibilitas yang excellent, chemical inertness yang tinggi, photocatalytic activity yang dapat memberikan efek antimikroba, high refractive index yang dapat mempengaruhi optical properties, serta mechanical properties yang superior. Kristal struktur TiO_2 yang paling umum adalah anatase dan rutile, dengan anatase umumnya menunjukkan photocatalytic activity yang lebih tinggi sedangkan rutile memiliki chemical stability yang lebih baik.

Penelitian terdahulu mengenai penambahan TiO_2 pada resin dental menunjukkan hasil

yang promising namun juga mengungkap beberapa challenges. Alnamel H (2014) melaporkan bahwa penambahan TiO_2 dengan konsentrasi 3%, 5%, dan 7% pada RAPP dapat meningkatkan kekasaran permukaan secara signifikan, dengan nilai kekasaran meningkat dari $2,331 \pm 0,01 \mu\text{m}$ menjadi $2,457 \pm 0,007 \mu\text{m}$ pada konsentrasi tertinggi. Chowdury dkk (2021) menemukan bahwa penambahan TiO_2 2% meningkatkan kekasaran permukaan dari $0,2278 \pm 0,07769 \mu\text{m}$ menjadi $0,4095 \pm 0,02871 \mu\text{m}$. Sebaliknya, Alwan dkk (2015) melaporkan bahwa TiO_2 3% hanya meningkatkan kekasaran dari $0,28 \pm 0,083 \mu\text{m}$ menjadi $0,38 \pm 0,08 \mu\text{m}$.

Terkait stabilitas warna, penelitian Aziz HK (2018) menunjukkan bahwa penambahan TiO_2 3% menyebabkan peningkatan ΔE yang signifikan namun masih dalam batas klinis yang acceptable. Sahin Z (2017) melaporkan hasil serupa dengan penambahan zirconium oxide 1% yang menyebabkan peningkatan ΔE namun masih $\leq 3,7$. Namun, Fathey A (2018) menemukan bahwa penambahan metal oxide dengan konsentrasi 2% dan 5% menyebabkan perubahan warna yang melebihi batas klinis dengan ΔE antara $7,17 \pm 0,44$ hingga $23,19 \pm 0,39$.

Variabilitas hasil penelitian terdahulu mengindikasikan adanya faktor-faktor yang mempengaruhi outcome penambahan TiO_2 , termasuk konsentrasi yang digunakan, ukuran partikel, metode pencampuran, dan karakteristik spesifik dari resin base yang digunakan. Sebagian besar penelitian menggunakan konsentrasi TiO_2 yang relatif tinggi ($\geq 2\%$), sementara pengaruh konsentrasi yang lebih rendah belum banyak dieksplorasi. Hal ini menimbulkan gap pengetahuan yang signifikan, mengingat konsentrasi yang lebih rendah mungkin dapat memberikan benefit tanpa menimbulkan adverse effects yang berlebihan.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk mengoptimalkan sifat RAPP melalui pendekatan nanoreinforcement yang dapat meningkatkan performance klinis tanpa mengorbankan karakteristik estetik dan biokompatibilitas. Dengan meningkatnya demands terhadap kualitas perawatan prostodontik dan expectations pasien terhadap durability dan aesthetics gigi tiruan, pengembangan material dengan sifat yang superior menjadi prioritas penting dalam bidang material kedokteran gigi.

Novelty penelitian ini terletak pada eksplorasi konsentrasi TiO_2 yang relatif rendah (0,5%, 1%, dan 1,5%) untuk mengidentifikasi threshold concentration yang dapat memberikan improvement dalam sifat material tanpa menimbulkan compromises yang signifikan terhadap estetika. Pendekatan ini berbeda dengan mayoritas penelitian sebelumnya yang menggunakan konsentrasi tinggi dan fokus utama pada sifat mekanis, sementara penelitian ini memberikan emphasis yang seimbang antara sifat fisis dan estetik.

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan titanium dioksida dengan konsentrasi rendah terhadap kekasaran permukaan dan stabilitas warna basis gigi tiruan resin akrilik polimerisasi panas. Tujuan khusus meliputi: 1) menentukan nilai kekasaran permukaan RAPP dengan penambahan TiO_2 konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5%; 2) menentukan nilai stabilitas warna RAPP dengan penambahan TiO_2 pada konsentrasi yang sama; 3) menganalisis pengaruh signifikansi penambahan TiO_2 terhadap kedua parameter tersebut; dan 4) menentukan konsentrasi optimal yang memberikan balance terbaik antara improvement sifat fisis dan maintenance estetika.

Manfaat teoritis penelitian ini adalah untuk menambah body of knowledge dalam bidang material kedokteran gigi, khususnya terkait aplikasi nanoteknologi untuk reinforcement resin dental. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang relationship antara konsentrasi nanoparticle, sifat fisis material, dan karakteristik estetik. Manfaat praktis meliputi providing scientific evidence untuk clinical decision making dalam pemilihan material basis gigi tiruan, serta memberikan guidance bagi clinicians dan dental technicians dalam

aplikasi nanoreinforced materials.

Implikasi penelitian ini dalam jangka panjang dapat berkontribusi pada pengembangan protokol standardized untuk inkorporasi nanoparticles dalam material dental, development of new commercial products dengan sifat yang superior, serta advancement dalam understanding fundamental mechanisms yang menggovern interaction antara nanoparticles dan polymer matrix. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi foundation untuk future research dalam areas terkait seperti antimicrobial properties, biocompatibility assessment, dan long-term clinical performance evaluation.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimental laboratoris dengan desain post only control group design. Desain ini dipilih untuk memberikan kontrol yang optimal terhadap variabel-variabel yang dapat mempengaruhi outcome penelitian dan memungkinkan analisis kausal yang valid antara variabel independen (penambahan titanium dioksida) dan variabel dependen (kekasaran permukaan dan stabilitas warna). Penelitian dilaksanakan pada periode Juni hingga September 2022 di fasilitas laboratorium yang telah dikalibrasi dan memenuhi standar untuk penelitian material dental.

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di beberapa lokasi yang berbeda sesuai dengan tahapan proses penelitian. Pembuatan sampel dilaksanakan di Unit Jasa Industri Dental Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Sumatera Utara yang memiliki fasilitas lengkap untuk fabrikasi material dental termasuk press hidrolis, waterbath, dan peralatan finishing. Pengujian kekasaran permukaan dilakukan di Laboratorium Penelitian Teknik Mesin Universitas Negeri Medan yang memiliki surface roughness tester dengan akurasi tinggi. Pengujian stabilitas warna dilaksanakan di Ruang Penelitian Departemen Prostodonsia Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Sumatera Utara menggunakan portable colorimeter yang telah dikalibrasi.

Populasi dan Sampel

Populasi target penelitian adalah semua basis gigi tiruan resin akrilik polimerisasi panas dengan berbagai komposisi bahan penguat. Populasi terjangkau adalah basis gigi tiruan RAPP yang dibuat dengan spesifikasi dan protokol standardized sesuai dengan design penelitian. Sampel penelitian terdiri dari spesimen RAPP yang dibagi menjadi empat kelompok perlakuan: kelompok kontrol tanpa penambahan titanium dioksida, dan tiga kelompok eksperimental dengan penambahan titanium dioksida konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5%.

Ukuran sampel ditentukan berdasarkan rumus Federer untuk experimental design: $(t-1)(r-1) \geq 15$, dimana t adalah jumlah treatment groups dan r adalah jumlah replikasi per group. Dengan 4 kelompok perlakuan, diperoleh: $(4-1)(r-1) \geq 15$, sehingga $3(r-1) \geq 15$, yang menghasilkan $r \geq 6$. Oleh karena itu, setiap kelompok terdiri dari 6 sampel, dengan total 24 sampel untuk pengujian kekasaran permukaan dan 24 sampel untuk pengujian stabilitas warna, making total 48 spesimen.

Dimensi sampel mengikuti spesifikasi American Dental Association (ADA) No. 12 tahun 1999. Untuk pengujian kekasaran permukaan, dimensi sampel adalah 65 mm × 10 mm × 2,5 mm, sedangkan untuk pengujian stabilitas warna adalah 35 mm × 15 mm × 0,5 mm. Dimensi ini dipilih untuk memastikan area pengukuran yang adequate dan representatif serta compatibility dengan equipment yang digunakan.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi meliputi: 1) sampel yang dibuat menggunakan resin akrilik polimerisasi panas QC 20 sesuai protokol standardized; 2) sampel dengan dimensi yang sesuai spesifikasi ADA; 3) sampel tanpa cacat visual seperti void, crack, atau irregularitas permukaan yang significant; 4) sampel yang telah menjalani conditioning period 48 jam pada suhu 37°C; dan 5) sampel dengan tingkat polimerisasi yang complete sesuai protokol curing.

Kriteria eksklusi meliputi: 1) sampel dengan cacat fabrication yang dapat mempengaruhi measurement accuracy; 2) sampel yang mengalami kontaminasi selama proses pembuatan; 3) sampel dengan incomplete polymerization yang terdeteksi melalui surface tackiness; 4) sampel yang mengalami kerusakan selama proses finishing dan polishing; dan 5) sampel dengan dimensional deviation yang melebihi toleransi yang acceptable.

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama yang digunakan adalah resin akrilik polimerisasi panas (QC 20, Inggris) yang terdiri dari komponen powder (polymer) dan liquid (monomer) dengan rasio 2:1. Titanium dioksida nanoparticles (Sigma Aldrich, Singapura) dengan ukuran rata-rata 21 nm dan fase kristal anatase digunakan sebagai reinforcing agent. Bahan pendukung meliputi gips keras tipe III untuk pembuatan mold, vaselin sebagai separating agent, cold mould seal, plastik cellophane, dan aquadest untuk conditioning sampel.

Peralatan utama yang digunakan meliputi: 1) model master dari logam dengan dimensi yang precise; 2) dental flask yang compatible dengan press hidrolik; 3) press hidrolik (OL 57 Manfredi, Italia) untuk kompresi dengan kapasitas tekanan hingga 2200 psi; 4) waterbath (Fili Manfredi, Italia) dengan temperature control yang accurate; 5) vibrator (Filli Manfredi Pulsar-2, Italia) untuk mixing dan bubble elimination; 6) timbangan analitik (Mettler Toledo AL-204, Indonesia) dengan precision 0,0001 gram; 7) rotary grinder untuk surface finishing dengan berbagai grit sandpaper; 8) surface roughness tester untuk measurement kekasaran permukaan; 9) portable colorimeter CS-10 untuk pengukuran stabilitas warna; dan 10) inkubator untuk conditioning sampel pada suhu controlled.

Prosedur Pembuatan Sampel

Proses pembuatan sampel dimulai dengan fabrikasi mold menggunakan teknik conventional flasking. Model master logam dengan dimensi yang precise ditempatkan dalam dental flask yang telah diaplikasi separating agent. Gips keras tipe III dicampur dengan water-to-powder ratio 90 ml : 300 gram untuk flask bagian bawah dan 60 ml : 200 gram untuk flask bagian atas. Mixing dilakukan menggunakan mechanical mixer dengan kecepatan standardized selama 15 detik untuk mencapai homogenitas yang optimal.

Setelah setting gips dan removal model master, mold cavity yang terbentuk dibersihkan dengan air panas untuk menghilangkan residual separating agent, kemudian dikeringkan dan diaplikasi cold mould seal. Conditioning mold dilakukan selama 20 menit untuk memastikan proper sealing dan dimensional stability.

Preparasi material resin akrilik dilakukan dengan protocol yang berbeda untuk setiap kelompok. Untuk kelompok kontrol, polymer dan monomer dicampur dengan rasio 2:1 menggunakan teknik conventional mixing. Untuk kelompok eksperimental, titanium dioksida nanoparticles terlebih dahulu dicampur dengan polymer menggunakan mortar dan pestle dengan grinding motion yang consistent selama 5 menit untuk memastikan homogenous distribution.

Perhitungan konsentrasi titanium dioksida berdasarkan total weight polymer dan monomer. Untuk konsentrasi 0,5%, weight titanium dioksida adalah 0,5% dari total weight mixture. Sebagai contoh, untuk sampel kekasaran permukaan dengan total weight 4,5 gram, titanium dioksida 0,5% = 0,0225 gram. Mixing sequence melibatkan: 1) mixing titanium dioksida dengan polymer hingga homogen; 2) gradual addition monomer sambil continuous mixing; 3) mixing hingga mencapai dough stage yang optimal untuk handling.

Flasking procedure mengikuti protocol standardized dengan initial compression pada 1000 psi, trial closure untuk excess material removal, dan final compression pada 2200 psi. Flask kemudian di-clamp dan dibiarkan selama 15 menit untuk stress relaxation sebelum curing process.

Proses Polimerisasi

Curing protocol mengikuti two-stage process yang recommended untuk heat-polymerized acrylic resin. Stage pertama dilakukan pada suhu 70°C selama 90 menit untuk gradual temperature rise dan initial polymerization. Stage kedua pada suhu 100°C selama 30 menit untuk completion polymerization dan optimization cross-linking density. Temperature control dilakukan menggunakan digital thermostat dengan accuracy $\pm 1^\circ\text{C}$.

Cooling process dilakukan secara gradual dalam waterbath selama 30 menit, diikuti dengan air cooling selama 15 menit untuk mencegah thermal shock yang dapat menyebabkan internal stress dan dimensional changes. Deflasking dilakukan setelah complete cooling untuk mencegah distortion.

Finishing dan Polishing

Trimming excess material dilakukan menggunakan rotary bur dengan low speed untuk mencegah heat generation yang excessive. Surface finishing menggunakan sequential wet grinding dengan waterproof sandpaper grades 240, 400, 600, 800, dan 1200 pada rotary grinder dengan speed 500 rpm. Setiap grade dilakukan selama 5 menit dengan continuous water irrigation untuk heat dissipation dan debris removal.

Polishing protocol standardized untuk memastikan consistent surface quality across semua sampel. Final surface inspection dilakukan secara visual dan tactile untuk memastikan absence defects yang dapat mempengaruhi measurement accuracy.

Conditioning Sampel

Semua sampel menjalani conditioning period dalam aquadest pada suhu 37°C selama 48 jam menggunakan inkubator dengan temperature control yang precise. Conditioning ini penting untuk: 1) completion residual polymerization; 2) removal residual monomer; 3) dimensional stabilization; 4) simulation intraoral environment; dan 5) standardization moisture content sebelum testing.

Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan surface roughness tester dengan stylus profilometry method. Measurement parameters meliputi cut-off length 0,8 mm, evaluation length 4,0 mm, dan stylus radius 2 μm sesuai dengan ISO 4287 standard. Setiap sampel diukur pada tiga lokasi yang berbeda secara random, dan nilai rata-rata digunakan untuk analisis.

Calibration equipment dilakukan sebelum setiap sesi pengukuran menggunakan reference standard yang certified. Sample positioning dilakukan dengan careful attention untuk memastikan measurement surface yang consistent dan representative. Parameter yang diukur adalah Ra (arithmetic average roughness) yang expressed dalam micrometer (μm).

Pengukuran Stabilitas Warna

Pengukuran stabilitas warna dilakukan menggunakan portable colorimeter CS-10 yang telah dikalibrasi dengan white standard reference. Measurement menggunakan CIELAB color space dengan parameter L^* (lightness), a^* (red-green axis), dan b^* (yellow-blue axis). Setiap sampel diukur pada tiga lokasi berbeda dan nilai rata-rata digunakan untuk calculation color difference (ΔE).

Formula untuk calculation ΔE adalah: $\Delta E = \sqrt{[(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2]}$

dimana subscript 0 menunjukkan control group dan subscript 1 menunjukkan treatment group. Measurement dilakukan dalam controlled lighting conditions untuk minimization external factors yang dapat mempengaruhi color perception.

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan Statistical Package for Social Sciences (SPSS) version 25.0. Descriptive analysis meliputi calculation mean, standard deviation, minimum, dan maximum values untuk setiap kelompok. Normality testing dilakukan menggunakan Shapiro-Wilk test karena sample size < 50 . Homogeneity of variance dievaluasi menggunakan Levene's test.

Comparative analysis menggunakan independent samples t-test untuk comparison antara control group dan masing-masing treatment group. Level significance ditetapkan pada $\alpha = 0,05$. Effect size calculation dilakukan untuk determination practical significance di samping statistical significance.

Assumption checking meliputi: 1) normality distribution data; 2) homogeneity variance; 3) independence observations; dan 4) interval level measurement. Jika assumptions tidak terpenuhi, alternative non-parametric tests akan digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sampel Penelitian

Proses fabrikasi sampel berhasil menghasilkan 48 spesimen basis gigi tiruan resin akrilik polimerisasi panas sesuai dengan design penelitian tanpa adanya defects major yang dapat mempengaruhi validitas pengukuran. Visual inspection menunjukkan bahwa semua sampel memiliki surface quality yang consistent dengan absence void, crack, atau irregularities yang significant. Dimensional verification mengkonfirmasi bahwa semua spesimen memenuhi toleransi dimensional yang ditetapkan berdasarkan spesifikasi ADA.

Proses pencampuran titanium dioksida dengan polymer matrix menggunakan mortar dan pestle menghasilkan distribusi yang relatif homogen, meskipun complete uniformity sulit dicapai dengan metode manual mixing. Observation selama mixing menunjukkan bahwa konsentrasi yang lebih tinggi memerlukan grinding time yang lebih lama untuk achieve acceptable homogeneity. Color changes yang visible terdeteksi bahkan pada konsentrasi terendah (0,5%), mengindikasikan successful incorporation titanium dioksida ke dalam polymer matrix.

Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan surface roughness tester menghasilkan data yang menunjukkan pola consistent penurunan nilai kekasaran seiring dengan peningkatan konsentrasi titanium dioksida. Kelompok kontrol tanpa penambahan titanium dioksida menunjukkan nilai kekasaran permukaan berkisar antara $0,186 \mu\text{m}$ hingga $0,198 \mu\text{m}$ dengan mean $0,192 \pm 0,004 \mu\text{m}$. Range nilai yang relatif narrow mengindikasikan consistency dalam proses fabrication dan finishing protocol yang standardized.

Kelompok dengan penambahan titanium dioksida 0,5% menunjukkan penurunan kekasaran permukaan dengan nilai berkisar antara 0,184 μm hingga 0,189 μm dan mean $0,187 \pm 0,001 \mu\text{m}$. Penurunan ini menunjukkan tren yang consistent dengan hypothesis bahwa nanoparticles dapat mengisi microvoids dalam polymer matrix, resulting in smoother surface topography.

Kelompok dengan konsentrasi titanium dioksida 1% menunjukkan penurunan yang lebih substantial dengan nilai berkisar antara 0,146 μm hingga 0,162 μm dan mean $0,156 \pm 0,006 \mu\text{m}$. Standard deviation yang slightly higher pada kelompok ini mengindikasikan variability yang lebih besar dalam distribution nanoparticles, kemungkinan disebabkan oleh increased difficulty dalam achieving perfect homogeneity pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Kelompok dengan konsentrasi titanium dioksida 1,5% menunjukkan penurunan kekasaran permukaan yang paling significant dengan nilai berkisar antara 0,117 μm hingga 0,122 μm dan mean $0,119 \pm 0,002 \mu\text{m}$. Narrow range dan low standard deviation pada kelompok ini menunjukkan consistency yang excellent dalam surface properties, kemungkinan karena sufficient nanoparticle concentration untuk effective filling microvoids tanpa causing excessive agglomeration.

Tabel 1. Nilai Kekasaran Permukaan Basis Gigi Tiruan RAPP dengan Penambahan Titanium Dioksida

Sampel	Kontrol (μm)	TiO ₂ 0,5% (μm)	TiO ₂ 1% (μm)	TiO ₂ 1,5% (μm)
1	0,189	0,189	0,158	0,117
2	0,191	0,186	0,162	0,118
3	0,189	0,187	0,158	0,118
4	0,198	0,184	0,160	0,120
5	0,186	0,188	0,154	0,119
6	0,196	0,189	0,146	0,122
Rerata $\pm$ SD	$0,192 \pm 0,004$	$0,187 \pm 0,001$	$0,156 \pm 0,006$	$0,119 \pm 0,002$

Variability dalam values kekasaran permukaan antar sampel dalam group yang sama dapat diatribusikan kepada several factors. Distribution nanoparticles yang tidak perfectly uniform selama mixing process dapat menyebabkan localized variations dalam surface properties. Additionally, potential loss material selama compression molding dan variations dalam finishing pressure dapat berkontribusi terhadap variability. Manual mixing menggunakan mortar dan pestle, meskipun dilakukan dengan protocol yang consistent, inherently memiliki limitations dalam achieving complete homogeneity dibandingkan dengan advanced mixing techniques seperti high-energy ball milling.

Semua nilai kekasaran permukaan yang obtained dalam penelitian ini berada well within clinical acceptable limit yang ditetapkan oleh Bollen dkk (1997) yaitu $\leq 0,2 \mu\text{m}$. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan titanium dioksida pada konsentrasi yang studied tidak menimbulkan adverse effects terhadap surface smoothness, malahan memberikan improvement yang beneficial. Clinical implication dari finding ini adalah reduced risk bacterial adhesion dan plaque accumulation, yang dapat berkontribusi terhadap better oral health outcomes untuk denture wearers.

Hasil Pengukuran Stabilitas Warna

Pengukuran stabilitas warna menggunakan CIELAB color space menunjukkan pattern yang distinctly different dibandingkan dengan kekasaran permukaan. Control group secara definition memiliki $\Delta E = 0$ karena serves sebagai reference untuk color comparison. Incorporation titanium dioksida pada semua konsentrasi yang studied menyebabkan measurable color changes

yang significant secara statistical.

Kelompok dengan penambahan titanium dioksida 0,5% menunjukkan color change dengan ΔE values berkisar antara 27,27 hingga 27,98 dan mean $27,71 \pm 0,25$. Magnitude perubahan warna ini substantially melebihi clinical acceptability threshold ($\Delta E \leq 3,7$), mengindikasikan bahwa bahkan konsentrasi terendah yang studied menghasilkan visually perceptible color change.

Kelompok dengan konsentrasi titanium dioksida 1% menunjukkan further increase dalam color change dengan ΔE values berkisar antara 30,50 hingga 31,30 dan mean $30,98 \pm 0,30$. Progressive increase ini consistent dengan expectation bahwa higher concentration nanoparticles akan menghasilkan more pronounced optical effects.

Kelompok dengan konsentrasi titanium dioksida 1,5% menunjukkan highest color change dengan ΔE values berkisar antara 35,24 hingga 35,56 dan mean $35,41 \pm 0,11$. Remarkably low standard deviation pada kelompok ini mengindikasikan very consistent color change across sampel, suggesting uniform distribution nanoparticles pada konsentrasi ini.

Tabel 2. Nilai Stabilitas Warna Basis Gigi Tiruan RAPP dengan Penambahan Titanium Dioksida

Sampel	Kontrol (ΔE)	TiO ₂ 0,5% (ΔE)	TiO ₂ 1% (ΔE)	TiO ₂ 1,5% (ΔE)
1	0	27,27	31,30	35,40
2	0	27,72	30,84	35,24
3	0	27,98	30,50	35,34
4	0	27,87	31,01	35,47
5	0	27,61	30,97	35,47
6	0	27,81	31,28	35,56
Rerata $\pm$ SD	0 $\pm$ 0	27,71 $\pm$ 0,25	30,98 $\pm$ 0,30	35,41 $\pm$ 0,11

Color changes yang observed dapat diatribusikan kepada intrinsic white color titanium dioksida nanoparticles dan their high refractive index. Ketika incorporated ke dalam polymer matrix, TiO₂ particles act sebagai scattering centers untuk incident light, menghasilkan increased opacity dan whiteness. Progressive increase ΔE values dengan increasing concentration menunjukkan dose-response relationship yang predictable.

Optical mechanisms yang underlying color changes melibatkan several phenomena. Titanium dioksida memiliki refractive index yang significantly higher ($n \approx 2,5-2,7$) dibandingkan dengan acrylic resin matrix ($n \approx 1,49$), creating refractive index mismatch yang promotes light scattering. Additionally, crystalline structure TiO₂ dan particle size distribution dapat mempengaruhi optical properties melalui Mie scattering effects.

Analisis Statistik Kekasaran Permukaan

Prerequisite testing untuk statistical analysis menunjukkan bahwa semua groups memenuhi assumptions untuk parametric testing. Shapiro-Wilk normality tests menghasilkan p-values $> 0,05$ untuk semua groups (control: $p = 0,06$; 0,5%: $p = 0,80$; 1%: $p = 0,26$; 1,5%: $p = 0,61$), confirming normal distribution data. Levene's test untuk homogeneity variance menghasilkan $p = 0,15$ ($p > 0,05$), confirming equal variances across groups.

Independent samples t-tests between control group dan each treatment group menghasilkan statistically significant differences. Comparison antara control dan 0,5% TiO₂ group menghasilkan $p = 0,014$ ($p < 0,05$), mengindikasikan significant reduction dalam surface roughness bahkan pada konsentrasi terendah. Comparison antara control dan 1% TiO₂ group menghasilkan $p = 0,0001$ ($p < 0,05$), showing highly significant reduction. Similarly, comparison antara control dan 1,5% TiO₂ group menghasilkan $p = 0,0001$ ($p < 0,05$).

Effect size calculations menggunakan Cohen's d menunjukkan large effect sizes untuk

semua comparisons ($d > 0,8$), mengindikasikan bahwa statistical significance disertai dengan practical significance. Magnitude effect yang observed menunjukkan bahwa penambahan titanium dioksida menghasilkan meaningful improvements dalam surface smoothness yang likely to have clinical relevance.

Analisis Statistik Stabilitas Warna

Statistical analysis untuk color stability data menunjukkan pattern yang similar dalam terms normality dan homogeneity. Shapiro-Wilk tests untuk treatment groups menghasilkan p-values $> 0,05$ (0,5%: $p = 0,54$; 1%: $p = 0,57$; 1,5%: $p = 0,90$), confirming normal distributions. Levene's test menghasilkan $p = 0,05$ ($p > 0,05$), indicating borderline but acceptable homogeneity variance.

Independent samples t-tests between control group dan all treatment groups menghasilkan $p = 0,0001$ ($p < 0,05$) untuk semua comparisons, indicating highly significant color changes untuk semua konsentrasi titanium dioksida yang studied. Magnitude significance yang uniform across concentrations menunjukkan bahwa bahkan lowest concentration menghasilkan dramatic color change yang easily detectable secara visual.

Effect size calculations menunjukkan extremely large effects ($d \gg 2,0$) untuk semua comparisons, reflecting substantial practical significance changes. Clinical interpretation adalah bahwa color changes yang observed akan readily apparent kepada patients dan clinicians, potentially affecting aesthetic acceptability denture prostheses.

Pembahasan Kekasaran Permukaan

Reduction dalam surface roughness dengan increasing titanium dioksida concentration dapat dijelaskan melalui several mechanisms yang beroperasi pada nanoscale level. Primary mechanism melibatkan filling microvoids dan irregularities dalam polymer matrix oleh TiO_2 nanoparticles. Acrylic resin inherently contains micropores dan surface irregularities yang arise dari polymerization shrinkage, incomplete monomer conversion, dan thermal effects selama curing process.

Nanoparticles dengan ukuran 21 nm memiliki capability untuk penetrate dan fill microscopic spaces yang tidak accessible oleh larger filler particles. High surface area-to-volume ratio nanoparticles memungkinkan extensive interfacial contact dengan polymer chains, potentially improving integration dengan matrix dan reducing void spaces. Additionally, presence nanoparticles dapat modify local polymer chain arrangement, potentially leading kepada more uniform crosslinking density dan reduced surface heterogeneity.

Concentration-dependent effects yang observed ($0,5\% < 1\% < 1,5\%$ dalam terms roughness reduction) menunjukkan bahwa increasing nanoparticle loading provides more effective void filling hingga optimal concentration. Absence plateauing effect dalam concentration range yang studied menunjukkan bahwa system belum mencapai saturation point dimana additional nanoparticles tidak longer provide incremental benefits.

Comparison dengan literature menunjukkan mixed findings tergantung pada concentration ranges yang studied. Al-Harbi (2019) melaporkan surface roughness reduction dengan nanoparticle addition pada low concentrations, consistent dengan findings ini. Sebaliknya, Alnamel H dan Chowdury (2021) melaporkan roughness increases dengan TiO_2 addition pada higher concentrations (2-7%). Discrepancy ini dapat diatribusikan kepada threshold effects dimana low concentrations provide beneficial filling effects sementara high concentrations dapat menyebabkan particle agglomeration dan surface protrusion yang increase roughness.

Clinical implications positive surface roughness reduction meliputi several benefits. Reduced bacterial adhesion capabilities karena decreased surface area available untuk biofilm formation, easier cleaning dan maintenance dentures karena smoother surfaces less prone kepada stain retention, improved patient comfort karena reduced tongue irritation dari rough surfaces, dan potentially enhanced aesthetic properties karena smoother surfaces provide better light reflection characteristics.

Mechanistic insights mengenai nanoparticle-polymer interactions menunjukkan bahwa optimal benefits achieved ketika nanoparticles well-dispersed dan integrated dengan matrix tanpa forming large agglomerates. Quality dispersion bergantung pada mixing methodology, particle surface chemistry, dan compatibility dengan polymer system. Limitations manual mixing menggunakan mortar dan pestle dalam achieving perfect dispersion dapat partially explain variability yang observed dalam measurements.

Pembahasan Stabilitas Warna

Dramatic color changes yang observed dengan titanium dioksida addition represent significant concern untuk clinical applications dimana aesthetics paramount. Magnitude changes ($\Delta E > 25$) substantially exceed not only clinical acceptability thresholds tetapi juga perceptibility thresholds untuk average observers. Clinical literature mengindikasikan bahwa ΔE values $> 3,7$ readily perceptible dan generally considered unacceptable untuk dental restorations yang require color matching dengan natural tissues.

Underlying mechanisms untuk color changes melibatkan complex interactions antara nanoparticles dan incident light. Titanium dioksida inherently white karena wide bandgap ($\approx 3,2$ eV untuk anatase) yang prevents absorption visible light photons. Ketika incorporated ke dalam polymer matrix, TiO_2 particles act sebagai highly efficient scattering centers karena refractive index mismatch dengan surrounding polymer.

Rayleigh dan Mie scattering effects contribute kepada overall optical behavior system. Particle size (21 nm) berada dalam regime dimana both scattering mechanisms operative, dengan Rayleigh scattering dominan untuk shorter wavelengths dan Mie scattering untuk longer wavelengths. Resultant effect adalah broadband scattering yang shifts color perception toward white/opaque appearance.

Dose-response relationship yang observed (increasing ΔE dengan increasing concentration) consistent dengan optical theory yang predicts increased scattering dengan higher particle density. Linear relationship suggests absence saturation effects dalam concentration range studied, mengindikasikan bahwa further increases concentration akan continue menghasilkan more pronounced color changes.

Comparison dengan literature menunjukkan variability dalam color change magnitude tergantung pada several factors. Aziz (2018) melaporkan modest color changes yang remained within clinical acceptable limits dengan TiO_2 addition, contrasting dengan findings extreme changes ini. Factors yang dapat explain discrepancies meliputi differences dalam particle size, crystalline phase, dispersion quality, polymer composition, dan measurement methodologies.

Clinical implications severe color changes menunjukkan fundamental trade-off antara improved physical properties dan aesthetic acceptability. While surface roughness improvements clearly beneficial, color changes magnitude yang observed would likely unacceptable untuk most clinical applications, particularly untuk anterior regions dimana aesthetics critical.

Potential strategies untuk mitigating color changes while retaining benefits meliputi several approaches. Lower concentrations ($< 0,5\%$) dapat explore untuk identifying threshold dimana

benefits retained dengan minimal color impact. Alternative nanoparticle modifications seperti surface treatments atau core-shell architectures dapat potentially reduce optical effects. Additionally, combination approaches menggunakan multiple nanoparticle types atau hybrid reinforcement strategies dapat provide pathways untuk optimizing property balance.

Limitasi dan Implikasi Klinis

Several limitations dalam penelitian ini perlu diacknowledge. Manual mixing methodology using mortar dan pestle, while standardized, inherently less precise dibandingkan dengan advanced techniques seperti high-energy ball milling atau ultrasonic dispersion. Perfect homogeneity nanoparticle distribution sulit achieved dengan manual methods, potentially contributing kepada variability dalam measurements dan suboptimal property development.

Sample size, while statistically adequate berdasarkan power calculations, relatively small untuk detecting subtle effects atau establishing robust concentration-response relationships. Larger studies dengan broader concentration ranges akan provide more comprehensive understanding optimal formulations.

Evaluation parameters limited kepada surface roughness dan color stability, sementara other critical properties seperti mechanical strength, biocompatibility, water sorption, dan long-term stability tidak assessed. Comprehensive characterization akan necessary untuk complete understanding clinical potential nanoreinforced materials.

Clinical implications penelitian ini complex dan require careful consideration multiple factors. Surface roughness improvements clearly beneficial dan dapat translate kepada improved oral health outcomes untuk denture wearers. However, severe color changes represent major barrier kepada clinical acceptance, particularly untuk applications dimana aesthetics important.

Cost-benefit analysis perlu consider trade-offs antara improved performance dan aesthetic compromises. Untuk certain clinical situations dimana durability dan cleanability prioritized over aesthetics (seperti posterior regions atau patients dengan special needs), nanoreinforced materials dapat provide valuable benefits despite color changes.

Future research directions include exploration lower concentrations untuk identifying optimal balance points, development alternative nanoparticle systems dengan reduced optical effects, investigation surface modification techniques untuk nanoparticles, evaluation long-term clinical performance melalui in-vivo studies, dan development standardized protocols untuk nanoparticle incorporation dalam dental materials.

Implikasi untuk Pengembangan Material

Research findings ini provide important insights untuk future development nanoreinforced dental materials. Concentration-dependent effects pada both surface roughness dan color stability menunjukkan necessity untuk careful optimization formulations. Ideal concentration ranges likely exist dimana beneficial effects maximized sementara adverse effects minimized.

Development advanced dispersion techniques essential untuk realizing full potential nanoparticle reinforcement. High-energy ball milling, ultrasonic processing, dan chemical surface modifications represent promising approaches untuk achieving superior dispersion quality dan potentially enabling use higher concentrations tanpa adverse effects.

Alternative nanoparticle systems deserve investigation. Particles dengan refractive indices closer kepada polymer matrix dapat provide mechanical benefits dengan reduced optical effects. Transparent metal oxides atau carefully engineered core-shell particles represent potential solutions.

Multifunctional approaches yang combine mechanical reinforcement dengan other benefits

(antimicrobial properties, self-healing capabilities, atau enhanced biocompatibility) dapat provide compelling value propositions yang justify aesthetic compromises dalam certain applications.

Standardization characterization methods dan clinical evaluation protocols essential untuk advancing field. Development standardized testing procedures akan *enable better comparison research findings* dan *facilitate translation research* kepada *clinical practice*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penambahan titanium dioksida pada basis gigi tiruan resin akrilik polimerisasi panas memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan dan stabilitas warna dengan pola yang kontras. Penambahan titanium dioksida dengan konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5% secara konsisten dan signifikan menurunkan kekasaran permukaan dari nilai kontrol $0,192 \pm 0,004 \mu\text{m}$ menjadi $0,187 \pm 0,001 \mu\text{m}$, $0,156 \pm 0,006 \mu\text{m}$, dan $0,119 \pm 0,002 \mu\text{m}$ secara berturut-turut, dengan semua nilai masih berada dalam batas klinis yang dapat diterima ($\leq 0,2 \mu\text{m}$). Penurunan kekasaran permukaan ini mengindikasikan potensi klinis yang positif untuk mengurangi adhesi bakteri dan meningkatkan kemudahan pembersihan gigi tiruan. Sebaliknya, stabilitas warna mengalami perubahan yang sangat signifikan dengan nilai ΔE meningkat dari 0 ± 0 (kontrol) menjadi $27,71 \pm 0,25$, $30,98 \pm 0,30$, dan $35,41 \pm 0,11$ untuk konsentrasi 0,5%, 1%, dan 1,5% secara berturut-turut, dimana semua nilai melebihi jauh batas klinis yang dapat diterima ($\Delta E \leq 3,7$). Perubahan warna yang dramatic ini menimbulkan kekhawatiran estetik yang serius untuk aplikasi klinis. Terdapat trade-off yang jelas antara peningkatan sifat fisis berupa penurunan kekasaran permukaan dan penurunan kualitas estetik akibat perubahan warna yang substansial. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi konsentrasi yang lebih rendah ($< 0,5\%$) untuk menemukan titik optimal antara manfaat sifat fisis dan pemeliharaan estetik, menggunakan teknik pencampuran yang lebih advanced seperti high-energy ball milling untuk distribusi partikel yang lebih homogen, serta mengevaluasi sifat mekanis, biokompatibilitas, dan performa klinis jangka panjang untuk pemahaman komprehensif tentang potensi aplikasi titanium dioksida sebagai bahan penguat dalam material kedokteran gigi.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Harbi, F. A., Abdel-Halim, M. S., Gad, M. M., Fouda, S. M., Baba, N. Z., AlRumaih, H. S., & Arsenault, P. (2019). Effect of nanodiamond addition on flexural strength, impact strength, and surface roughness of PMMA denture base. *Journal of Prosthodontics*, 28(4), 417–425. <https://doi.org/10.1111/jopr.12910>
- Alnamel, H., & Mudhaffer, M. (2014). The effect of silicon dioxide nano-fillers reinforcement on some properties of heat cure polymethyl methacrylate denture base material. *Journal of Baghdad College of Dentistry*, 26(1), 32–36.
- Alwan, S., & Alameer, S. (2015). The effect of the addition of silanized nano titania fillers on some physical and mechanical properties of heat cured acrylic denture base materials. *Journal of Baghdad College of Dentistry*, 27(1), 86–91.
- Anusavice, K. J., Shen, C., & Rawls, H. R. (2012). *Phillips' science of dental materials* (12th ed.). Elsevier Health Sciences.
- Aziz, H. K. (2018). TiO₂-nanofillers effects on some properties of highly-impact resin using different processing techniques. *The Open Dentistry Journal*, 12(1), 202–212. <https://doi.org/10.2174/1874210601812010202>
- Bollen, C. M. L., Lambrechts, P., & Quirynen, M. (1997). Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: A review of the literature. *Dental Materials*, 13(4), 258–269. [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(97\)80038-0](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(97)80038-0)

- Carlsson, G. E., & Omar, R. (2010). The future of complete dentures in oral rehabilitation. A critical review. *Journal of Oral Rehabilitation*, 37(2), 143–156. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2009.02039.x>
- Chowdury, A., Singh, S. V., Konakanchi, A., Kiran, R., Raghunathan, Y., & Dhakshaini, M. R. (2021). Effect of addition of titanium oxide and zirconium oxide nanoparticles on the surface roughness of heat cured denture base resins: An in-vitro study. *SVOA Materials Science and Technology*, 3(4), 1–8. <https://doi.org/10.52267/SVOA-MST.2021.3401>
- Emami, E., de Souza, R. F., Kabawat, M., & Feine, J. S. (2013). The impact of edentulism on oral and general health. *International Journal of Dentistry*, 2013, 498305. <https://doi.org/10.1155/2013/498305>
- Fathey, A., Abd El-Kawi, M., & Fattouh, D. (2018). Effect of nanoparticles incorporated to denture base on some physicommechanical properties. *AADJ*, 1(1), 65–77.
- Gerritsen, A. E., Allen, P. F., Witter, D. J., Bronkhorst, E. M., & Creugers, N. H. (2010). Tooth loss and oral health-related quality of life: A systematic review and meta-analysis. *Health and Quality of Life Outcomes*, 8(1), 126. <https://doi.org/10.1186/1477-7525-8-126>
- Goiato, M. C., Dos Santos, D. M., Haddad, M. F., & Pesqueira, A. A. (2012). Effect of disinfection and accelerated aging on the dimensional stability of complete denture bases. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 36(2), 80–84. <https://doi.org/10.3109/03091902.2011.633712>
- Kassebaum, N. J., Bernabé, E., Dahiya, M., Bhandari, B., Murray, C. J. L., & Marcenes, W. (2014). Global burden of severe tooth loss: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dental Research*, 93(7 suppl), 20S–28S. <https://doi.org/10.1177/0022034514537828>
- Martina, M., Saing, B., & Kustiyah, E. (2024). Uji stabilitas penyimpanan RC A amlodipine dengan metode kromatografi cair tingkat tinggi. *Journal of Waste and Sustainable Consumption*, 1(2), 54–63. <https://doi.org/10.61511/jwsc.v1i2.2024.1185>
- Petersen, P. E., & Yamamoto, T. (2005). Improving the oral health of older people: The approach of the WHO Global Oral Health Programme. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 33(2), 81–92. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.2004.00219.x>
- Polyzois, G. L., Lagouvardos, P. E., & Papazoglou, E. (2011). Effects of different storage conditions on the dimensional accuracy of complete denture bases. *Journal of Prosthodontics*, 20(8), 613–617. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2011.00776.x>
- Sahin, Z., & Ergun, G. (2017). The assessment of some physical and mechanical properties of PMMA added different forms of nano-ZrO₂. *Journal of Dentistry and Oral Health*, 3(2), 1–10.
- Slade, G. D., & Spencer, A. J. (1994). Development and evaluation of the Oral Health Impact Profile. *Community Dental Health*, 11(1), 3–11. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8193981/>
- Zarb, G. A., Hobkirk, J., Eckert, S. E., & Jacob, R. (2013). *Prosthodontic treatment for edentulous patients: Complete dentures and implant-supported prostheses* (13th ed.). Elsevier Health Sciences.