

Korelasi Sifat Mekanik dan Morfologi Permukaan pada Biokomposit Berpenguat Serat Selulosa Rebung dengan Variasi Matriks Pati Komersial

Nita Levina Riry^{*1}, Putu Hadi Setyarini², Mega Nur Sasongko³

^{1,2,3} (Program Studi Teknik Mesin Universitas Brawijaya)

Email: ¹nitalevina2@student.ub.ac.id, ²putu_hadi@ub.ac.id, ³megasasongko@ub.ac.id

^{*}Penulis Korespondensi

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi matriks pati komersial terhadap sifat mekanik dan morfologi permukaan biokomposit film berpenguat serat selulosa rebung. Lima jenis tepung komersial — tepung jagung, tepung sagu, tepung singkong, tepung hunkwe (kacang hijau), dan tepung kentang — digunakan sebagai matriks, dikombinasikan dengan serat rebung sebagai penguat dan gliserol sebagai plasticizer. Biokomposit film difabrikasi melalui metode *solution casting*. Pengujian sifat mekanik dilakukan berdasarkan standar ASTM D882, sedangkan karakterisasi morfologi permukaan menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) pada perbesaran 500×, 1000×, dan 3000×. Hasil menunjukkan nilai tensile strength berkisar 2,86 MPa (tepung sagu) hingga 6,53 MPa (tepung kentang). Analisis FESEM mengkonfirmasi bahwa perbedaan performa mekanik berkorelasi dengan densitas dan distribusi serat rebung, kualitas ikatan antarmuka serat-matriks, serta karakteristik granula pati tidak tergelatinisasi. Penelitian ini membuktikan bahwa pemilihan jenis matriks pati merupakan faktor kritis dalam optimasi performa biokomposit film berbasis pati.

Kata kunci: biokomposit film, FESEM, pati komersial, serat rebung, *tensile strength*, *solution casting*

Abstract

This study investigates the effect of commercial starch matrix variation on the mechanical properties and surface morphology of bamboo shoot cellulose fiber-reinforced biocomposite films. Five commercial flours — corn, sago, cassava, mung bean (hunkwe), and potato — were used as matrices combined with bamboo shoot fiber reinforcement and glycerol plasticizer. Films were fabricated via solution casting. Tensile testing followed ASTM D882 and surface morphology was analyzed using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) at 500×, 1000×, and 3000×. Tensile strength ranged from 2.86 MPa (sago) to 6.53 MPa (potato flour). FESEM confirmed that mechanical performance differences correlate with fiber density and distribution, fiber-matrix interfacial bonding quality, and ungelatinized starch granule characteristics. This study demonstrates that starch matrix selection is critical for optimizing starch-based biocomposite film performance.

Keywords: *biocomposite film, bamboo shoot fiber, commercial starch, FESEM, tensile strength, solution casting.*

I. PENDAHULUAN

Akumulasi limbah plastik sintetis berbasis fosil merupakan salah satu tantangan lingkungan paling kritis saat ini. Produksi plastik global telah mencapai lebih dari 400 juta ton per tahun dan diproyeksikan terus meningkat, dengan sebagian besar berakhir di tempat pembuangan akhir atau lingkungan perairan akibat sifatnya yang sulit terurai secara biologis [1]. Kondisi ini mendorong percepatan riset pengembangan material polimer alternatif yang bersumber dari biomassa terbarukan, dapat terdegradasi secara alami, dan memiliki sifat mekanik yang memadai untuk aplikasi praktis [2][14].

Pati (starch) merupakan salah satu biopolimer paling menjanjikan sebagai substituen plastik konvensional. Pati tersedia melimpah dari berbagai sumber pertanian, bersifat biodegradable, memiliki harga yang terjangkau, serta dapat diproses menjadi film tipis melalui berbagai metode fabrikasi [4]. Dalam konteks Indonesia yang kaya akan sumber pati lokal — jagung, sagu, singkong, kacang-kacangan, dan kentang — pemanfaatan tepung komersial sebagai matriks biokomposit memiliki nilai strategis tinggi, baik dari sisi keberlanjutan maupun nilai tambah produk agroindustri.

Namun demikian, bioplastik berbasis pati menghadapi kelemahan mendasar yaitu sifat mekanik yang lemah dan sensitivitas tinggi terhadap kelembaban. Nilai tensile strength *thermoplastic starch* (TPS) murni umumnya hanya berkisar 2–5 MPa — jauh di bawah polietilena konvensional (~15–30 MPa)[3]. Solusi yang telah banyak dikaji adalah penambahan serat alam sebagai penguat (*reinforcement*) untuk membentuk biokomposit. Penambahan serat alam terbukti meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan stabilitas dimensi film pati melalui mekanisme transfer beban dari matriks ke serat [5][11].

Serat rebung (serat dari bambu muda) merupakan kandidat penguat yang menarik karena memiliki kandungan selulosa tinggi, densitas rendah, dan ketersediaan melimpah di Asia Tenggara [6]. Selulosa serat bambu dapat membentuk ikatan hidrogen dengan gugus hidroksil matriks pati, menghasilkan kompatibilitas kimia yang baik antar komponen[15]. Gliserol digunakan sebagai plasticizer untuk mengurangi kerapuhan film TPS dengan cara meningkatkan mobilitas rantai polimer melalui reduksi ikatan hidrogen intermolekul [8].

Terdapat kesenjangan pengetahuan (*knowledge gap*) yang signifikan dalam literatur: sebagian besar penelitian biokomposit berbasis pati hanya menggunakan satu jenis matriks pati tertentu [7][10][12], sehingga tidak memungkinkan perbandingan sistematis tentang bagaimana karakteristik kimia dan fisik yang berbeda dari tiap jenis pati memengaruhi performa biokomposit. Pemahaman tentang mekanisme kegagalan dan keberhasilan ikatan antarmuka serat-matriks untuk masing-masing jenis pati juga masih terbatas[10].

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi pengaruh variasi lima jenis matriks pati komersial terhadap kekuatan tarik biokomposit film berpenguat serat rebung, dan (2) mengkonfirmasi mekanisme kegagalan dan keberhasilan ikatan antarmuka serat-matriks melalui analisis mikro FESEM. Hasil penelitian diharapkan memberikan panduan berbasis data tentang pemilihan matriks pati yang optimal untuk aplikasi biokomposit film [2][7].

II. METODE PENELITIAN

2.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi lima jenis tepung komersial sebagai matriks yaitu tepung jagung, tepung sagu, tepung singkong, tepung hunkwe (kacang hijau), dan tepung kentang. Serat rebung digunakan sebagai penguat komposit, dan gliserol digunakan sebagai plasticizer untuk meningkatkan fleksibilitas film. Semua bahan diperoleh dari pasar komersial dan digunakan tanpa modifikasi kimia lebih lanjut.

2.2 Preparasi Serat Rebung

Selulosa rebung diekstraksi melalui serangkaian proses preparasi. Pertama, rebung segar dipotong kecil-kecil kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam. Rebung kering selanjutnya dihaluskan menggunakan blender dan diayak menggunakan ayakan mesh 60 untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Kedua, delignifikasi dilakukan menggunakan larutan NaOH 5% (b/v). Serbuk rebung direndam dalam larutan NaOH 5% kemudian dipanaskan di atas hot plate pada suhu 80°C sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer. Larutan hasil delignifikasi disaring dan residu selulosa dicuci berulang kali dengan air suling hingga pH netral untuk menghilangkan sisa alkali [15]. Ketiga, proses bleaching dilakukan menggunakan larutan H₂O₂ 4% (v/v) untuk menghilangkan sisa lignin dan memutihkan selulosa. Selulosa hasil bleaching dicuci dengan air suling, dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C, kemudian dihaluskan kembali untuk memperoleh selulosa rebung siap pakai sebagai penguat biokomposit. Proses alkalisasi (NaOH) dan bleaching (H₂O₂) merupakan metode standar ekstraksi selulosa dari biomassa lignoselulosa yang terbukti efektif menghilangkan lignin dan hemiselulosa sekaligus meningkatkan kemurnian dan kristalinitas selulosa [15].

2.3 Fabrikasi Biokomposit Film (*Solution Casting*)

Biokomposit film difabrikasi menggunakan metode *solution casting* yang telah banyak digunakan dalam fabrikasi biokomposit berbasis pati[4][8]. Tepung komersial didispersikan dalam air suling, kemudian dipanaskan di atas *hot plate stirrer* pada suhu 70–80°C sambil diaduk konstan hingga gelatinisasi sempurna. Gliserol ditambahkan sebagai plasticizer pada konsentrasi 30% (b/b terhadap pati kering)[3]. Serat rebung dicampurkan ke dalam larutan tergelatinisasi dan diaduk hingga homogen. Campuran dituang ke cetakan kaca datar berukuran seragam dan dikeringkan dalam oven pada suhu 50°C selama 24 jam. Film dikondisikan pada suhu ruang dengan kelembaban relatif 50±5% selama 48 jam sebelum pengujian[11].

2.4 Pengujian Tarik (ASTM D882)

Pengujian sifat tarik dilakukan sesuai standar ASTM D882 yang dirancang khusus untuk spesimen film tipis dan lembaran plastik[7]. Spesimen dipotong dalam bentuk *dog-bone* dengan lebar gauge 10 mm. Pengujian dilakukan dengan dua spesimen per sampel (n = 2). Nilai tensile strength (σ) dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma = F / (w \times t)$$

di mana F adalah gaya maksimum (N), w adalah lebar gauge (10 mm), dan t adalah tebal spesimen (mm) yang diukur menggunakan mikrometer di tiga titik sepanjang gauge length kemudian dirata-rata.

2.5 Analisis Morfologi (FESEM)

Karakterisasi morfologi permukaan dilakukan menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) dengan instrumen FEI Quanta FEG 650 pada tegangan akselerasi 10 kV. Sampel dilapisi gold-palladium melalui proses *sputter coating* sebelum pengamatan untuk mencegah *charging effect* pada material non-konduktif[13]. Pengamatan dilakukan pada sisi halus (kontak cetakan) dan sisi kasar (menghadap udara) pada perbesaran 500×, 1000×, dan 3000×.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

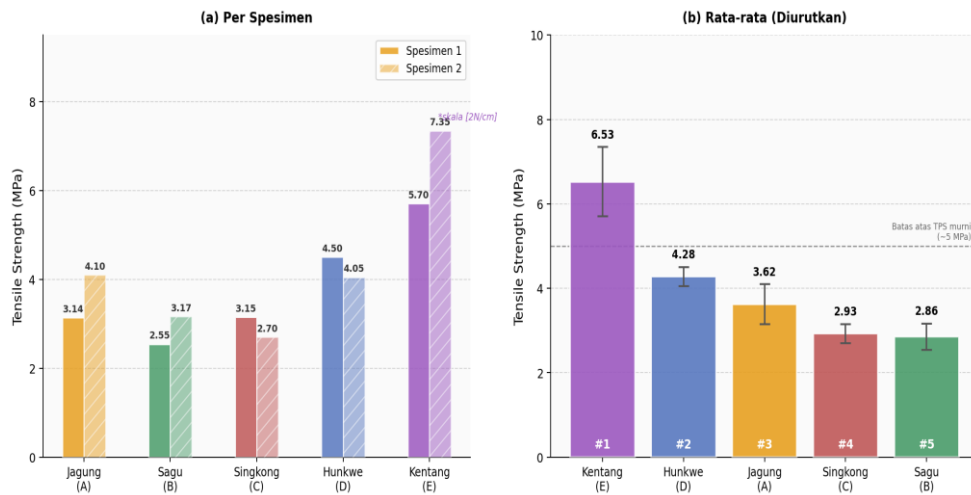
3.1 Hasil Uji Tarik

Hasil pengujian tarik kelima sampel biokomposit film disajikan pada Tabel 1. Nilai *tensile strength* rata-rata berkisar antara 2,86 MPa hingga 6,53 MPa, menunjukkan bahwa variasi jenis matriks pati memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa mekanik biokomposit film.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Tensile strength* Biokomposit Film Lima Variasi Matriks Pati

Sampel	Matriks Pati	Sp. 1 (MPa)	Sp. 2 (MPa)	Rata-rata (MPa)	Tebal Rata-rata (μm)	Ranking
A	Jagung	3,14	4,10	3,62	143,5	#3
B	Sagu	2,55	3,17	2,86	199,0	#5
C	Singkong	3,15	2,70	2,93	157,5	#4
D	Hunkwe	4,50	4,05	4,28	116,5	#2
E	Kentang	5,70	7,35	6,53	215,0	#1

*Sampel E menggunakan skala mesin [2N/cm] yang berubah otomatis, dikonfirmasi laboran



Gambar 1. (a) Tensile strength per spesimen dan (b) rata-rata tensile strength kelima sampel biokomposit film (ASTM D882, $n=2$)

Tepung kentang (Sampel E) menghasilkan *tensile strength* tertinggi sebesar 6,53 MPa, unggul 52% dari nilai tertinggi kedua yaitu tepung hunkwe (4,28 MPa). Urutan lengkap dari tertinggi ke terendah adalah: kentang (6,53 MPa) > hunkwe (4,28 MPa) > jagung (3,62 MPa) > singkong (2,93 MPa) > sagu (2,86 MPa). Seluruh nilai berada dalam atau sedikit di atas rentang TPS murni tanpa serat dari literatur (2–5 MPa) [1], mengindikasikan bahwa serat rebung telah memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan tarik, meskipun belum optimal.

Temuan penting lain adalah bahwa ranking *tensile strength* (MPa) berbeda dari ranking gaya absolut (N/cm). Sampel B (sagu) yang memiliki gaya absolut tertinggi kedua turun ke posisi terendah setelah dikonversi ke tegangan, karena memiliki ketebalan film tertinggi (199 μm). Sebaliknya, sampel D (hunkwe) naik dari posisi keempat dalam gaya ke posisi kedua dalam tegangan karena filmnya paling tipis (116,5 μm). Hal ini menegaskan pentingnya normalisasi dengan luas penampang dalam membandingkan performa mekanik material.

Variabilitas antar spesimen paling rendah tercatat pada sampel D (hunkwe, selisih 10,6%) dan sampel C (singkong, 15,6%), mengindikasikan proses fabrikasi yang paling reproducible untuk kedua jenis tepung ini. Variabilitas tertinggi terdapat pada sampel E (kentang, 25,1%) dan sampel A (jagung, 26,3%), yang berkorelasi dengan distribusi serat rebung yang tidak merata sebagaimana terkonfirmasi melalui analisis FESEM.

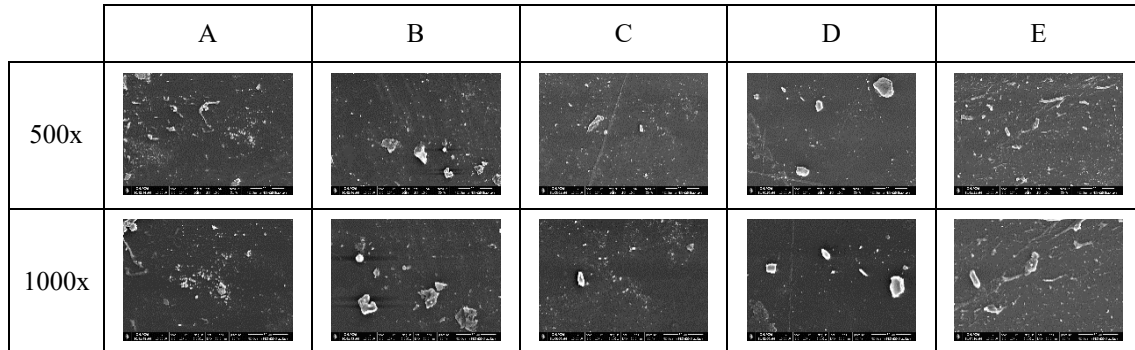
3.2 Analisis Morfologi Permukaan (FESEM)

Analisis FESEM dilakukan untuk mengkonfirmasi secara visual mekanisme yang menjelaskan perbedaan *tensile strength* antar sampel. Pengamatan difokuskan pada dua aspek utama: distribusi serat rebung dan kualitas ikatan antarmuka serat-matriks.

3.2.1 Morfologi Sisi Halus

Gambar 2 menampilkan hasil FESEM sisi halus kelima sampel pada perbesaran 500 $\times$ dan 1000 $\times$. Perbedaan yang paling mencolok adalah pada Sampel E (kentang) yang memperlihatkan densitas serat rebung jauh lebih tinggi dibandingkan keempat sampel lainnya pada perbesaran 500 $\times$. Serat-serat tersebar merata dengan orientasi yang sebagian besar sejajar, membentuk jaringan penguat yang terstruktur. Sebaliknya, Sampel C (singkong) menampilkan sisi halus yang paling bersih dan sedikit serat, sementara Sampel A (jagung) menunjukkan distribusi serat yang tidak merata — lebih padat di satu sisi dibandingkan sisi lainnya.

Pada perbesaran 1000 $\times$, teridentifikasi karakteristik granula pati yang khas untuk masing-masing tepung: Sampel A (jagung) memperlihatkan kluster partikel berbentuk prisma/kristal yang diduga merupakan granula pati jagung tidak tergelatinisasi; Sampel B (sagu) memperlihatkan granula berbentuk bulat sempurna khas pati sagu; dan Sampel D (hunkwe) menampilkan granula oval besar dengan densitas elektron tinggi yang konsisten dengan karakteristik pati kacang hijau.



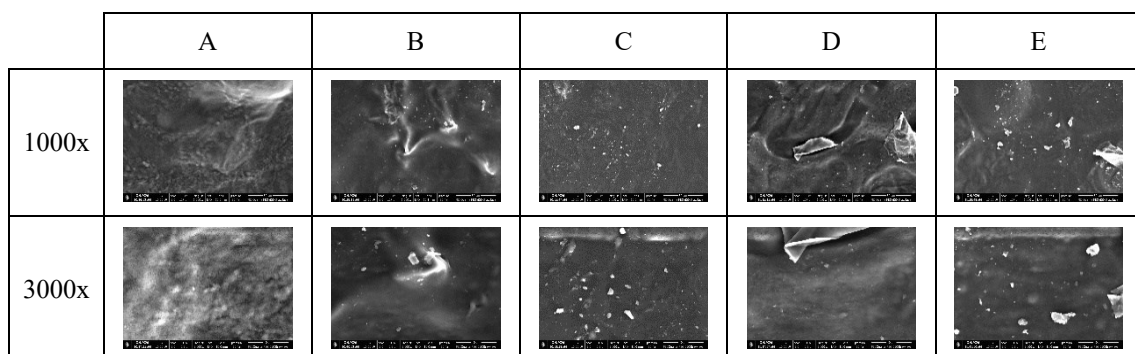
Gambar 2. Morfologi sisi halus kelima sampel biokomposit film pada perbesaran 500 $\times$ (baris atas) dan 1000 $\times$ (baris bawah)

3.2.2 Morfologi Sisi Kasar dan Ikatan Antarmuka

Analisis FESEM sisi kasar pada perbesaran 1000 $\times$ mengungkap perbedaan kualitas ikatan antarmuka serat-matriks yang sangat signifikan antar sampel. Sampel D (hunkwe) menampilkan ikatan antarmuka terbaik: serat rebung tertanam rapi di dalam matriks dengan depresi yang menunjukkan matriks memeluk serat dengan erat, tanpa tanda-tanda *pull-out* yang signifikan. Kondisi serupa juga terlihat pada Sampel E (kentang) di perbesaran 3000 $\times$, di mana serat tertanam sempurna dalam matriks yang padat dan kompak.

Sebaliknya, Sampel B (sagu) menampilkan fenomena *pull-out* ringan pada perbesaran 1000 $\times$ — serat mencabut dari matriks meninggalkan kavitas — yang mengindikasikan kualitas ikatan antarmuka yang belum optimal. Fenomena ini, dikombinasikan dengan keberadaan granula bulat tidak terlarut yang bertindak sebagai *stress concentrator*, menjelaskan mengapa *tensile strength* sagu merupakan yang terendah (2,86 MPa) meskipun memiliki ketebalan film terbesar.

Pada perbesaran 3000 $\times$, Sampel A (jagung) dan D (hunkwe) memperlihatkan *micro-cracks* halus yang merata di matriks, mengindikasikan sifat material yang lebih rigid/brittle. Sementara Sampel B (sagu) tidak menampilkan *micro-cracks*, mencerminkan sifat matriks yang lebih ductile — konsisten dengan durasi uji hingga patah yang paling panjang pada data tensile.



Gambar 3. Morfologi sisi kasar kelima sampel pada perbesaran 1000 $\times$ (baris atas) dan 3000 $\times$ (baris bawah)

3.3 Korelasi *Tensile strength* dengan Morfologi FESEM

Integrasi data *tensile strength* dengan hasil FESEM menghasilkan pemahaman mekanistik yang komprehensif. Tabel 2 merangkum korelasi antara parameter morfologi utama yang teridentifikasi dari FESEM dengan nilai *tensile strength* masing-masing sampel.

Tabel 2. Korelasi Morfologi FESEM dengan *Tensile strength* Biokomposit Film

Sampel	Matriks	TS (MPa)	Distribusi Serat	Ikatan Serat-Matriks	Granula Pati	Micro-cracks
A	Jagung	3,62	Tidak merata	Kurang optimal	Prismatik, sebagian tak larut	Ada, kasar
B	Sagu	2,86	Rendah	Pull-out ringan	Bulat sempurna (stress conc.)	Tidak ada
C	Singkong	2,93	Sangat sedikit	Cukup baik	Oval kecil, merata	Tidak ada
D	Hunkwe	4,28	Merata	Terbaik, no pull-out	Oval besar, padat	Halus, merata
E	Kentang	6,53	Tertinggi, merata	Sangat baik, no pull-out	Oval kecil, merata	Sangat sedikit

Berdasarkan analisis korelasi pada Tabel 2, tiga faktor morfologi utama yang menentukan *tensile strength* biokomposit film ini dapat diidentifikasi. Pertama, densitas dan distribusi serat rebung dalam matriks berkorelasi positif dengan *tensile strength*. Sampel E dengan densitas serat tertinggi menghasilkan TS terbesar (6,53 MPa), sementara sampel C dengan serat paling sedikit di sisi halus menunjukkan nilai rendah (2,93 MPa). Serat yang tersebar merata menghasilkan transfer tegangan lebih efisien dari matriks ke serat sesuai prinsip *rule of mixtures* [2].

Kedua, kualitas ikatan antarmuka serat-matriks merupakan faktor yang sangat signifikan. Sampel tanpa fenomena *pull-out* (D dan E) menghasilkan TS lebih tinggi dibandingkan sampel dengan *pull-out* (B). Ikatan yang kuat antara serat selulosa rebung dan matriks pati difasilitasi oleh interaksi gugus hidroksil (-OH) pada keduanya melalui ikatan hidrogen [3]. Kandungan protein tepung kacang hijau pada sampel D diduga berperan sebagai *compatibilizer* alami yang memperkuat ikatan ini, sebagaimana dikonfirmasi oleh data FTIR.

Ketiga, karakteristik granula pati yang tidak tergelatinisasi sempurna berpengaruh negatif terhadap TS. Granula bulat tidak terlarut pada sampel B bertindak sebagai *stress concentrator* — titik konsentrasi tegangan yang memulai retakan lebih awal saat material dibebani. Granula prismatik pada sampel A memiliki efek serupa meski lebih kecil. Sebaliknya, sampel E memperlihatkan distribusi granula oval kecil yang merata sehingga gangguan terhadap kontinuitas matriks minimal.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Jenis matriks pati komersial berpengaruh signifikan terhadap *tensile strength* biokomposit film berpenguat serat rebung. Nilai *tensile strength* berkisar antara 2,86 MPa (tepung sagu) hingga 6,53 MPa (tepung kentang), dengan urutan: kentang > hunkwe > jagung > singkong > sagu.
2. Analisis FESEM mengkonfirmasi bahwa perbedaan *tensile strength* dikorelasikan dengan tiga faktor morfologi utama: (1) densitas dan distribusi serat rebung dalam matriks, (2) kualitas ikatan antarmuka serat-matriks, dan (3) karakteristik granula pati yang tidak tergelatinisasi sempurna.
3. Tepung kentang menghasilkan performa terbaik karena memiliki kombinasi densitas serat tertinggi, distribusi serat paling merata, dan ikatan antarmuka yang kuat tanpa fenomena pull-out.
4. Tepung sagu menghasilkan performa terendah akibat adanya granula bulat tidak terlarut sebagai stress concentrator dan pull-out serat yang mengindikasikan ikatan antarmuka yang lemah.

5. Tepung hunkwe (kacang hijau) menduduki peringkat kedua dengan konsistensi data terbaik (variasi antar spesimen 10,6%), kemungkinan akibat peran protein kacang hijau sebagai compatibilizer alami antara pati dan serat selulosa.

REFERENSI

- [1] Geyer, R., Jambeck, J.R., & Law, K.L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [2] Nair, S.B., Pillai, P.K.S., & Thomas, S. (2025). Starch-derived bioplastics: processing, properties, and applications. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 9, 100621.
- [3] Averous, L., & Boquillon, N. (2004). Biocomposites based on plasticized starch: thermal and mechanical behaviours. *Carbohydrate Polymers*, 56(2), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.11.015>
- [4] Mali, S., Grossmann, M.V.E., & Yamashita, F. (2010). Starch films: production, properties and potential of utilization. *Semina: Ciências Agrárias*, 31(1), 137–156.
- [5] Wollerdorfer, M., & Bader, H. (1998). Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymers. *Industrial Crops and Products*, 8(2), 105–112. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)10015-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)10015-2)
- [6] Osorio, M., et al. (2021). Bamboo fiber reinforced composites: a review of properties and applications. *Composites Part B: Engineering*, 223, 109088.
- [7] Hazrol, M.D., et al. (2022). Corn starch biocomposite reinforced with kenaf fiber: Effect of fiber loading on mechanical and physical properties. *Polymers*, 14(3), 491. <https://doi.org/10.3390/polym14030491>
- [8] Mlalila, N., et al. (2018). Biobased packaging materials: opportunities and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 16, 1–10.
- [9] Le Corre, D., Bras, J., & Dufresne, A. (2010). Starch nanoparticles: A review. *Biomacromolecules*, 11(5), 1139–1153. <https://doi.org/10.1021/bm901428y>
- [10] Kibet, J.K., et al. (2025). Natural fiber reinforced thermoplastic starch biocomposites: a review. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [11] Müller, C.M.O., Laurindo, J.B., & Yamashita, F. (2009). Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films. *Carbohydrate Polymers*, 77(2), 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.014>
- [12] Santana, R.F., et al. (2023). Cassava starch-based biocomposite films: effect of plasticizer and fiber reinforcement. *Food Packaging and Shelf Life*.
- [13] Maran, J.P., et al. (2014). Influence of natural vermiculite on mechanical, optical and water vapor barrier properties of cassava starch composite films. *Carbohydrate Polymers*, 101, 362–368.
- [14] Peelman, N., et al. (2013). Application of bioplastics for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 32(2), 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.003>
- [15] Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883–2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>