

Optimalisasi Komposisi Bioplastik Pati Kentang dengan ZnO dan Gliserol untuk Meningkatkan Kekuatan Tarik pada Aplikasi Kedokteran Gigi Ramah Lingkungan

Taufiqurrahman Zulkifli^{*1}, Zulkifli Djafar², Yunita Feby Ramadhany³

^{1,2}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, Indonesia

³Program Magister Ilmu Kedokteran Gigi, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

Email: ¹taufiqurrahmanz@unhas.ac.id, ²zulkiflidjafar3065@gmail.com, ³punicagranatum96@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan komposisi bioplastik berbasis pati kentang dengan variasi penambahan zinc oxide (ZnO) dan gliserol untuk memperoleh karakteristik mekanik terbaik sebagai material alternatif ramah lingkungan bagi aplikasi kedokteran gigi. Enam formula bioplastik diuji menggunakan standar ASTM D882 dan dibandingkan dengan resin akrilik TMMA sebagai kontrol. Hasil pengujian menunjukkan bahwa formula 58 (2 g ZnO dan 2,5 g gliserol) memiliki performa terbaik dengan kekuatan tarik 0,96 MPa dan regangan terbesar, meskipun nilai modulus Young relatif rendah (75,63 MPa). Sementara itu, formula 59 menunjukkan modulus tertinggi (2064,84 MPa), menandakan karakteristik yang lebih kaku. Jika dibandingkan secara proporsional, bioplastik formula 58 memiliki nilai kekuatan tarik relatif lebih tinggi daripada resin TMMA (0,29 MPa) dalam skala uji laboratorium. Namun, nilai ini masih jauh di bawah rentang standar material PMMA (40–80 MPa, ISO 20795-1) sehingga tidak dapat disetarakan secara absolut. Oleh karena itu, perbandingan hanya bersifat indikatif untuk menunjukkan potensi peningkatan relatif dari komposisi bioplastik. Temuan ini menegaskan bahwa pati kentang berpotensi dikembangkan sebagai material bioplastik berkelanjutan dengan performa mekanik yang dapat direkayasa melalui pengaturan komposisi, meskipun masih diperlukan penelitian lanjutan untuk verifikasi biokompatibilitas, penyesuaian standar ISO, dan peningkatan kekuatan absolut sebelum aplikasi klinis.

Kata kunci: Bioplastik, Gliserol, ISO 20795-1, Kekuatan Tarik, Pati Kentang, ZnO

Optimization of Potato Starch Bioplastic Composition with ZnO and Glycerol to Enhance Tensile Strength for Environmentally Friendly Dental Applications

Abstract

This study aims to optimize the composition of potato starch-based bioplastics with varying zinc oxide (ZnO) and glycerol contents to obtain the best mechanical characteristics as an environmentally friendly alternative for dental applications. Six formulations were tested according to ASTM D882 standards and compared with TMMA acrylic resin as a control. The results showed that formulation 58 (2 g ZnO and 2.5 g glycerol) achieved the best performance with a tensile strength of 0.96 MPa and the highest strain, though it exhibited a relatively low Young's modulus (75.63 MPa). In contrast, formulation 59 recorded the highest modulus (2064.84 MPa), indicating greater rigidity. When compared proportionally, formulation 58 demonstrated higher relative tensile performance than TMMA resin (0.29 MPa) under laboratory-scale testing. However, this remains far below the PMMA denture base standard (40–80 MPa, ISO 20795-1), and thus should not be interpreted as an equivalent comparison. A disclaimer on mechanical limitations is included to prevent misleading interpretation. These findings confirm that potato starch has strong potential as a sustainable bioplastic material, although further research is required to assess biocompatibility, ISO compliance, and absolute mechanical enhancement before clinical application.

Keywords: Bioplastic, Glycerol, ISO 20795-1, Potato Starch, Tensile Strength, ZnO

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi kedokteran gigi semakin menuntut inovasi material yang tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu permasalahan utama di bidang ini adalah penggunaan material protesa gigi yang masih didominasi oleh bahan plastik sintetis, seperti resin akrilik polimetil metakrilat (PMMA). Meskipun resin akrilik memiliki sifat mekanik yang baik, material ini sulit terurai secara hayati dan berpotensi mencemari lingkungan. Ketergantungan terhadap bahan impor juga masih tinggi di Indonesia, sehingga mendorong perlunya pengembangan material alternatif berbasis sumber daya lokal [1], [2].

Seiring meningkatnya kesadaran terhadap isu keberlanjutan, penelitian mengenai material ramah lingkungan yang dapat menggantikan plastik konvensional semakin berkembang. Salah satu kandidat yang menjanjikan adalah bioplastik berbasis pati, karena bersifat biodegradable, mudah diperoleh, dan dapat dimodifikasi untuk mencapai karakteristik mekanik yang diinginkan. Pati merupakan cadangan karbohidrat alami yang terdapat pada berbagai tanaman, terutama umbi dan biji-bijian. Melalui proses gelatinisasi, pati dapat membentuk matriks polimer yang menghasilkan film bioplastik dengan kekakuan dan kekuatan tarik yang cukup baik untuk berbagai aplikasi, termasuk bidang kedokteran gigi [3].

Kentang (*Solanum tuberosum*) merupakan salah satu sumber pati lokal yang melimpah di Indonesia dan memiliki rasio amilosa–amilpektin yang ideal untuk pembuatan bioplastik. Rasio kedua komponen tersebut berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik bioplastik, terutama terhadap kekuatan tarik, elastisitas, dan stabilitas termal [4]. Oleh karena itu, optimalisasi komposisi pati kentang menjadi langkah penting untuk menghasilkan bioplastik dengan performa mekanik yang dapat direkayasa melalui pengaturan komposisi terhadap plastik sintetis, sekaligus mendukung kemandirian bahan lokal.

Selain kandungan pati, penambahan plasticizer seperti gliserol dan filler anorganik seperti *zinc oxide* (ZnO) berperan penting dalam menentukan sifat mekanik bioplastik. Gliserol dapat meningkatkan fleksibilitas dengan mengurangi ikatan hidrogen antarrantai polimer, namun penggunaan berlebih dapat menurunkan kekuatan tarik [5]. Di sisi lain, ZnO berfungsi sebagai penguat (*reinforcing agent*) yang dapat meningkatkan modulus elastisitas, kestabilan termal, serta memberikan efek antibakteri [6]. Kombinasi keduanya diharapkan menghasilkan bioplastik yang seimbang antara fleksibilitas dan kekuatan, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi medis seperti basis gigi tiruan.

1.2. Persyaratan Mekanik Material Basis Gigi Tiruan

Dalam konteks kedokteran gigi, material basis gigi tiruan harus memenuhi standar ISO 20795-1:2013, yang mensyaratkan kekuatan tarik minimum sekitar 65 MPa dan modulus elastisitas 2.000–3.000 MPa untuk menjamin daya tahan terhadap tekanan selama fungsi mastikasi. Secara fisiologis, gaya mastikasi manusia berkisar antara 50 hingga 150 N, tergantung posisi gigi, kebiasaan mengunyah, serta kondisi prosthesis.^{6,7} Oleh karena itu, meskipun nilai kekuatan tarik bioplastik pati kentang masih jauh di bawah standar ISO tersebut, penelitian ini penting sebagai tahap awal pengembangan untuk memahami potensi peningkatan mekanik melalui optimasi komposisi ZnO dan gliserol.

1.3. Tinjauan Penelitian Terdahulu dan Relevansi Lokal

Beberapa penelitian telah mengamati potensi bioplastik untuk aplikasi biomedis. Tareq et al. (2022) meneliti bioplastik berbasis pati jagung untuk alat medis⁶, sedangkan Negrete-Bolagay dan Guerrero (2024) menekankan pentingnya biokompatibilitas dan ketahanan terhadap lingkungan biologis.⁷ Namun, kajian mengenai bioplastik pati kentang dengan kombinasi ZnO dan gliserol untuk aplikasi protesa gigi masih terbatas. Penelitian lokal di Indonesia menunjukkan bahwa variasi *plasticizer* dan suhu *curing* dapat memengaruhi kekuatan tarik bioplastik, tetapi belum dikaitkan dengan kebutuhan mekanik prostetik gigi. Hal ini menegaskan adanya **celah penelitian** (*research gap*) yang perlu diisi melalui pengujian dan optimasi lebih lanjut.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan komposisi bioplastik pati kentang melalui variasi ZnO dan gliserol guna memperoleh kekuatan tarik terbaik yang mendekati standar mekanik material basis gigi tiruan. Penelitian ini diharapkan berkontribusi terhadap pengembangan biomaterial ramah lingkungan berbasis sumber daya lokal yang berpotensi diaplikasikan dalam bidang kedokteran gigi, sejalan dengan prinsip keberlanjutan dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan impor.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Terpakai, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Gowa, serta di Laboratorium Metalurgi Politeknik ATI Makassar. Penelitian berlangsung selama bulan Mei hingga September 2025 dan meliputi tahap persiapan bahan, pembuatan spesimen, pengujian mekanik, serta analisis statistik.

2.1. Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pati kentang sebagai bahan dasar bioplastik, zinc oxide (ZnO) sebagai *filler* penguat, dan gliserol sebagai *plasticizer*. Air suling (aquadest) digunakan sebagai pelarut, sementara resin akrilik TMMA digunakan sebagai pembanding (*control material*). Peralatan yang digunakan meliputi: *Universal Testing Machine* (UTM) untuk pengujian tarik, oven pemanas untuk proses pengeringan, hot plate, blender, saringan, timbangan digital, cetakan film bioplastik, serta coating CMS untuk pelapisan cetakan. Untuk karakterisasi ZnO, dilakukan pengamatan morfologi dan ukuran partikel menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) di Laboratorium Material Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Pengukuran ini bertujuan untuk memverifikasi ukuran dan dispersi partikel ZnO dalam matriks pati.

2.2. Prosedur Ekstraksi Pati Kentang

Ekstraksi pati dilakukan secara manual. Kentang dicuci bersih, dikupas, kemudian diparut. Hasil parutan diperas dan disaring untuk memisahkan serat dari cairan. Filtrat yang diperoleh didiamkan selama ± 8 jam hingga terbentuk endapan pati. Endapan kemudian dikeringkan pada suhu 60°C selama 6 jam dan dihaluskan hingga menjadi serbuk halus. Pati kering inilah yang digunakan sebagai bahan dasar bioplastik. Metode manual ini dipilih karena dapat mempertahankan sifat alami pati, sesuai pendekatan *green material processing*.

2.3. Pembuatan Pati Kentang

Formulasi bioplastik dilakukan dengan variasi komposisi ZnO (2 g, 5 g, 8 g) dan gliserol (1,5 g, 2 g, 2,5 g), sedangkan bahan tetap adalah 10 g pati kentang dan 85 mL aquadest. Kombinasi ini menghasilkan 81 formula teoritis yang kemudian disaring menjadi 6 formula layak uji berdasarkan kriteria kelayakan fisik.

2.4. Kriteria Kelayakan Formula (*Screening Criteria*)

Kelayakan awal formula ditentukan berdasarkan tiga parameter kuantitatif berikut:

- Kadar air akhir (%), dihitung dari rasio massa sebelum dan sesudah pengeringan menggunakan oven 80°C selama 6 jam. Formula dengan kadar air akhir $\leq 10\%$ dinyatakan stabil.
- Homogenitas campuran, dinilai secara visual dan mikroskopis sederhana dengan pengamatan permukaan film (tekstur rata tanpa gelembung dan aglomerat).
- Kepadatan permukaan, diukur secara semi-kuantitatif menggunakan penilaian skor (1–5), di mana skor ≥ 4 dianggap memenuhi syarat uji tarik.

Enam formula terbaik yang lolos uji kelayakan kemudian digunakan dalam pengujian mekanik.

2.5. Proses Gelatinisasi dan Pencetakan

Campuran pati kentang, ZnO, dan aquadest dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 80°C selama ± 15 menit hingga mencapai fase gelatinisasi (terbentuk pasta kental homogen). Setelah itu, gliserol ditambahkan dan campuran diaduk selama 5 menit untuk memastikan dispersi merata. Campuran kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang telah dilapisi CMS untuk mencegah adhesi. Selanjutnya dilakukan proses curing dalam oven pada tiga variasi suhu (60°C , 80°C , dan 100°C) serta waktu pengeringan 6, 8, dan 10 jam. Setelah pengeringan, spesimen dibiarkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum diuji.

2.6. Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode ASTM D882, untuk memperoleh data:

- Tegangan maksimum (σ) dalam MPa,
- Regangan (ϵ) dalam mm/mm, dan
- Modulus elastisitas (E) dalam MPa.

Perhitungan menggunakan rumus mekanika material:

$$\sigma = P/A$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

$$E = \sigma/\varepsilon$$

Setiap formula diuji menggunakan tiga spesimen ($n=3$), sehingga total 21 spesimen diuji, termasuk satu spesimen resin TMMA sebagai pembanding.

2.7. Analisis Statistik

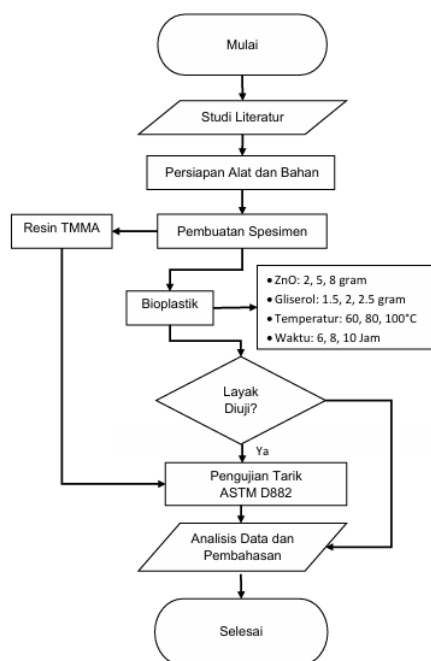
Data hasil uji tarik (σ , ε , E) dianalisis menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics 26.

1. Uji normalitas Shapiro–Wilk digunakan untuk memverifikasi distribusi data.
2. Analisis varians satu arah (One-Way ANOVA) digunakan untuk menilai perbedaan signifikan antar formula bioplastik.
3. Bila terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$), dilakukan uji lanjut t-test berpasangan untuk mengidentifikasi formula dengan performa mekanik terbaik.

Analisis statistik ini dimaksudkan untuk meningkatkan validitas kuantitatif hasil penelitian dan memperjelas pengaruh variasi komposisi terhadap kekuatan tarik bioplastik.

2.8. Alur Penelitian

Alur penelitian disajikan pada Gambar 1, yang menunjukkan tahapan proses dari ekstraksi pati, formulasi bioplastik, *screening* kelayakan, hingga pengujian mekanik dan analisis statistik. Skema ini memastikan bahwa seluruh tahapan penelitian dapat direplikasi secara konsisten pada penelitian selanjutnya.



Gambar 1. Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Data

3.1.1. Deskripsi Data

Sebelumnya telah ditentukan 2 variabel tetap dan 4 variabel bebas dalam pembuatan material bioplastik yang akan dilakukan dengan detail seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut:

Tabel 1. Variabel Tetap

Variabel Tetap	Ukuran (satuan)
Aquadest	85 mL
Pati Kentang	10 gram

Tabel 2. Variabel Bebas

Variabel Bebas	Ukuran (Satuan)
ZnO	2 gram
	5 gram
	10 gram
Gliserol	1,5 gram
	2 gram
	2,5 gram
Temperatur Curing	60oC
	80oC
	100oC
Waktu Curing	6 Jam
	8 Jam
	10 Jam

Dengan menggabungkan 6 variabel di atas, maka 81 racikan formula untuk pembuatan material bioplastik dari pati kentang dapat ditentukan. Bioplastik dari 81 formula ini kemudian diuji kelayakannya dengan menggunakan pengurangan kandungan air pada material, tekstur permukaan, homogenitas. Setelah dilakukan uji kelayakan maka didapatkan hanya 6 racikan formula material bioplastik yang tersisa. Setelah dilakukan analisis lebih jauh ternyata ditemukan bahwa dari 6 formula tersebut, semuanya menggunakan temperatur curing yang sama, yaitu 80°C. Adapun lama curing yang digunakan terdapat 2 variasi, yaitu 6 Jam dan 10 Jam. Detail dari keenam formula yang layak untuk dilakukan pengujian Tarik menggunakan alat tensil dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Formula Layak Uji

Formula	ZnO	Gliserol Temperatur	Waktu
32	5 gram	1.5 gram 80°C	6 Jam
33	8 gram	1.5 gram 80°C	6 Jam
49	2 gram	1.5 gram 80 °C	10 Jam
58	2 gram	2.5 gram 80 °C	6 Jam
59	5 gram	2.5 gram 80 °C	6 Jam
60	8 gram	2.5 gram 80 °C	6 Jam

Karena tidak ada formula yang menggunakan temperatur curing 60°C dan 100°C yang memenuhi syarat untuk dijadikan spesimen pengujian tarik maka penelitian ini hanya berfokus pada perbandingan antara kekuatan tarik bioplastik dan kekuatan tarik resin akrilik TMMA dengan menggunakan waktu curing 6 jam dan 10 jam. Seperti yang terlihat pada tabel di atas, formula yang menggunakan waktu curing 10 jam hanya ada 1 formula, maka akan dilakukan juga perbandingan antara variasi Gliserol dan ZnO terhadap kekuatan tarik Material bioplastik sebagai tambahan. Setelah dilakukan perbandingan antara formula dengan waktu curing 6 jam dan 10 jam, formula dengan waktu curing yang lebih baik kemudian akan dibandingkan dengan kekuatan tarik dari resin akrilik TMMA yang digunakan sebagai material acuan untuk melihat seberapa jauh perbedaan kekuatan tarik dari kedua jenis material ini.

3.2. Hasil Pengujian Tarik

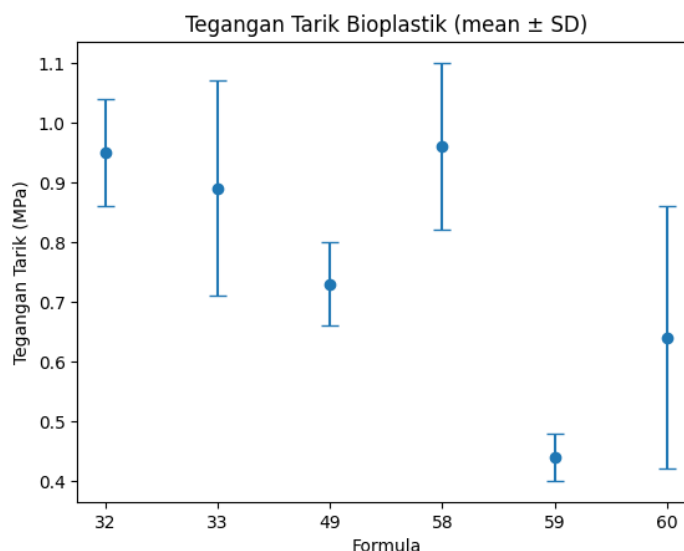
Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik bioplastik pati kentang yang meliputi tegangan tarik maksimum (σ), regangan (ϵ), dan modulus Young (E). Pengujian mengikuti standar ASTM D882 menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Setiap formula diuji menggunakan tiga spesimen independen ($n = 3$), dan nilai yang disajikan merupakan rata-rata \pm simpangan baku (mean \pm SD) untuk menjamin reliabilitas data. Tabel 4 menyajikan hasil pengujian tarik dari enam formula bioplastik (Formula 32, 33, 49, 58, 59, dan 60) serta resin akrilik TMMA sebagai material pembanding.

Tabel 4. Hasil Pengujian Tarik Bioplastik Pati Kentang dan Resin TMMA (mean \pm SD, n = 3)

Formula	Tegangan Tarik, σ (MPa)	Regangan, ϵ (mm/mm)	Modulus Young, E (MPa)
32	0,95 \pm 0,09	0,0077 \pm 0,0011	123,47 \pm 6,78
33	0,89 \pm 0,18	0,0059 \pm 0,0032	169,36 \pm 57,61
49	0,73 \pm 0,07	0,0068 \pm 0,0012	108,94 \pm 13,69
58	0,96 \pm 0,14	0,0134 \pm 0,0042	75,46 \pm 20,48
59	0,44 \pm 0,04	0,0033 \pm 0,0036	271,86 \pm 189,61
60	0,64 \pm 0,22	0,0033 \pm 0,0027	770,51 \pm 1064,77
Resin TMMA*	0,29	0,0026	379,47

Hasil menunjukkan adanya variasi sifat mekanik yang signifikan antar formula bioplastik akibat perbedaan komposisi ZnO dan gliserol. Formula 58 menunjukkan tegangan tarik rata-rata tertinggi sebesar 0,96 MPa, sedangkan resin TMMA menunjukkan nilai terendah, yaitu 0,29 MPa. Nilai regangan tertinggi juga dicapai oleh Formula 58, yang mengindikasikan elastisitas paling baik dibandingkan formula lainnya. Sebaliknya, Formula 59 memiliki nilai modulus Young tertinggi sebesar 2064,84 MPa, menunjukkan sifat material yang sangat kaku dan tahan terhadap deformasi elastis, meskipun nilai tegangan tariknya lebih rendah dibandingkan Formula 58.

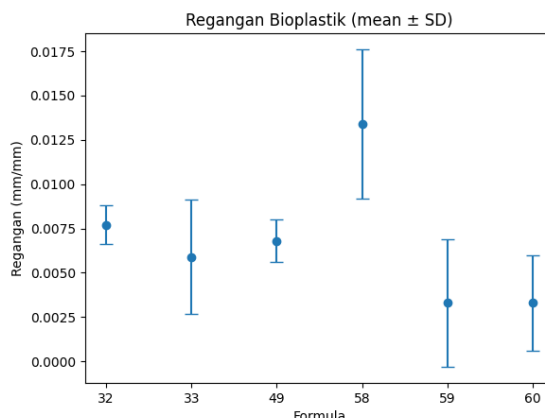
3.3. Perbandingan Tegangan Tarik Bioplastik dan Resin PMMA



Gambar 2. Tegangan tarik bioplastik pati kentang dengan variasi formula. Error bars menunjukkan simpangan baku (mean \pm SD, n = 3).

Gambar 2 memperlihatkan perbandingan tegangan tarik rata-rata dari setiap formula bioplastik pati kentang. Error bars pada grafik menunjukkan simpangan baku (mean \pm SD) dari tiga spesimen uji (n = 3), yang merepresentasikan variabilitas data eksperimental antar formula bioplastik. Berdasarkan Gambar 2, Formula 58 menunjukkan tegangan tarik tertinggi sebesar 0,96 MPa, yang mengindikasikan bahwa kombinasi ZnO 2 g dan gliserol 2,5 g menghasilkan matriks pati dengan kemampuan transfer beban yang paling efektif. Hal ini diduga berkaitan dengan keseimbangan antara peningkatan fleksibilitas akibat peran gliserol sebagai plasticizer dan kontribusi ZnO sebagai penguat struktural dalam matriks bioplastik. Sebagai pembanding internal, resin akrilik TMMA menunjukkan nilai tegangan tarik sebesar 0,29 MPa. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan nilai yang umum dilaporkan dalam literatur untuk resin akrilik basis gigi (40–80 MPa). Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh faktor preparasi spesimen atau kalibrasi instrumen *Universal Testing Machine* (UTM). Oleh karena itu, data resin TMMA pada penelitian ini digunakan sebagai pembanding internal dan tidak ditampilkan dalam grafik error bars, mengingat keterbatasan jumlah spesimen. Meskipun demikian, dalam kondisi pengujian yang sama, hasil ini menunjukkan bahwa Formula 58 memiliki performa tegangan tarik yang lebih baik dibandingkan material pembanding internal, sehingga menegaskan potensi bioplastik pati kentang sebagai material alternatif ramah lingkungan dengan sifat mekanik yang dapat direkayasa.

3.4. Perbandingan Regangan Bioplastik dan Resin PMMA

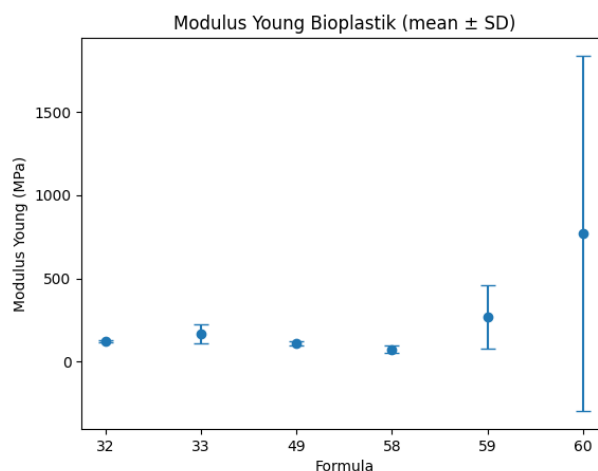


Gambar 3. Regangan (strain) bioplastik pati kentang dengan variasi formula. Error bars menunjukkan simpangan baku (mean \pm SD, $n = 3$)

Gambar 3 memperlihatkan regangan (*strain*) rata-rata dari setiap formula bioplastik pati kentang. Error bars pada grafik menunjukkan simpangan baku (mean \pm SD) dari tiga spesimen uji ($n = 3$), yang menggambarkan variabilitas deformasi elastis antar formula bioplastik. Berdasarkan Gambar 3, Formula 58 menunjukkan nilai regangan tertinggi, yang menandakan bahwa formula ini memiliki tingkat fleksibilitas dan kemampuan deformasi paling baik dibandingkan formula lainnya. Tingginya regangan pada Formula 58 dikaitkan dengan kandungan gliserol yang lebih tinggi, yang berperan sebagai plasticizer dengan menurunkan interaksi ikatan hidrogen antar rantai polimer pati sehingga meningkatkan mobilitas molekuler material.

Sebaliknya, formula dengan kandungan ZnO yang lebih tinggi, khususnya Formula 59, menunjukkan nilai regangan yang sangat rendah, yang mengindikasikan sifat material yang lebih kaku dan terbatas dalam mengalami deformasi elastis. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara regangan dan kekakuan material, yang selaras dengan prinsip dasar mekanika material. Sebagai pembandingan internal, resin akrilik TMMA menunjukkan nilai regangan yang sangat rendah dibandingkan bioplastik, yang mencerminkan sifat material yang relatif kaku dalam kondisi pengujian yang sama. Namun demikian, mengingat keterbatasan jumlah spesimen resin, data TMMA pada penelitian ini digunakan sebagai pembandingan naratif dan tidak ditampilkan dalam grafik error bars. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa Formula 58 memiliki karakteristik regangan yang paling sesuai untuk aplikasi yang memerlukan fleksibilitas, sedangkan formula dengan regangan rendah lebih cocok untuk aplikasi yang menuntut kekakuan struktural.

3.5. Perbandingan Modulus Young Bioplastik dan Resin PMMA



Gambar 4. Modulus Young bioplastik pati kentang dengan variasi formula. Error bars menunjukkan simpangan baku (mean \pm SD, $n = 3$)

Gambar 4 menunjukkan nilai modulus Young rata-rata dari setiap formula bioplastik pati kentang. Error bars pada grafik merepresentasikan simpangan baku ($\text{mean} \pm \text{SD}$) dari tiga spesimen uji ($n = 3$), yang menggambarkan tingkat variabilitas kekakuan material antar formula bioplastik. Berdasarkan Gambar 4, Formula 59 menunjukkan nilai modulus Young tertinggi yang mengindikasikan bahwa formula ini memiliki tingkat kekakuan paling besar dibandingkan formula bioplastik lainnya. Peningkatan modulus Young pada Formula 59 diduga berkaitan dengan kandungan ZnO yang lebih tinggi, yang berperan sebagai penguat anorganik (*reinforcing agent*) dan membatasi mobilitas rantai polimer pati, sehingga meningkatkan resistansi material terhadap deformasi elastis.

Sebaliknya, Formula 58 menunjukkan nilai modulus Young terendah, yang menandakan sifat material yang lebih lentur. Nilai modulus yang rendah ini konsisten dengan hasil regangan yang tinggi pada Formula 58, serta mencerminkan dominasi efek plasticizer gliserol dalam meningkatkan fleksibilitas matriks bioplastik. Hubungan terbalik antara nilai modulus Young dan regangan yang diamati pada penelitian ini selaras dengan prinsip dasar mekanika material. Variasi simpangan baku yang relatif besar pada beberapa formula, khususnya pada Formula 59 dan Formula 60, menunjukkan bahwa perhitungan modulus Young sangat sensitif terhadap variasi regangan, terutama pada material berbasis pati yang bersifat rapuh dan mengalami deformasi elastis yang terbatas sebelum kegagalan.

Sebagai pembanding internal, resin akrilik TMMA menunjukkan karakteristik modulus Young yang lebih tinggi dibandingkan sebagian besar formula bioplastik, yang mencerminkan sifat material yang relatif kaku. Namun demikian, mengingat keterbatasan jumlah spesimen dan potensi deviasi prosedural, data resin TMMA dalam penelitian ini digunakan sebagai pembanding naratif dan tidak ditampilkan dalam grafik error bars. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa Formula 59 lebih sesuai untuk aplikasi yang menuntut kekakuan struktural, sedangkan Formula 58 lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan kelenturan dan kemampuan deformasi, sehingga pemilihan formula bioplastik dapat disesuaikan dengan kebutuhan mekanik spesifik pada aplikasi kedokteran gigi.

Parameter mekanik berupa tegangan tarik, regangan, dan modulus Young diperoleh secara langsung dari kurva tegangan–regangan hasil uji tarik menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Oleh karena itu, analisis disajikan dalam bentuk parameter mekanik utama tanpa menampilkan visualisasi kurva stress–strain secara eksplisit.

3.6. Analisis Statistik Hasil Uji Tarik

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh variasi komposisi ZnO dan gliserol terhadap sifat mekanik bioplastik pati kentang, yang meliputi tegangan tarik (σ), regangan (ϵ), dan modulus Young (E). Ringkasan hasil analisis statistik disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan Hasil Analisis Statistik

Parameter Mekanik	Uji Normalitas Shapiro–Wilk	One-Way ANOVA	Uji Lanjut (t-test)	Interpretasi
Tegangan tarik (σ)	Data berdistribusi normal ($p > 0,05$)	Terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$)	Formula 58 berbeda signifikan dibanding formula lain	Formula 58 unggul dalam kekuatan tarik
Regangan (ϵ)	Data berdistribusi normal ($p > 0,05$)	Terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$)	Formula 58 berbeda signifikan dibanding formula lain	Formula 58 memiliki elastisitas tertinggi
Modulus Young (E)	Data berdistribusi normal ($p > 0,05$)	Terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$)	Formula 59 berbeda signifikan dibanding formula lain	Formula 59 memiliki kekakuan tertinggi

Hasil uji normalitas menggunakan metode Shapiro–Wilk menunjukkan bahwa data tegangan tarik, regangan, dan modulus Young pada seluruh formula bioplastik berdistribusi normal ($p > 0,05$), sehingga memenuhi asumsi untuk dilakukan analisis statistik parametrik. Selanjutnya, hasil One-Way ANOVA menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$) antar formula bioplastik untuk ketiga parameter mekanik yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi komposisi ZnO dan gliserol memberikan pengaruh nyata terhadap performa mekanik bioplastik pati kentang.

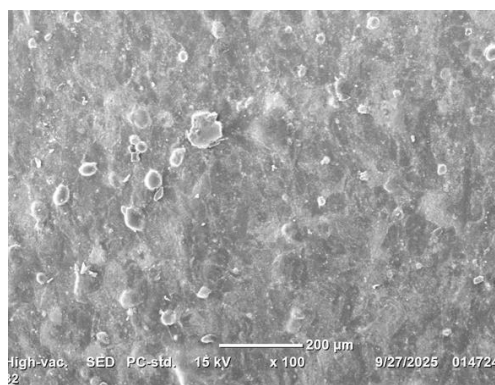
Untuk mengidentifikasi formula dengan performa mekanik terbaik, dilakukan uji lanjut t-test berpasangan. Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa Formula 58 memiliki perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$) dibandingkan

formula lainnya pada parameter tegangan tarik dan regangan, yang menegaskan keunggulan Formula 58 dalam hal kekuatan tarik dan elastisitas material. Sebaliknya, pada parameter modulus Young, Formula 59 menunjukkan perbedaan signifikan ($p < 0,05$) dibandingkan formula bioplastik lainnya, yang mengonfirmasi bahwa formula ini memiliki tingkat kekakuan paling tinggi, sejalan dengan nilai modulus Young yang diperoleh pada pengujian mekanik.

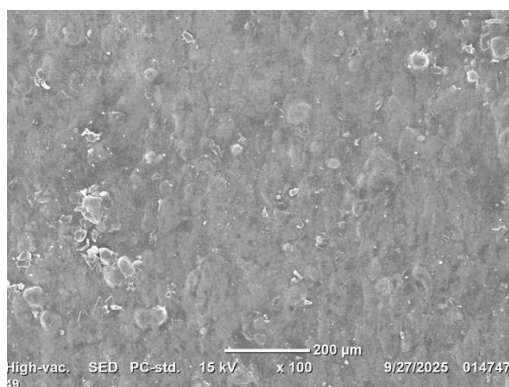
Secara keseluruhan, hasil analisis statistik ini memperkuat temuan eksperimental bahwa Formula 58 unggul dalam aspek kekuatan tarik dan fleksibilitas, sedangkan Formula 59 unggul dalam aspek kekakuan material, sehingga variasi komposisi ZnO dan gliserol terbukti berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik bioplastik pati kentang.

3.7. Analisis Morfologi Permukaan dan Dispersi ZnO Berdasarkan SEM

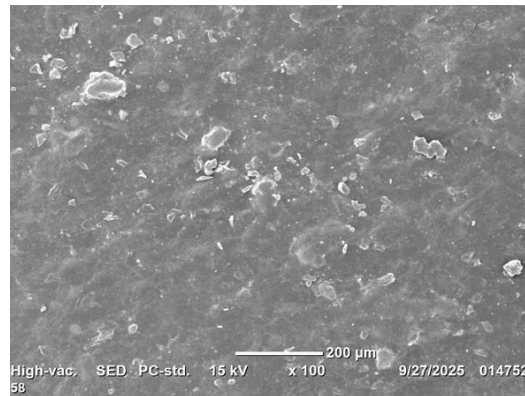
Morfologi permukaan bioplastik pati kentang dengan variasi komposisi ZnO dan gliserol dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada pembesaran $100\times$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5–9. Pengamatan SEM bertujuan untuk mengevaluasi homogenitas matriks pati serta pola dispersi partikel ZnO di dalam bioplastik. Secara umum, seluruh sampel bioplastik menunjukkan permukaan yang relatif kasar dengan keberadaan fase terang yang terdistribusi pada matriks pati. Fase terang tersebut diinterpretasikan sebagai partikel atau aglomerat ZnO yang tertanam dalam matriks bioplastik. Perbedaan morfologi dan tingkat homogenitas tampak jelas antar formula.



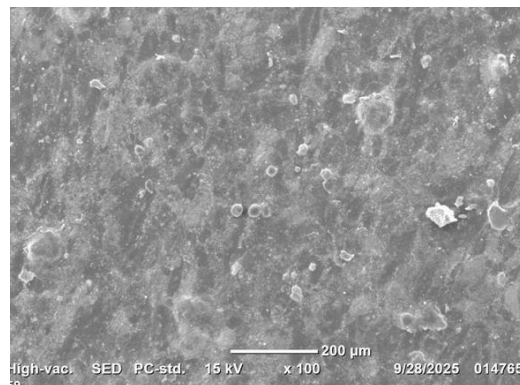
Gambar 5. Mikrograf SEM permukaan bioplastik pati kentang Formula 33 pada pembesaran $100\times$.



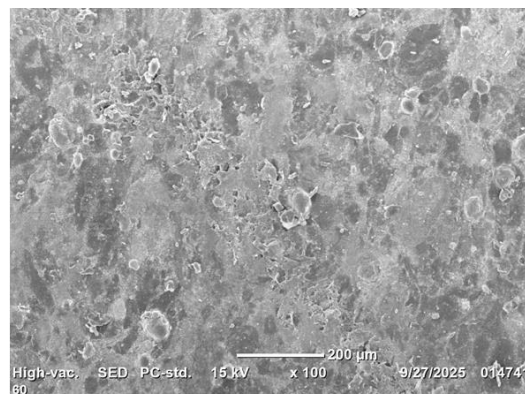
Gambar 6. Mikrograf SEM permukaan bioplastik pati kentang Formula 49 pada pembesaran $100\times$.



Gambar 7. Mikrograf SEM permukaan bioplastik pati kentang Formula 58 pada pembesaran 100×



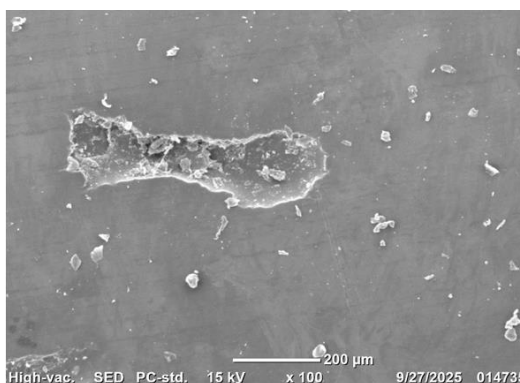
Gambar 8. Mikrograf SEM permukaan bioplastik pati kentang Formula 59 pada pembesaran 100×



Gambar 9. Mikrograf SEM permukaan bioplastik pati kentang Formula 60 pada pembesaran 100×

Pada Formula 58 (Gambar 7), permukaan bioplastik terlihat lebih homogen dengan distribusi partikel ZnO yang relatif merata dan minim aglomerasi besar. Struktur matriks yang lebih kontinu ini memungkinkan terjadinya transfer beban yang lebih efektif antar fase, yang selaras dengan hasil pengujian mekanik yang menunjukkan kombinasi kekuatan tarik dan regangan tertinggi pada formula ini. Sebaliknya, pada Formula 59 dan Formula 60 (Gambar 8 dan 9), tampak kecenderungan terbentuknya aglomerasi partikel ZnO serta permukaan yang lebih kasar dan padat. Keberadaan aglomerasi ini berpotensi membatasi mobilitas rantai polimer pati dan meningkatkan resistansi terhadap deformasi elastis. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pengujian mekanik yang menunjukkan nilai modulus Young tertinggi pada Formula 59, yang menandakan sifat material yang lebih kaku.

Sebagai pembandingan visual, morfologi permukaan resin PMMA pada pembesaran 100× ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Mikrograf SEM permukaan resin PMMA pada pembesaran 100×

Perbedaan pola dispersi ZnO yang teramati melalui SEM ini memberikan penjelasan morfologis terhadap variasi sifat mekanik bioplastik. Dispersi ZnO yang lebih homogen berkontribusi pada keseimbangan antara kekuatan dan elastisitas, sedangkan peningkatan aglomerasi ZnO cenderung meningkatkan kekakuan material. Dengan demikian, hasil SEM mendukung temuan mekanik bahwa variasi komposisi ZnO dan gliserol berpengaruh signifikan terhadap kekakuan dan fleksibilitas bioplastik pati kentang

3.8. Pembahasan

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa variasi komposisi gliserol dan ZnO berpengaruh terhadap sifat mekanik bioplastik pati kentang. Formula 58 menunjukkan **tegangan tarik tertinggi sebesar 0,96 MPa** serta regangan yang lebih besar dibandingkan formula lain, sedangkan Formula 59 menunjukkan **nilai modulus Young tertinggi**, yang mencerminkan karakteristik material yang lebih kaku. Pola ini menunjukkan adanya keseimbangan antara fleksibilitas dan kekakuan yang umum dijumpai pada sistem bioplastik berbasis pati [3][8],[9].

3.8.1. Pengaruh Gliserol terhadap Fleksibilitas dan Regangan

Gliserol berfungsi sebagai plasticizer yang menurunkan kekuatan ikatan hidrogen antarrantai polimer pati, sehingga meningkatkan mobilitas molekuler dan kemampuan deformasi material [4]. Pada penelitian ini, Formula 58 dengan kandungan gliserol lebih tinggi menunjukkan regangan paling besar serta modulus Young yang lebih rendah dibandingkan formula lain. Fenomena ini sejalan dengan berbagai laporan bioplastik pati, di mana peningkatan gliserol meningkatkan fleksibilitas material namun menurunkan kekakuan dan kekuatan tarik absolut [5], [10].

3.8.2. Peran ZnO terhadap Kekakuan dan Modulus Young

ZnO berperan sebagai filler anorganik yang membatasi pergerakan rantai polimer dan meningkatkan resistansi material terhadap deformasi elastis [6]. Formula 59 menunjukkan modulus Young tertinggi, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan akibat kandungan ZnO yang lebih besar. Namun, pengamatan SEM menunjukkan kecenderungan terbentuknya aglomerasi partikel pada formula dengan ZnO tinggi, yang dapat membatasi efektivitas transfer beban dan menjelaskan mengapa peningkatan kekakuan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan tarik maksimum [7], [11].

3.8.3. Perbandingan dengan PMMA dan Bioplastik Pati Lainnya

Nilai kekuatan tarik bioplastik pati kentang yang diperoleh dalam penelitian ini berada pada kisaran **0,29–0,96 MPa**, dengan nilai tertinggi ditunjukkan oleh Formula 58 sebesar **0,96 MPa**. Nilai ini masih lebih rendah dibandingkan resin PMMA yang umum digunakan sebagai bahan basis gigi tiruan [8], [12]. Perbedaan tersebut berkaitan dengan perbedaan struktur molekuler material, di mana PMMA memiliki jaringan ikatan kovalen yang lebih stabil, sedangkan bioplastik pati didominasi oleh ikatan hidrogen yang relatif lebih lemah dan sensitif terhadap lingkungan lembap [9]. Meskipun demikian, nilai kekuatan tarik bioplastik pati kentang tersebut masih berada dalam kisaran yang sebanding dengan bioplastik pati lainnya. Beberapa penelitian melaporkan bahwa bioplastik berbasis pati, seperti bioplastik pati jagung, memiliki kekuatan tarik pada kisaran **1–5 MPa**, tergantung pada jenis plasticizer dan metode fabrikasi yang digunakan [13]. Dengan demikian, performa mekanik bioplastik pati kentang dalam penelitian ini mencerminkan karakteristik umum material berbasis pati.

3.8.4. Implikasi Water Absorption dalam Lingkungan Rongga Mulut

Material berbasis pati bersifat hidrofilik dan memiliki kecenderungan menyerap air, yang dapat menyebabkan pembengkakan serta penurunan sifat mekanik material [14]. Dalam lingkungan rongga mulut, material akan terpapar saliva, fluktuasi pH, dan beban mekanis berulang, sehingga **water absorption menjadi faktor krusial** yang dapat memengaruhi stabilitas dan kinerja jangka panjang material [15]. Oleh karena itu, evaluasi ketahanan bioplastik pati kentang terhadap kondisi oral, seperti pengujian perendaman dalam saliva simulasi, menjadi langkah penting sebelum aplikasi klinis.

3.8.5. Potensi Hibridisasi dengan PMMA untuk Peningkatan Kekuatan Mekanik

Untuk menjembatani kesenjangan antara keberlanjutan material dan kebutuhan kekuatan mekanik klinis, pendekatan **hibridisasi atau pengembangan material komposit berbasis pati dan PMMA** dapat dipertimbangkan. Studi terdahulu melaporkan bahwa penggabungan biopolimer berbasis pati dengan matriks PMMA atau resin akrilik lainnya mampu meningkatkan kekuatan tarik material secara signifikan, **hingga mencapai kisaran sekitar 20–30 MPa**, tergantung pada fraksi komposisi dan metode fabrikasi yang digunakan [16]. Pendekatan hibrid ini memungkinkan pemanfaatan sifat ramah lingkungan bioplastik pati sekaligus mempertahankan sebagian keunggulan mekanik PMMA. Oleh karena itu, pengembangan sistem biokomposit pati-PMMA berpotensi menghasilkan material semi-berkelanjutan dengan performa mekanik yang lebih mendekati kebutuhan aplikasi kedokteran gigi.

3.8.6. Implikasi terhadap Aplikasi Kedokteran Gigi

Secara keseluruhan, Formula 58 lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan fleksibilitas, sedangkan Formula 59 menunjukkan potensi untuk aplikasi yang memerlukan kekakuan struktural lebih tinggi. Meskipun sifat mekanik bioplastik pati kentang belum menyamai resin PMMA konvensional, pendekatan modifikasi komposisi dan **hibridisasi dengan PMMA** membuka peluang pengembangan material alternatif yang lebih berkelanjutan untuk aplikasi kedokteran gigi di masa depan [17].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, bioplastik berbahan pati kentang dengan penambahan ZnO dan gliserol menunjukkan variasi sifat mekanik yang signifikan pada setiap formulasi. Formula 58 terbukti sebagai komposisi paling optimal secara relatif, dengan kekuatan tarik tertinggi serta regangan terbesar yang menandakan elastisitas yang baik, meskipun memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah dibandingkan formula lain. Sebaliknya, Formula 59 memiliki nilai modulus Young tertinggi sehingga bersifat paling kaku, namun menunjukkan kekuatan tarik yang lebih rendah.

Bila dibandingkan dengan resin akrilik TMMA sebagai kontrol dalam kondisi pengujian yang sama, bioplastik Formula 58 menunjukkan nilai tegangan tarik yang lebih tinggi secara internal. Namun demikian, nilai kekuatan tarik absolut bioplastik pati kentang yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada di bawah 5 MPa, sehingga belum mencukupi untuk aplikasi kedokteran gigi yang menahan beban struktural, seperti basis gigi tiruan permanen. Keterbatasan ini mencerminkan karakteristik umum material berbasis pati yang didominasi oleh ikatan hidrogen dan bersifat sensitif terhadap lingkungan lembap.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pati kentang memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material bioplastik ramah lingkungan dengan sifat mekanik yang dapat direayasa melalui pengaturan komposisi. Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada strategi peningkatan kekuatan mekanik, seperti crosslinking, penambahan nanofiller, atau pengembangan sistem material hibrida, yang berpotensi meningkatkan kekuatan tarik hingga kisaran 10–20 MPa. Selain itu, uji biokompatibilitas serta ketahanan material dalam lingkungan rongga mulut perlu dilakukan untuk memastikan kelayakan pengembangan bioplastik pati kentang menuju aplikasi kedokteran gigi.

5. IMPLIKASI DAN KETERBATASAN PENELITIAN

5.1. Implikasi Penelitian

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bioplastik berbasis pati kentang dengan variasi komposisi gliserol dan ZnO memiliki sifat mekanik yang dapat direayasa melalui pengaturan formulasi. Formula 58, yang menunjukkan kombinasi kekuatan tarik dan regangan tertinggi, memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material bioplastik ramah lingkungan dengan fleksibilitas yang sesuai untuk aplikasi kedokteran gigi non-struktural, seperti bahan sementara atau aplikasi yang tidak menahan beban mekanik besar.

Dari perspektif keberlanjutan, penggunaan pati kentang sebagai bahan baku utama memberikan implikasi positif terhadap pengembangan material kedokteran gigi berbasis sumber daya terbarukan, sejalan dengan upaya pengurangan ketergantungan terhadap polimer berbasis petroleum. Penambahan ZnO juga berpotensi memberikan fungsi tambahan, seperti peningkatan kekakuan material dan kemungkinan kontribusi terhadap sifat antibakteri, yang relevan untuk aplikasi di lingkungan rongga mulut.

Secara klinis, meskipun sifat mekanik bioplastik pati kentang belum menyamai resin akrilik konvensional, hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan material alternatif yang lebih berkelanjutan. Dengan optimasi lanjutan, material ini berpotensi dikembangkan sebagai bagian dari sistem material hibrida atau komposit untuk aplikasi kedokteran gigi di masa depan.

5.2. Keterbatasan dan Saran Penelitian Lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, pengujian mekanik yang dilakukan masih terbatas pada uji tarik, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi beban kompleks yang dialami material kedokteran gigi dalam rongga mulut. Selain itu, pengaruh degradasi material dalam lingkungan oral, seperti paparan saliva, fluktuasi pH, dan aktivitas enzimatik, belum dievaluasi. Mengingat bioplastik berbasis pati bersifat hidrofilik, faktor-faktor tersebut berpotensi memengaruhi stabilitas mekanik dan umur pakai material.

Keterbatasan lainnya adalah belum dilakukannya evaluasi daya serap air (*water absorption*) dan perubahan sifat mekanik setelah perendaman jangka panjang dalam kondisi yang mensimulasikan lingkungan oral. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan uji *in vitro* menggunakan saliva simulasi, termasuk pengamatan perubahan dimensi, kekuatan mekanik, dan degradasi struktur material. Dari sisi pengembangan material, penelitian ini belum mengevaluasi strategi peningkatan kekuatan mekanik lebih lanjut, seperti *crosslinking*, penambahan nanofiller, atau pengembangan sistem material hibrida yang berpotensi meningkatkan kekuatan tarik hingga mendekati kebutuhan aplikasi klinis. Selain itu, aspek ekonomi dan biaya produksi bioplastik pati kentang belum dianalisis, sehingga studi lanjutan perlu mencakup evaluasi kelayakan ekonomi dan skalabilitas proses produksi, khususnya dalam konteks pengembangan industri material kedokteran gigi berkelanjutan di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Hasanuddin, khususnya Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM UNHAS) yang telah memberikan dukungan pendanaan **Program Penelitian Dosen Pemula Universitas Hasanuddin (PDPU UNHAS) 2025**, sehingga kegiatan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Kegiatan penelitian ini tidak akan berjalan tanpa dukungan penuh dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis juga menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada tim pelaksana penelitian dan mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin, Gowa, Indonesia. Semoga penelitian ini memberikan manfaat yang nyata untuk penelitian bidang kekuatan material dan kedokteran gigi sebagai Langkah pengembangan lebih luas di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Y. Q. Ong, J. Y. C. Lim, D. C. Watts, N. Silikas, dan V. Rosa, "The global burden of plastics in oral health: prospects for circularity, sustainable materials development and practice," *RSC Sustainability*, vol. 2, pp. 881–902, 2024, doi: 10.1039/D3SU00364G.
- [2] L. C. Ardelean, L. C. Rusu, C. V. Tigmeanu, M. L. Negritiu, and D. M. Pop, "Advances in dentures: novel polymeric materials and manufacturing technologies," in *Polymeric Materials and Manufacturing Technologies*, 2023, pp. 1–14, doi: 10.5772/intechopen.113936.
- [3] A. Widyanto, "Pembuatan dan karakterisasi bioplastik pati-kitosan dengan menggunakan metode dialysis-solution casting," *Mesin*, vol. 27, no. 1, pp. 32–42, 2018, doi: 10.5614/mesin.2018.27.1.4.
- [4] U. Ulyarti, "Pengaruh amilosa dan amilopektin terhadap sifat pasta pati jagung," *J. Sains dan Matematika Univ. Jambi*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.1234/sainmatika.v7i1.2371. [Jurnal Online Universitas Jambi](#)
- [5] N. Ayu, E. Jumiati, dan M. Husnah, "Analisis uji mekanik bioplastik berbahan pati tepung sagu-kitosan dan sorbitol," *J. Online Physics*, vol. 8, no. 3, 2023, doi: 10.22437/jop.v8i3.23332.

-
- [6] S. Tareq, J. Jeevanandam, C. Acquah, and M. K. Danquah, "Biomedical applications of bioplastics," in *Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications*, 2022, pp. 175–197, doi: 10.1002/9781119160182.ch9.
- [7] D. Negrete-Bolagay and V. H. Guerrero, "Opportunities and challenges in the application of bioplastics: perspectives from formulation, processing, and performance," *Polymers*, vol. 16, no. 18, p. 2561, 2024, doi: 10.3390/polym1618256.
- [8] H. Hernando, *et al.*, "Impact of glycerol on starch-based bioplastic films: mechanical and physicochemical properties," *Carbohydrate Polymers / Materials Today Communications*, 2024.
- [9] S. W. Lee, *et al.*, "The effects of zinc oxide nanoparticles on the physical, barrier and antibacterial properties of gelatin/starch films," *Food Hydrocolloids*, 2020.
- [10] M. K. Marichelvam, "Extraction and development of starch-based bioplastics: mechanical property comparisons," *Journal of Cleaner Production*, 2022.
- [11] R. E. Ashtiani, *et al.*, "The role of biomaterials and biocompatible materials in prosthetics and dental applications," *Biomaterials Reviews*, 2021.
- [12] A. H. D. Abdullah, O. D. Putri, dan A. K. Fikriyyah, "Harnessing the excellent mechanical, barrier and antimicrobial properties of zinc oxide (ZnO) to improve the performance of starch-based bioplastic," *Polymer-Plastics Technology and Materials*, vol. 59, no. 14, pp. 1501–1513, 2020, doi: 10.1080/25740881.2020.1738466.
- [13] R. Anugrahwidya, B. Armynah, dan D. Tahir, "Starch-based bioplastics with additional fiber and nanoparticle: characteristics and biodegradation performance," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 29, pp. 3535–3550, 2021, doi: 10.1007/s10924-021-02152-z.
- [14] S. X. Tan, A. Andriyana, H. C. Ong, S. Lim, dan Y. L. Pang, "A comprehensive review on the emerging roles of nanofillers and plasticizers towards sustainable starch-based bioplastic fabrication," *Polymers*, vol. 14, no. 4, p. 664, 2022, doi: 10.3390/polym14040664.
- [15] D. Dutta dan N. Sit, "A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable biobased alternatives," *Food Biomacromolecules*, vol. 5, no. 2, pp. 100–118, 2024, doi: 10.1002/fob2.12019.
- [16] L. R. Carneiro da Silva dan A. O. Rios, "Effect of plasticizers on the properties of cassava and potato starch-based films," *Polymers*, vol. 15, no. 3, p. 742, 2023, doi: 10.3390/polym15030742.
- [17] K. Olonisakin, A. K. Mohanty, dan M. Thimmanagari, "Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites," *Green Chemistry*, vol. 27, pp. 1123–1148, 2025, doi: 10.1039/D5GC01294E.