



PENGARUH VARIASI UKURAN PARTIKEL TEPUNG KULIT PISANG TERHADAP SIFAT MEKANIK KOMPOSIT BIOPLASTIK BERBASIS *POLYLACTIC ACID*

Isa Yuanata Abdulloh^{a*}, Andita Nataria Fitri Ganda^a, Dewi Puspitasari^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Prof. Moch Yamin, Ketintang, Gayungan, Surabaya 60231, Indonesia

*Corresponding authors at: isayuanata.22005@mhs.unesa.ac.id Tel.: +62897-0876-038

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 15 Desember 2025

Direvisi pada 30 Januari 2026

Disetujui pada 17 Februari 2026

Tersedia daring pada 28 Februari 2026

Kata kunci:

Bioplastik PLA, tepung kulit pisang, sifat mekanik

Keywords:

PLA bioplastics, banana peel flour, mechanical properties

ABSTRAK

Produksi pisang yang tinggi di Indonesia menghasilkan limbah kulit pisang dalam jumlah besar yang berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal. Kulit pisang memiliki kandungan pati dan lignoselulosa yang berpotensi digunakan sebagai *filler* alami dalam pengembangan bioplastik ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ukuran partikel tepung kulit pisang terhadap sifat mekanik komposit bioplastik berbasis *polylactic acid* (PLA). Bioplastik dibuat dengan metode *injection molding* menggunakan tiga variasi ukuran partikel tepung kulit pisang, yaitu mesh 50, 100, dan 200. Karakterisasi sifat mekanik dilakukan melalui uji tarik untuk menentukan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi, serta didukung oleh analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan ukuran partikel *filler* secara signifikan meningkatkan performa mekanik bioplastik. Spesimen dengan ukuran partikel paling halus (mesh 200) menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 36,88 MPa, modulus elastisitas 83,49 MPa, dan elongasi 8,33%. Hasil SEM mengonfirmasi adanya dispersi *filler* yang lebih homogen dan ikatan antarmuka yang lebih baik. Analisis statistik menggunakan uji ANOVA menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel memberikan pengaruh signifikan terhadap seluruh parameter mekanik ($p < 0,05$). Penelitian ini memberikan manfaat bagi masyarakat melalui pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai bahan baku bernilai tambah untuk pengembangan bioplastik ramah lingkungan.

ABSTRACT

The excessive production of bananas in Indonesia results in a substantial quantity of banana peel waste, which, if not properly managed, can lead to environmental issues. Starch and lignocellulosic components are present in banana peels and have the potential to serve as natural fillers in bioplastics that are environmentally benign. The objective of this study is to examine the impact of the particle size of banana peel flour on the mechanical properties of bioplastic composites based on polylactic acid (PLA). The injection molding procedure was employed to create the bioplastics, which were composed of three particle sizes of banana peel flour: 50, 100, and 200 mesh. Tensile testing was employed to assess mechanical properties, including elongation, Young's modulus, and tensile strength. Morphological analysis was conducted using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results suggest that the mechanical performance of the bioplastics is considerably enhanced by the reduction of filler particle size. The tensile strength, Young's modulus, and elongation of the finest particle size (mesh 200) were 36.88 MPa, 83.49 MPa, and 8.33%, respectively. The SEM observations verified a more uniform filler dispersion and enhanced interfacial bonding at smaller particle sizes. The ANOVA statistical analysis demonstrated that particle size variation had a substantial impact on all mechanical parameters ($p < 0.05$). This study emphasizes the potential of banana peel waste to be used as a value-added raw material in the development of bioplastics that are both environmentally benign and sustainable.

1. PENGANTAR

Produksi pisang yang tinggi di Indonesia menghasilkan limbah kulit pisang dalam jumlah besar, dan apabila tidak dimanfaatkan dengan baik, limbah ini berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan. Kulit pisang mengandung pati, selulosa, dan hemiselulosa yang berpotensi digunakan sebagai *filler* alami dalam pembuatan bioplastik ramah lingkungan (Verma dkk., 2024). Pemanfaatan limbah ini

tidak hanya mengurangi ketergantungan pada plastik berbasis minyak bumi, tetapi juga mendukung pengelolaan sampah organik secara berkelanjutan (Karne dkk., 2023). *Polylactic acid (PLA)* merupakan matriks biopolimer yang banyak digunakan karena sifatnya yang *biodegradable*, memiliki kekuatan mekanik baik, serta kompatibel dengan pemrosesan polimer konvensional. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan tepung kulit pisang sebagai *filler* dapat memodifikasi sifat mekanik dan karakteristik komposit PLA secara signifikan (F. Kong dkk., 2022). Kombinasi PLA dengan *filler* berbasis limbah pertanian juga terbukti meningkatkan nilai tambah limbah sekaligus menghasilkan material ramah lingkungan dengan performa yang kompetitif (Lendvai dkk., 2023).

Ukuran partikel *filler* merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas biokomposit. Variasi ukuran saringan (mesh) pada tepung kulit pisang dapat memengaruhi luas permukaan kontak, homogenitas dispersi *filler*, dan kekuatan ikatan antarmuka dengan matriks PLA. Partikel yang lebih halus cenderung meningkatkan ikatan *interfacial* dan kekuatan tarik, sedangkan partikel kasar dapat menimbulkan konsentrasi tegangan yang menurunkan sifat mekanik material (Miller dkk., 2024). Oleh karena itu, pengendalian ukuran partikel menjadi aspek kunci dalam optimasi komposit bioplastik. Pengujian tarik (*tensile test*) banyak digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanik seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi material (Şen & Sever, 2025). Selain itu, karakterisasi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* memberikan pemahaman mendalam mengenai morfologi patahan dan kualitas interaksi *matriks–filler* (Cree dkk., 2023).

Di Indonesia, beberapa penelitian telah mengembangkan bioplastik berbasis pati kulit pisang, tetapi kajian yang khusus meneliti pengaruh variasi ukuran partikel tepung kulit pisang terhadap sifat mekanik komposit PLA masih sangat terbatas (Lingkungan dkk., 2025). Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis bagaimana variasi ukuran partikel memengaruhi kekuatan tarik, modulus, dan elongasi bioplastik PLA, serta mengidentifikasi ukuran partikel optimal yang mampu menghasilkan performa mekanik terbaik pada komposit bioplastik berbasis PLA.

2. METODE

2.1 Bahan dan Alat

Limbah kulit pisang disuplai dari pengolahan UMKM Kue pisang yang ada di Sidoarjo, *Polylactic Acid* atau PLA didapat dari toko lokal, saringan (50,100,200), *oven*, gelas *beaker*, *mixer*, cetakan uji tarik Tipe IV ASTM D638, dengan dimensi ± 115 mm panjang, 19 mm lebar, dan ketebalan sekitar 4 mm dan *injection molding machine* T150.

2.2 Metode Sintesis

2.2.1 Proses Sintesis Bioplasik Kulit Pisang dengan Menggunakan Mesh

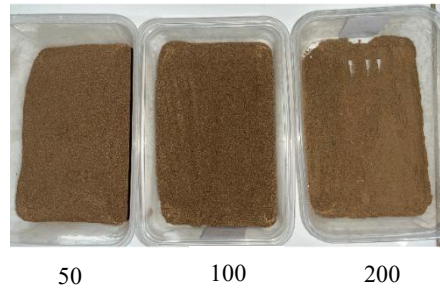
Proses sintesis bioplastik berbasis kulit pisang dimulai dengan pencucian kulit pisang menggunakan air bersih untuk menghapus kotoran dan pengotor, kemudian dipotong kecil-kecil agar proses pengeringan lebih efektif. Kulit yang sudah dipotong kemudian dikeringkan menggunakan *oven* pada suhu rendah atau dijemur di bawah sinar matahari hingga kadar airnya menurun drastis, mencegah pertumbuhan mikroorganisme dan mempertahankan kualitas pati. Setelah kering, kulit pisang digiling dengan *blender* atau *grinder* hingga menjadi serbuk halus, dan diekstraksi menggunakan air suling dalam perbandingan 1:10 (b/v). Hasil campuran diaduk, disaring untuk memisahkan endapan pati, lalu endapan tersebut diambil melalui kertas saring *Whatman* dan dikeringkan kembali hingga hampir bebas air. Tahapan keseluruhan proses sintesis bioplastik berbasis kulit pisang hingga pengayakan pati ditunjukkan pada Gambar 1.

Tahap penting berikutnya adalah pengayakan, di mana pati kulit pisang kering diayak menggunakan saringan ukuran mesh 50, 100, dan 200. Variasi ukuran mesh ini dimaksudkan menghasilkan partikel dengan distribusi ukuran berbeda, yang nantinya memengaruhi luas permukaan, distribusi homogen di dalam matriks, serta ikatan antarmuka antara *filler* dan PLA. Studi oleh Dobrosielska dkk. (2022) menyimpulkan bahwa ukuran partikel *filler* sangat berpengaruh pada sifat mekanik terutama kekuatan tarik dan modulus pada komposit PLA dengan *diatomaceous earth*: partikel yang terlalu besar mengurangi kekuatan karena membentuk aglomerasi, sedangkan distribusi yang lebih seragam dari partikel halus meningkatkan kinerja mekanik (Dobrosielska dkk., 2022).



Gambar 1: Proses sintesis bioplasik kulit pisang dengan menggunakan mesh

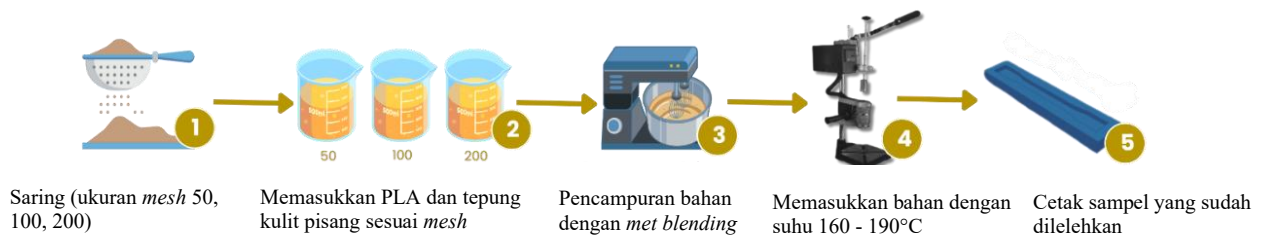
Setelah proses pengayakan dilakukan, tepung kulit pisang terpisah menjadi tiga fraksi berbeda berdasarkan ukuran mesh, yang memperlihatkan perbedaan pada gambar 2 di bawah ini dengan tingkat kehalusan partikel.



Gambar 2: Hasil setelah proses pengayakan dengan menggunakan mesh yang berbeda

2.2.2 Proses Sintesis Bioplastik Tepung Kulit Pisang-PLA

Tepung pati kulit pisang yang telah dikeringkan di bawah sinar matahari atau menggunakan oven bersuhu rendah selanjutnya diayak menggunakan saringan berukuran 50, 100, dan 200 mesh untuk memperoleh variasi ukuran partikel, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1. Variasi ukuran partikel tersebut diharapkan dapat memengaruhi luas permukaan spesifik serta kualitas ikatan antarmuka antara pati kulit pisang sebagai *filler* dan *matriks polylactic acid* (PLA). Tepung hasil pengayakan kemudian dicampurkan dengan biji PLA pada rasio komposisi 70% PLA dan 30% pati tepung kulit pisang, lalu diproses menggunakan mesin *injection molding* pada suhu 160–190 °C hingga campuran homogen terbentuk. Proses pencampuran, peleburan, dan pencetakan bioplastik kulit pisang-PLA hingga diperoleh spesimen uji tarik yang sesuai dengan standar ASTM D638 ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Proses sintesis bioplastik kulit pisang-PLA

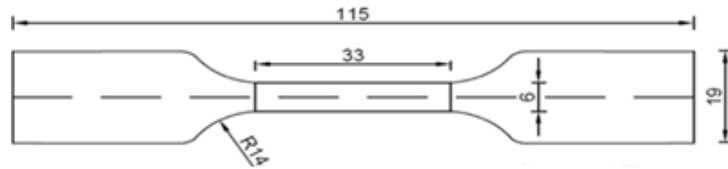
Tabel 1: Ukuran Mesh yang digunakan

Mesh (nominal)	Bukaan saringan (μm)	Karakteristik partikel
50	508	Kasar
100	245	Sedang
200	127	Halus

2.3 Metode Karakterisasi

2.3.1 Uji Tarik

Pengujian sifat mekanik bioplastik berbasis *Polylactic Acid* (PLA) dan pati kulit pisang dilakukan menggunakan metode uji tarik sesuai standar ASTM D638 tipe IV seperti gambar 4, yang umum digunakan untuk material polimer berdimensi tipis (Serfandi dkk., 2023). Spesimen dicetak berbentuk *dogbone* dengan panjang total ± 115 mm, lebar bagian tengah ± 6 mm, dan ketebalan $\pm 3-4$ mm. Setelah proses pencetakan, spesimen dikondisikan pada suhu ruang (± 23 °C) selama 24 jam untuk memastikan kestabilan termal dan kelembapan sebelum pengujian. Proses uji tarik dilaksanakan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan *crosshead speed* 5 mm/menit, di mana setiap variasi komposisi diuji sebanyak tiga kali untuk meningkatkan validitas data. Parameter yang dianalisis meliputi kekuatan tarik maksimum (*tensile strength*), modulus elastisitas (*Young's modulus*), dan elongasi putus (*elongation at break*). Metode serupa telah banyak diaplikasikan pada pengujian komposit PLA dengan bahan pengisi alami untuk mengkaji pengaruh ukuran partikel dan distribusi *filler* terhadap performa mekaniknya (Rai dkk., 2023; Vengadesan dkk., 2025).



Gambar 4: Cetakan ASTM D638 Tipe IV

Pengujian tarik dilakukan pada setiap spesimen untuk menentukan sifat mekanik material, khususnya kekuatan tarik (*tensile strength*) dan modulus elastisitas (*Young's modulus*). Nilai kekuatan tarik dihitung berdasarkan persamaan berikut:

Tensile strength/ yield ultimate

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

Di mana:

σ adalah tegangan tarik maksimum (MPa),

F_{\max} merupakan gaya tarik maksimum yang diterima spesimen sebelum terjadi luluh (*yield*) atau patah (*ultimate*) (N),

A_0 adalah luas penampang awal spesimen sebelum pengujian (mm^2).

Young's Modulus

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Di mana:

E adalah modulus elastisitas (MPa), yang merepresentasikan kekakuan material,

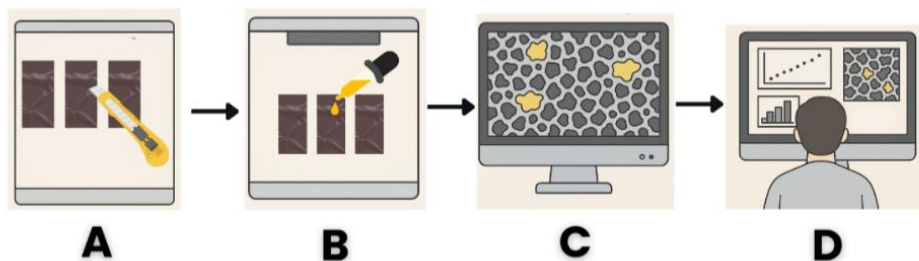
σ adalah tegangan tarik (MPa) pada daerah elastis linier,

ε adalah regangan (strain), yang didefinisikan sebagai perubahan panjang spesimen relatif terhadap panjang awalnya (tanpa satuan) pada daerah elastis.

Perhitungan modulus elastisitas dilakukan pada daerah linier kurva tegangan–regangan, sesuai dengan hukum Hooke, di mana material masih mengalami deformasi elastis dan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan (Faruk dkk., 2012).

2.3.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Karakterisasi morfologi permukaan dan patahan bioplastik berbasis PLA-tepung kulit pisang dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati distribusi partikel *filler*, keberadaan pori, aglomerasi, serta kualitas ikatan antarmuka matriks *filler* yang mempengaruhi sifat mekanik material (Rai dkk., 2023). Sampel yang diamati diambil dari permukaan patahan hasil uji tarik, kemudian dikeringkan dan dipatahkan secara kriogenik agar permukaan patahan tetap utuh dan representatif. Selanjutnya, permukaan sampel dilapisi tipis dengan logam konduktif (emas atau karbon) menggunakan *sputter coater* untuk menghindari efek *charging* selama proses pengamatan. Pengambilan sampel dilakukan pada perbesaran 5000 \times dan 10000 \times menggunakan detektor elektron sekunder (SE) dengan tegangan akselerasi 5-15 kV untuk memperoleh detail morfologi yang optimal (Joe dkk., 2025). Analisis hasil SEM difokuskan pada pemeriksaan ukuran dan dispersi partikel sesuai variasi mesh, deteksi porositas atau aglomerasi yang berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan, serta bukti adhesi antar fase matriks dan *filler*. Metode karakterisasi seperti ini telah digunakan secara luas dalam penelitian komposit PLA berbasis biomassa untuk mengaitkan hasil uji tarik dengan mekanisme kegagalan pada tingkat mikrostruktur (M. Kong dkk., 2023; Lingkungan dkk., 2025). Gambar 5. menampilkan proses pengujian SEM yang dilakukan secara hati-hati untuk memastikan hasil pengamatan akurat dan representatif.



Gambar 5: Proses pengujian SEM

2.4 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan campuran (*mixed methods*), yang menggabungkan metode kuantitatif dan kualitatif untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh variasi ukuran partikel tepung kulit pisang terhadap sifat mekanik komposit bioplastik berbasis *polylactic acid* (PLA). Pendekatan kuantitatif diterapkan melalui eksperimen laboratorium berupa pengujian tarik untuk mengevaluasi perubahan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi akibat perbedaan ukuran partikel *filler*. Data hasil pengujian dianalisis secara numerik untuk mengidentifikasi perbedaan dan kecenderungan antar variasi ukuran partikel. Sementara itu, pendekatan kualitatif dilakukan dengan menyajikan data dalam bentuk tabel dan grafik, serta didukung oleh analisis visual morfologi untuk memudahkan interpretasi hubungan antara ukuran partikel *filler* dan performa mekanik komposit.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data dan hasil pengujian tarik pada komposit bioplastik PLA-tepung kulit pisang dengan variasi ukuran partikel *filler* disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan proses analisis dan interpretasi. Penyajian visual ini bertujuan memberikan gambaran yang

jelas mengenai pengaruh ukuran partikel terhadap sifat mekanik, khususnya kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi. Selain itu, hasil karakterisasi morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) disajikan untuk mendukung analisis mekanik dengan menunjukkan kualitas dispersi *filler* dan interaksi antarmuka antara matriks PLA dan tepung kulit pisang. Uraian analisis dan pembahasan dari hasil uji tarik dan SEM, termasuk identifikasi kondisi dengan performa terbaik, dijelaskan secara rinci pada bagian berikutnya.

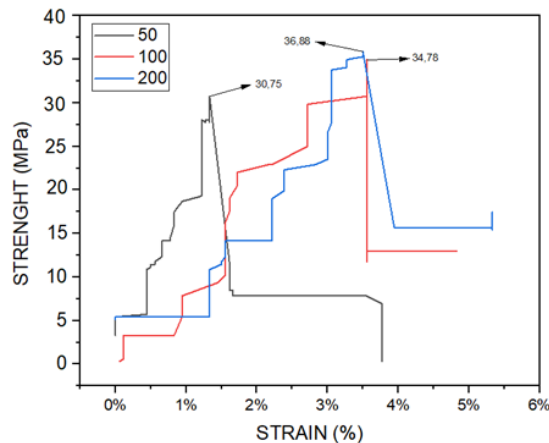
3.1 Uji Tarik

Dalam penelitian ini, komposit bioplastik berbasis asam polilaktat (PLA) yang diperkuat dengan tepung kulit pisang menunjukkan variasi kekuatan tarik yang berbeda, yang terutama dipengaruhi oleh perbedaan ukuran partikel *filler* yang digunakan dalam proses pembuatan komposit. Bisa dilihat dari gambar 6 sampel hasil patahan pengujian tarik.



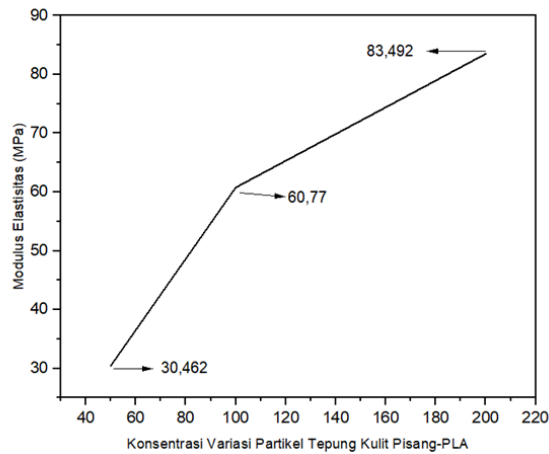
Gambar 6: Sampel hasil patahan pengujian tarik

Ukuran partikel tepung kulit pisang berpengaruh nyata terhadap nilai kekuatan tarik komposit bioplastik berbasis PLA. Partikel dengan ukuran lebih halus cenderung menghasilkan kekuatan tarik yang lebih unggul karena mampu meningkatkan luas permukaan kontak dan kualitas ikatan antarmuka antara *filler* dan matriks PLA. Sebaliknya, penggunaan partikel berukuran lebih kasar menyebabkan penurunan kekuatan tarik yang signifikan akibat sifat kaku dan elastisitas yang lebih rendah dari struktur lignoselulosa, serta terbatasnya mobilitas rantai polimer di dalam matriks komposit. Meskipun demikian, penambahan *filler* alami dari tepung kulit pisang tetap memberikan kontribusi positif terhadap aspek keberlanjutan, karena meningkatkan potensi biodegradabilitas dan menjadikan material lebih ramah lingkungan.



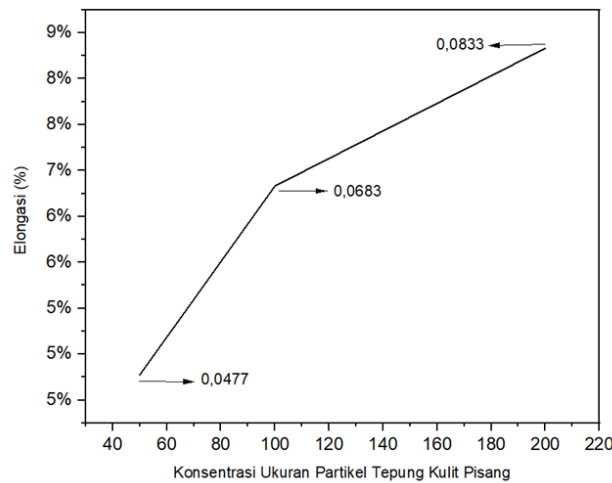
Gambar 7: Grafik Tegangan-Regangan variasi ukuran mesh tepung kulit pisang-PLA

Hasil grafik pada Gambar 7 uji tarik bioplastik berbasis PLA dengan variasi ukuran partikel tepung kulit pisang (mesh 50, 100, dan 200) menunjukkan perbedaan yang jelas pada nilai kekuatan tarik. Spesimen dengan ukuran partikel paling halus (mesh 200) menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 36,88 MPa, diikuti oleh mesh 100 sebesar 34,78 MPa, sedangkan spesimen dengan ukuran partikel paling kasar (mesh 50) menunjukkan nilai terendah sebesar 30,75 MPa. Peningkatan kekuatan tarik seiring dengan bertambahnya kehalusan ukuran partikel mengindikasikan bahwa partikel yang lebih halus memiliki luas permukaan kontak yang lebih besar dan distribusi yang lebih homogen di dalam matriks PLA, sehingga mampu meningkatkan kualitas ikatan antarmuka *filler-matriks*. Sebaliknya, partikel berukuran lebih kasar cenderung menyebabkan dispersi yang kurang merata dan potensi terbentuknya aglomerasi, yang berdampak pada penurunan performa mekanik komposit. Temuan ini sejalan dengan penelitian Dobrosielska dkk. (2022) yang melaporkan bahwa reduksi ukuran partikel *filler* pada komposit PLA berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik akibat distribusi partikel yang lebih seragam dan interaksi antarmuka yang lebih baik (Dobrosielska dkk., 2022).



Gambar 8: Grafik Modulus Elastisitas variasi ukuran mesh tepung kulit pisang-PLA

Hasil pada gambar 8 pengujian modulus elastisitas bioplastik berbasis PLA dengan variasi ukuran partikel tepung kulit pisang menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan semakin halus ukuran partikel *filler*. Spesimen dengan ukuran partikel paling kasar (mesh 50) menghasilkan nilai modulus elastisitas terendah sebesar 30,46 MPa, kemudian meningkat pada penggunaan partikel berukuran sedang (mesh 100) hingga 60,77 MPa, dan mencapai nilai tertinggi pada ukuran partikel paling halus (mesh 200) sebesar 83,49 MPa. Peningkatan modulus elastisitas ini mengindikasikan bahwa partikel *filler* yang lebih halus mampu meningkatkan kekakuan material melalui distribusi yang lebih homogen dan luas permukaan kontak yang lebih besar dengan matriks PLA, sehingga memperkuat ikatan antarmuka *filler* matriks. Kondisi tersebut membuat material lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi elastis. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa reduksi ukuran partikel *filler* alami pada komposit PLA dapat meningkatkan modulus elastisitas akibat perbaikan dispersi dan interaksi antarmuka yang lebih efektif (Rudolf, 2020).

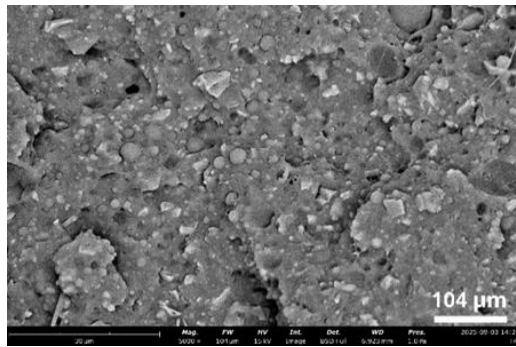


Gambar 9: Grafik Elongasi Konsentrasi variasi ukuran mesh tepung kulit pisang-PLA

Hasil gambar 9 diatas pengujian elongasi menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel tepung kulit pisang memberikan pengaruh yang nyata terhadap kemampuan regangan bioplastik berbasis PLA. Spesimen dengan ukuran partikel paling kasar (mesh 50) menunjukkan nilai elongasi terendah sebesar 4,77%, kemudian meningkat pada penggunaan partikel berukuran sedang (mesh 100) hingga 6,83%, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 8,33% pada ukuran partikel paling halus (mesh 200). Peningkatan elongasi ini mengindikasikan bahwa partikel *filler* yang lebih halus mampu terdispersi secara lebih homogen di dalam matriks PLA, sehingga memperbaiki ikatan antarmuka dan meningkatkan fleksibilitas material. Sebaliknya, penggunaan partikel berukuran lebih besar cenderung menyebabkan konsentrasi tegangan lokal yang membatasi deformasi plastis dan menurunkan kemampuan regangan material. Hasil ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang melaporkan bahwa reduksi ukuran partikel *filler* alami pada komposit PLA dapat meningkatkan elongasi akibat distribusi *filler* yang lebih merata dan interaksi matriks *filler* yang lebih efektif (Rudolf, 2020).

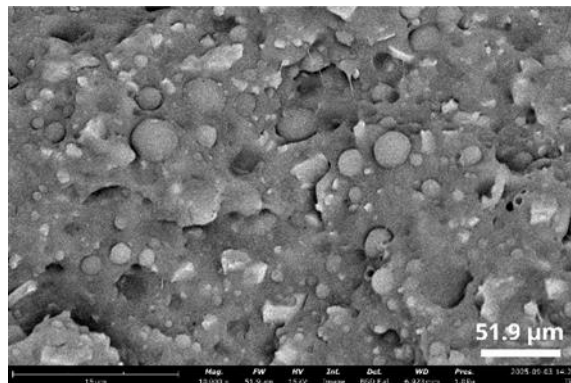
3.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Pengamatan morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan pada spesimen komposit bioplastik PLA-tepung kulit pisang dengan ukuran partikel mesh 200, yang berdasarkan hasil uji tarik menunjukkan performa mekanik terbaik dibandingkan variasi ukuran partikel lainnya. Analisis SEM ini bertujuan untuk mengonfirmasi secara mikrostruktural hubungan antara kualitas dispersi *filler* dan peningkatan sifat mekanik yang diperoleh, sebagaimana direkomendasikan dalam studi komposit biopolimer berbasis PLA.



Gambar 10: SEM 5000x Patahan Mesh 200

Pada gambar 10 pembesaran 5000 \times , permukaan patahan spesimen mesh 200 menunjukkan morfologi yang relatif homogen dengan distribusi partikel tepung kulit pisang yang merata di dalam matriks PLA. Tidak tampak adanya aglomerasi *filler* berukuran besar maupun rongga makroskopik yang signifikan. Struktur permukaan yang kompak ini mengindikasikan terjadinya transfer tegangan yang lebih efektif dari matriks ke *filler*, yang sejalan dengan peningkatan kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Fenomena ini sesuai dengan laporan Dobrosielska dkk. (2022) yang menyatakan bahwa distribusi *filler* yang homogen berperan penting dalam meningkatkan efisiensi transfer tegangan pada komposit PLA (Dobrosielska dkk., 2022).



Gambar 11: SEM 10000x Patahan Mesh 200

Pengamatan Gambar 11 diatas lebih detail pada pembesaran 10.000 \times memperlihatkan kondisi antarmuka matriks-*filler* yang lebih jelas. Partikel tepung kulit pisang pada spesimen mesh 200 tampak tertanam dengan baik di dalam matriks PLA, dengan batas antarmuka yang menyatu dan minim celah. Tidak ditemukannya fenomena *filler pull-out* maupun retakan mikro yang dominan menunjukkan adanya adhesi antarmuka yang kuat. Kondisi ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan elongasi, karena ikatan antarmuka yang baik memungkinkan deformasi plastis berlangsung lebih stabil tanpa kegagalan dini. Temuan ini sejalan dengan M. Kong dkk (2023) dan Rudolf (2020), yang melaporkan bahwa pengurangan ukuran partikel *filler* alami meningkatkan elongasi komposit PLA akibat peningkatan interaksi antarmuka dan homogenitas mikrostruktur (M. Kong dkk., 2023; Rudolf, 2020).

Korelasi yang konsisten antara hasil SEM pada pembesaran 5000 \times dan 10.000 \times dengan data uji tarik menegaskan bahwa ukuran partikel halus (mesh 200) menghasilkan dispersi *filler* yang optimal dan interaksi antarmuka yang kuat, sehingga mendukung peningkatan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi secara simultan. Dengan demikian, hasil SEM ini memberikan bukti mikrostruktural yang kuat bahwa spesimen mesh 200 merupakan kondisi paling optimal dalam menghasilkan performa mekanik terbaik pada komposit bioplastik berbasis PLA, sebagaimana juga disimpulkan dalam berbagai studi komposit biopolimer berbasis serat alami.

3.3 Analisis Data Statistik (Uji Anova)

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh variasi ukuran partikel tepung kulit pisang (mesh 50, 100, dan 200) terhadap sifat mekanik komposit bioplastik berbasis PLA. Data hasil uji tarik dianalisis menggunakan *one-way Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga replikasi ($n = 3$), dan hasil disajikan dalam bentuk nilai rata-rata \pm standar deviasi (SD). *Error bar* pada grafik menunjukkan standar deviasi, yang merepresentasikan tingkat variasi data antar spesimen uji ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2: Rata-rata \pm SD Sifat Mekanik

Ukuran Mesh	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation (%)
50	30,75 \pm 0,82	30,46 \pm 1,05	4,77 \pm 0,21
100	34,78 \pm 0,74	60,77 \pm 1,26	6,83 \pm 0,24
200	36,88 \pm 0,69	83,49 \pm 1,41	8,33 \pm 0,27

Tabel ini menunjukkan bahwa peningkatan kehalusan ukuran partikel tepung kulit pisang menghasilkan peningkatan bertahap pada kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi. Spesimen mesh 200 memberikan performa mekanik tertinggi dengan variasi data yang relatif kecil ditunjukkan pada Tabel 3-5.

Tabel 3: ANOVA Kekuatan Tarik

Sumber Variasi	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	59,42	2	29,71	48,63	0,000
Within Groups	3,67	6	0,61	-	-
Total	63,09	8	-	-	-

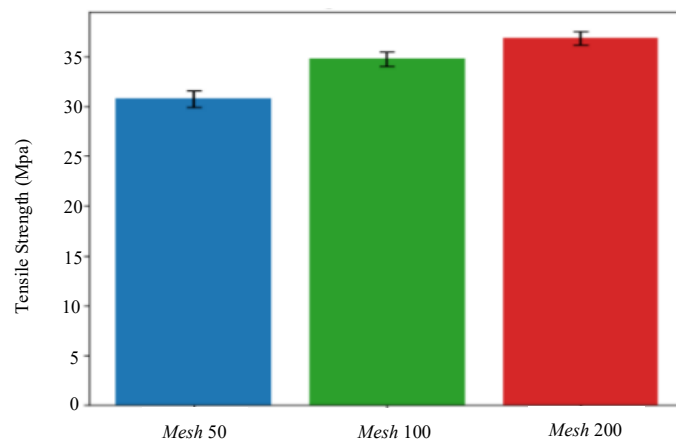
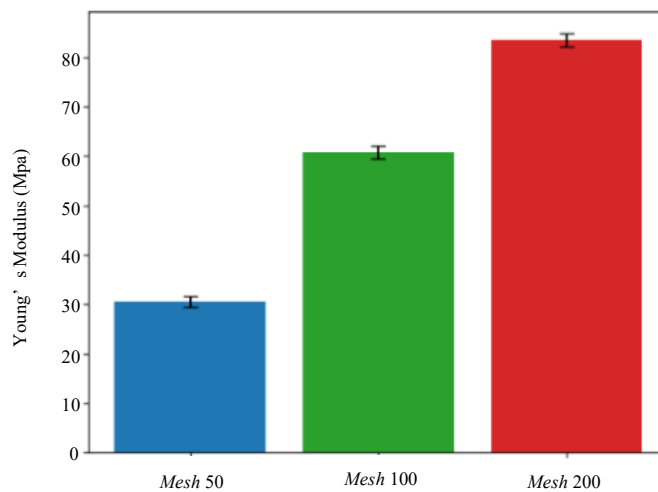
Tabel 4: ANOVA Modulus Elastisitas

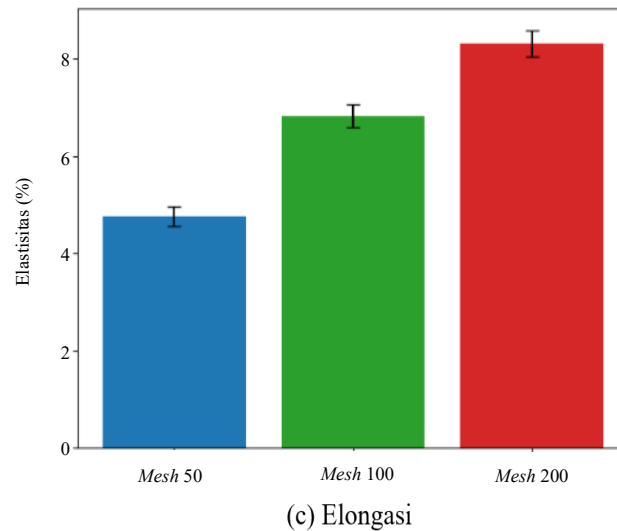
Sumber Variasi	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3968,14	2	1984,07	112,45	0,000
Within Groups	105,89	6	17,65	-	-
Total	4074,03	8	-	-	-

Tabel 5: ANOVA Elongasi

Sumber Variasi	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18,92	2	9,46	76,28	0,000
Within Groups	0,74	6	0,12	-	-
Total	19,66	8	-	-	-

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel tepung kulit pisang memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap seluruh parameter mekanik ($p < 0,05$). Hal ini mengonfirmasi bahwa perbedaan sifat mekanik yang diamati bukan disebabkan oleh variasi acak, melainkan oleh pengaruh nyata ukuran partikel *filler*. Gambar 12 menunjukkan sifat mekanik konsentrasi variasi ukuran mesh tepung kulit pisang-PLA : (a) Kekuatan Tarik, (b) Modulus Elastisitas, (c) Elongasi.

**(a) Kekuatan Tarik****(b) Modulus Elastisitas**



Gambar 12: Sifat mekanik konsentrasi variasi ukuran mesh tepung kulit pisang-pla : (a) kekuatan tarik, (b) modulus elastisitas, (c) elongasi

Grafik *bar error* menunjukkan tren peningkatan yang konsisten pada kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi seiring dengan penurunan ukuran partikel tepung kulit pisang dari mesh 50 ke mesh 200. Spesimen dengan ukuran partikel paling halus (mesh 200) menampilkan nilai mekanik tertinggi dengan variasi data yang relatif kecil, menandakan performa yang lebih stabil dan reproduksibel. Hasil ini selaras dengan analisis ANOVA yang menunjukkan pengaruh signifikan ukuran partikel terhadap seluruh parameter mekanik ($p < 0,05$).

4. KESIMPULAN

Variasi ukuran partikel tepung kulit pisang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik komposit bioplastik berbasis polylactic acid (PLA). Semakin halus ukuran partikel filler, semakin baik performa mekanik yang dihasilkan, yang ditunjukkan melalui peningkatan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran partikel berperan penting dalam meningkatkan luas permukaan kontak dan kualitas interaksi antarmuka antara filler dan matriks PLA. Pengamatan morfologi menggunakan SEM mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan dispersi filler yang lebih homogen serta ikatan antarmuka yang lebih baik pada ukuran partikel yang lebih halus. Kondisi ini memungkinkan transfer tegangan yang lebih efektif dan meningkatkan stabilitas deformasi material sebelum terjadi kegagalan. Analisis statistik melalui uji ANOVA mengonfirmasi bahwa perbedaan ukuran partikel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap seluruh parameter mekanik. Dengan demikian, penggunaan tepung kulit pisang berukuran partikel halus direkomendasikan sebagai filler alami yang efektif untuk meningkatkan performa mekanik komposit PLA sekaligus mendukung pengembangan material ramah lingkungan berbasis limbah pertanian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi D4 Teknik Mesin dan Fakultas Vokasi di Universitas Negeri Surabaya yang telah menyediakan fasilitas laboratorium dan sarana pendukung penelitian. Penulis juga mengapresiasi para dosen pembimbing dan teknisi laboratorium atas bimbingan, arahan, serta bantuan selama proses eksperimen dan pengujian. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan yang telah memberikan dukungan dan diskusi konstruktif sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Cree, D., Owuamanam, S., & Soleimani, M. (2023). Mechanical Properties of a Bio-Composite Produced from Two Biomaterials: Polylactic Acid and Brown Eggshell Waste Fillers. *Waste, 1*(3).
- Dobrosielska, M., Dobrucka, R., Brzakalski, D., Frydrych, M., Kozera, P., Wiczorek, M., Jałbrzykowski, M., Kurzydłowski, K. J., & Przekop, R. E. (2022a). Influence of Diatomaceous Earth Particle Size on Mechanical Properties of PLA/Diatomaceous Earth Composites. *Materials, 15*(10).
- Dobrosielska, M., Dobrucka, R., Brzakalski, D., Frydrych, M., Kozera, P., Wiczorek, M., Jałbrzykowski, M., Kurzydłowski, K. J., & Przekop, R. E. (2022b). Influence of Diatomaceous Earth Particle Size on Mechanical Properties of PLA/Diatomaceous Earth Composites. *Materials, 15*(10), 1–19.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 37, Issue 11).
- Joe, A. C., Tănase, M., Călin, C., Sîrbu, E. E., Banu, I., Bomboș, D., & Cuc, S. (2025). Pyrolyzed Biomass Filler for PLA-Based Food Packaging. *Polymers, 17*(10).
- Karne, H. U., Gaydhane, P., Gohokar, V., Deshpande, K., Dunung, P., & Bendkule, G. (2023). Synthesis of biodegradable material from banana peel. *Materials Today: Proceedings*.

- Kong, F., Nie, B., Han, C., Zhao, D., Hou, Y., & Xu, Y. (2022). Flame Retardancy and Thermal Property of Environment-Friendly Poly(lactic acid) Composites Based on Banana Peel Powder. *Materials*, 15(17).
- Kong, M., Qin, Z., Zhang, P., Xie, G., Wang, H., Wang, J., Guan, F., Yang, W., & Qiu, Z. (2023). Study on modified poplar wood powder/poly(lactic acid) high toughness green 3D printing composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 228.
- Lendvai, L., Omasova, M., Patnaik, A., Dogossy, G., & Singh, T. (2023). Valorization of Waste Wood Flour and Rice Husk in Poly(Lactic Acid)-Based Hybrid Biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(2), 541–551.
- Lingkungan, J. I., Sari, N. N., & Saridewi, N. (2025). Pengembangan Bioplastik Berbahan Dasar Pati Kulit Pisang Kepok Menggunakan Nanofiber Selulosa Kulit Daun Lidah Buaya sebagai Filler. 23(4), 1066–1074.
- Miller, K., Reichert, C. L., Loeffler, M., & Schmid, M. (2024). Effect of Particle Size on the Physical Properties of PLA/Potato Peel Composites. *Compounds*, 4(1).
- Rai, P., Mehrotra, S., Gautam, K., Kar, A. K., Saxena, A., Patnaik, S., Anbumani, S., Pandey, A., Priya, S., & Sharma, S. K. (2023). Poly(lactic acid)/tapioca starch/banana peel-based material for colorimetric and electrochemical biosensing applications. *Carbohydrate Polymers*, 302.
- Rudolf, H. (2020). Composites and copolymers containing redox-active molecules and intrinsically conducting polymers as active masses for supercapacitor electrodes—an introduction. *Polymers*, 12(8).
- Şen, İ., & Sever, K. (2025). Production and characterization of agricultural waste natural fiber-filled poly(lactic acid) composites. *Polymer Bulletin*, 82(9), 4051–4074.
- Serfandi, D. N., Setyarini, P. H., Purnami, P., & Sulistyono, S. (2023). Karakterisasi Biodegradasi Pada Komposit Polymer Poly(lactid Acid (Pla) Dengan Penambahan Chitosan Dan Hydroxyapatite. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(3), 953–962.
- Vengadesan, E., Morakul, S., Muralidharan, S., Pullala, P. K., Alarifi, A., & Arunkumar, T. (2025). Enhancement of poly(lactic acid) (PLA) with hybrid biomass-derived rice husk and biocarbon fillers: a comprehensive experimental study. *Discover Applied Sciences*, 7(3).
- Verma, P., Rani, R., Das, D., Rai, K. K., Gogoi, P., & Badwaik, L. S. (2024). Transformation of banana peel into biodegradable film added with starch and carboxymethyl cellulose and its characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37.