

Karakteristik Mekanik dan Morfologi Komposit Polimer Berpenguat Selulosa Batang Rambutan (*Nephelium lappaceum*) Akibat Perlakuan Alkalisasi

Aditya Budi Sasongko¹, Sis Nanda Kus Andrianto^{2*}, Jibril Maulana³

^{1,2*,3} Prodi Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur Universitas Negeri Malang

*Email: sis.nanda.fv@um.ac.id

Abstract

Researchers continue to develop natural fibers as a reinforcement in polymer composites as an eco-friendly alternative to synthetic fibers. This study investigates the potential of rambutan stem fiber waste as a reinforcing material within a polymer matrix. A primary challenge in using natural fibers is their hydrophilic nature, which results in suboptimal interfacial bonding with the matrix. To address this issue, we surface-modified the fibers by alkalization with a 5% sodium hydroxide (NaOH) solution for 2 hours. Material characterization included chemical composition analysis using the Van Soest method, tensile strength testing of composite specimens, and morphological observation of fracture surfaces using a Scanning Electron Microscope (SEM). Van Soest analysis revealed a significant reduction in lignin content from 25.38% to 13.23% following the alkalization process, thereby increasing fiber surface roughness. Mechanical testing demonstrated that composites reinforced with alkali-treated fibers exhibited higher tensile strength compared to those reinforced with untreated fibers. SEM observations confirmed improved interfacial bonding between the fiber and the matrix, evidenced by reduced fiber pull-out at the fracture sites. These findings indicate that chemical modification of rambutan stem fibers enables the production of eco-friendly composites with enhanced mechanical performance.

Keywords: Rambutan stem fibers, alkali treatment, polymer composites, tensile test, morphology

Abstrak

Pemanfaatan serat alam sebagai bahan penguat pada komposit polimer terus dikembangkan sebagai alternatif pengganti serat sintetis yang kurang ramah terhadap lingkungan. Penelitian ini mengkaji potensi limbah serat batang rambutan sebagai material penguat dalam matriks polimer. Salah satu kendala utama penggunaan serat alam adalah sifatnya yang hidrofilik sehingga ikatan antarmuka dengan matriks menjadi kurang optimal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan modifikasi permukaan melalui perlakuan alkalisasi menggunakan larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 5% selama 2 jam. Karakterisasi material meliputi analisis komposisi kimia menggunakan metode Van Soest, pengujian kekuatan tarik spesimen komposit, serta pengamatan morfologi hasil patahan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil analisis *Van Soest* menunjukkan adanya penurunan kadar lignin yang signifikan dari 25,38% menjadi 13,23% setelah proses alkalinisasi, sehingga meningkatkan kekasaran permukaan serat. Pengujian mekanik memperlihatkan bahwa komposit yang diperkuat dengan serat hasil perlakuan alkali memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit serat tanpa perlakuan. Pengamatan SEM juga mengonfirmasi adanya peningkatan ikatan antarmuka antara serat dan matriks, yang ditandai dengan berkurangnya fenomena *fiber pull-out* pada area patahan. Temuan ini menunjukkan bahwa modifikasi kimia pada serat batang rambutan mampu menghasilkan komposit ramah lingkungan dengan performa mekanik yang lebih baik.

Kata kunci: Serat batang rambutan, perlakuan alkali, komposit polimer, uji tarik, morfologi

1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan ilmu dan teknologi material semakin mengarah pada inovasi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penggunaan material komposit konvensional yang diperkuat serat sintesis, seperti serat kaca (*glass fiber*), mulai mendapat perhatian karena proses produksinya menghasilkan jejak karbon yang relatif tinggi serta sulit terdegradasi secara alami setelah masa pakainya berakhir [1]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan biokomposit berbasis serat alam sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan. Selain memiliki sifat biodegradable dan lebih ramah lingkungan, serat alam juga menawarkan berbagai keunggulan, seperti densitas yang rendah, biaya produksi yang lebih ekonomis, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah, khususnya di negara-negara beriklim tropis [2].

Indonesia sebagai salah satu negara penghasil buah tropis terbesar menghasilkan limbah pertanian dalam jumlah yang sangat besar setiap tahunnya [3]. Salah satu sumber limbah tersebut berasal dari pohon rambutan (*Nephelium lappaceum*), terutama dari kegiatan pemangkasan rutin dan peremajaan tanaman yang menghasilkan sisa berupa ranting maupun batang pohon. Hingga saat ini, pemanfaatan kayu rambutan masih terbatas pada penggunaan sederhana seperti kayu bakar atau bahan bangunan skala kecil, sementara sebagian besar limbah hasil pemangkasan dibiarkan membusuk tanpa nilai tambah yang berarti. Padahal, batang rambutan mengandung selulosa dalam jumlah yang cukup tinggi [4]. Kandungan selulosa tersebut berperan sebagai komponen struktural utama yang memberikan kekuatan mekanik, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material penguat pada sistem komposit berbasis polimer [5].

Meskipun memiliki potensi yang menjanjikan, penggunaan serat alam sebagai penguat komposit masih menghadapi beberapa kendala. Serat batang rambutan secara alami bersifat hidrofilik karena mengandung banyak gugus hidroksil pada strukturnya [6]. Selain itu, permukaan serat masih dilapisi oleh

hemiselulosa, lignin, pektin, serta lapisan lilin alami. Sementara itu, sebagian besar matriks polimer yang digunakan dalam industri memiliki sifat hidrofobik. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan rendahnya kompatibilitas antarmuka antara serat dan matriks, sehingga ikatan adhesi yang terbentuk menjadi kurang optimal [6]. Akibatnya, dapat terbentuk rongga-rongga mikro (*microvoid*) pada daerah antarmuka yang menghambat transfer tegangan dari matriks ke serat. Kondisi ini berpotensi menurunkan kemampuan komposit dalam menahan beban mekanik [7].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan modifikasi permukaan serat melalui perlakuan kimia sebelum proses fabrikasi komposit dilakukan. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah perlakuan alkali (*alkalization*) atau mercerisasi menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) [8]. Metode ini dikenal efektif, relatif sederhana, dan ekonomis dalam meningkatkan kualitas ikatan antara serat dan matriks. Namun demikian, parameter perlakuan harus ditentukan secara tepat karena konsentrasi larutan yang terlalu tinggi atau waktu perendaman yang terlalu lama dapat merusak struktur selulosa dan menurunkan kekuatan serat. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan perlakuan alkalisasi menggunakan larutan NaOH 5% dengan waktu perendaman selama 2 jam. Perlakuan tersebut diharapkan mampu mengurangi kandungan lignin dan hemiselulosa pada permukaan serat sekaligus meningkatkan kekasaran permukaan serat, sehingga interaksi mekanik antara serat dan resin dapat berlangsung lebih baik tanpa merusak struktur utama selulosa [9].

Meskipun limbah batang rambutan memiliki potensi besar sebagai material penguat karena kandungannya yang tinggi, pemanfaatannya saat ini masih sangat rendah dan belum ada kajian spesifik mengenai aplikasinya pada sistem komposit polimer, terutama terkait upaya memecahkan masalah inkompatibilitas antarmuka serat hidrofilik dan matriks hidrofobik. Dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi

karakteristik mekanik dan morfologi komposit polimer berpenguat selulosa batang rambutan (*Nephelium lappaceum*) akibat modifikasi perlakuan alkalisasi. Melalui perlakuan permukaan menggunakan NaOH 5% selama 2 jam, penelitian ini dihipotesiskan mampu melarutkan lapisan lignin maupun hemiselulosa secara terukur guna memperbaiki kualitas ikatan adhesi antarmuka serat dengan matriks, meminimalisasi pembentukan rongga mikro (*microvoid*), dan pada akhirnya berdampak pada peningkatan kekuatan mekanik material komposit secara keseluruhan.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimen murni. Berikut merupakan langkah serta tahapan pada penelitian ini: proses penelitian diawali dengan persiapan batang rambutan. Limbah batang rambutan diambil di Kecamatan Talun, Kabupaten Blitar, dan jenis pohon rambutan yang digunakan adalah rambutan binjai. Rangkaian awal proses persiapan yaitu dengan pembersihan, pemotongan, dan penghalusan batang hingga menjadi serbuk kasar, kemudian dilanjutkan dengan proses alkalisasi menggunakan larutan NaOH 5% selama 2 jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, serbuk kasar dicuci dengan air mengalir untuk menghilangkan sisa larutan kimia, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kering.

Selanjutnya, serbuk kasar dihaluskan lagi hingga mencapai tingkat kehalusan mesh 150. Serbuk halus ini nantinya digunakan sebagai *filler* atau penguat komposit. Selanjutnya, spesimen komposit difabrikasi menggunakan metode hand lay-up dengan variasi fraksi volume serat sebesar 10%, 20%, dan 30% terhadap matriks polimer menggunakan *Unsaturated Polyester Resin* (UPR) dengan katalis 1% dari berat total resin. Kemudian dilakukan proses curing selama kurang lebih 2 jam hingga spesimen kering serta mudah dilepas dari cetakan. Untuk mengevaluasi kualitas modifikasi selulosa dan karakteristik komposit yang dihasilkan, dilakukan tiga

tahapan karakterisasi utama, yaitu uji Van Soest untuk menganalisis perubahan kandungan lignin, hemiselulosa, dan selulosa sebelum dan sesudah alkalisasi, uji tarik berdasarkan standar ASTM D638 Tipe III menggunakan *Universal Testinyg Machine* (UTM) dengan beban 5 kN dan kecepatan 5 mm/menit untuk menentukan sifat mekanik komposit, serta pengamatan morfologi permukaan patahan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) tipe Hitachi TM4000Plus dengan perbesaran X40 tanpa pelapisan sampel guna mengidentifikasi topografi permukaan, keberadaan *void*, dan kualitas ikatan antarmuka antara serat dan matriks pada tingkat mikroskopis.

3. Hasil Penelitian

3.1. Pengaruh Alkalisasi terhadap Komposisi Kimia Serat

Modifikasi permukaan serat melalui perlakuan alkalisasi bertujuan untuk menghilangkan pengotor serta mengurangi komponen hidrofilik yang dapat menghambat terbentuknya ikatan yang kuat antara serat dan matriks. Pengaruh perendaman dalam larutan NaOH 5% selama 2 jam terhadap komposisi kimia serat batang rambutan dianalisis menggunakan metode Van Soest, dengan hasil perbandingan yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Van Soest

Sampel	Hemiselulosa %	Selulosa %	Lignin %
Tanpa perlakuan (TP)	11,14	36,17	25,38
Dengan perlakuan NaOH (DP)	10,74	30,49	13,23

Berdasarkan data pada Tabel 1, perlakuan alkalisasi memberikan perubahan pada komposisi kimia serat batang rambutan. Perubahan paling menonjol terlihat pada penurunan kandungan lignin dari 25,38% pada serat tanpa perlakuan menjadi 13,23% setelah perlakuan alkalisasi. Selain itu, kandungan hemiselulosa juga mengalami penurunan menjadi 10,74%. Hasil ini menunjukkan bahwa

larutan NaOH mampu melarutkan sebagian besar komponen non-selulosa seperti lignin, hemiselulosa, pektin, dan lapisan lilin yang menutupi permukaan serat [10] [11].

Di sisi lain, kandungan selulosa turut mengalami penurunan dari 36,17% menjadi 30,49%. Penurunan ini mengindikasikan bahwa perlakuan alkalisasi tidak hanya menghilangkan komponen pengotor pada permukaan serat, tetapi juga menyebabkan sebagian kecil struktur selulosa, khususnya pada daerah amorf yang kurang stabil, ikut terlarut selama proses perendaman [12].

Meskipun terjadi penurunan kandungan selulosa, berkurangnya lignin dan hemiselulosa memberikan keuntungan yang lebih besar terhadap performa selulosa sebagai penguat komposit. Hilangnya lapisan lignin pada permukaan selulosa menghasilkan tekstur yang lebih kasar dan berpori sehingga meningkatkan luas kontak antara serat dan matriks [13]. Kondisi ini memungkinkan resin polimer menembus pori-pori permukaan serat dengan lebih baik, membentuk mekanisme *mechanical interlocking* yang lebih kuat. Akibatnya, kualitas *adhesi* antarmuka antara serat dan matriks meningkat, sehingga transfer beban dari matriks ke serat dapat berlangsung lebih efektif dan berpotensi meningkatkan sifat mekanik komposit yang dihasilkan [14].

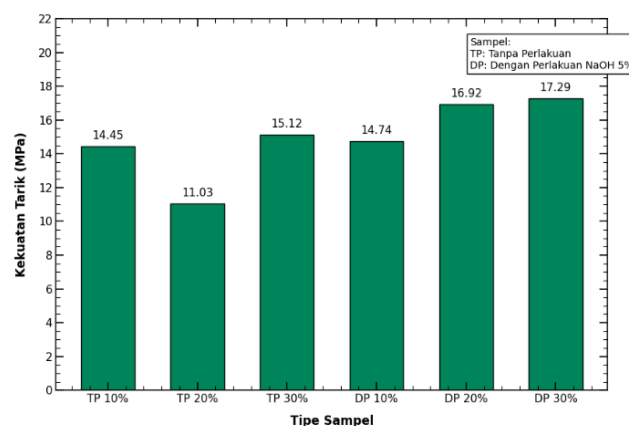
Tabel 2. Perbandingan Komposisi Kimia pada setiap Serat Alami

Serat Selulosa Alami	Karakteristik Kimia			Referensi
	Hemiselulosa %	Selulosa %	Lignin %	
Selulosa Batang Rambutan	11,14	36,17	25,38	Penelitian Saat ini
Serat Pelepah Kelapa Sawit	28,29	41,87	29,84	(Sari <i>et al.</i> , 2026)
Serat Ampas Tebu	22,28	27,76	18,81	(Andrianto <i>et al.</i> , 2024)

Tabel 2 memperlihatkan serat batang rambutan memiliki selulosa sebesar 36,17%, lebih banyak dibandingkan serat ampas tebu yang memiliki selulosa sebesar 27,76%. Ini menunjukkan serat batang rambutan memiliki potensi yang lebih baik sebagai penguat atau *filler* dalam komposit [14]. Tinggi selulosa sangat memengaruhi langsung kemampuan serat untuk menahan beban mekanik, yang mampu meningkatkan kuat tarik dan modulus elastisitas komposit [15] [16].

3.2. Pengaruh alkalisasi terhadap uji mekanik

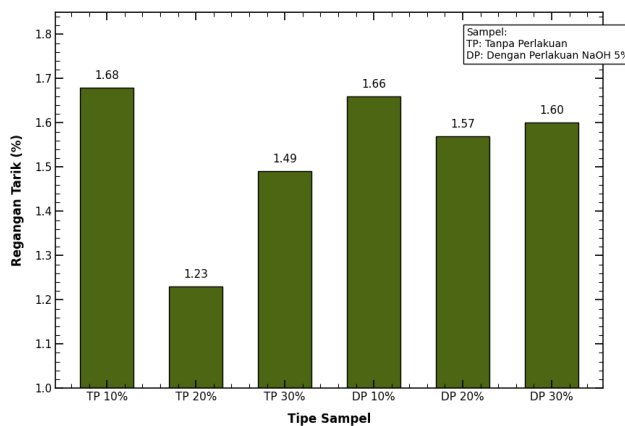
Kemampuan komposit dalam menahan beban mekanik sangat bergantung pada kualitas ikatan antarmuka (*interfacial adhesion*) antara serat sebagai penguat dan matriks. Hasil pengujian tarik komposit dengan variasi fraksi volume serat 10%, 20%, dan 30%, baik sampel tanpa perlakuan (TP) maupun sampel dengan perlakuan NaOH (DP), disajikan pada Gambar 1.



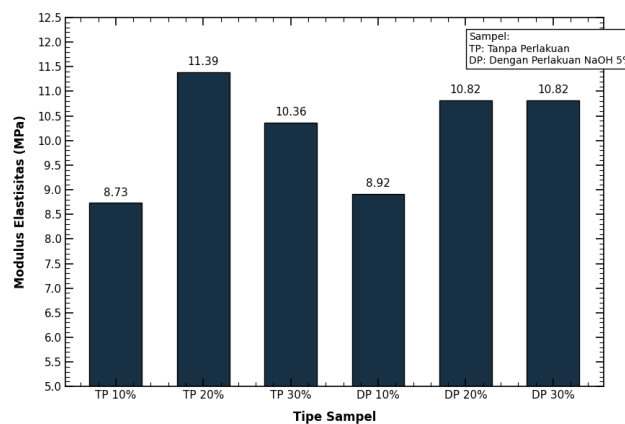
Gambar 1. Grafik nilai kekuatan tarik

Berdasarkan Gambar 1, komposit DP menunjukkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan komposit TP. Nilai kekuatan tarik maksimum diperoleh pada spesimen DP 30% sebesar 17,27 MPa, sedangkan pada kelompok TP terjadi penurunan kekuatan tarik yang signifikan pada spesimen TP 20% hingga mencapai 11,00 MPa. Hasil ini selaras dengan hasil uji Van Soest yang menunjukkan penurunan kandungan lignin dari 25,38% menjadi 13,23% setelah memperoleh perlakuan

NaOH 5%. Berkurangnya lignin membuat permukaan serat menjadi lebih bersih dan kasar sehingga resin mampu membasahi serat dengan lebih baik [17] [18]. Kondisi tersebut meningkatkan *mechanical interlocking* dan memperkuat ikatan antarmuka, sehingga beban tarik dapat ditransfer secara efektif dari matriks ke serat [13]. Sebaliknya, pada komposit TP, kandungan lignin yang masih tinggi menyebabkan adhesi serat dan matriks lemah sehingga kegagalan material terjadi lebih awal [19].



Gambar 2. Grafik nilai regangan



Gambar 3. Grafik nilai modulus elastisitas

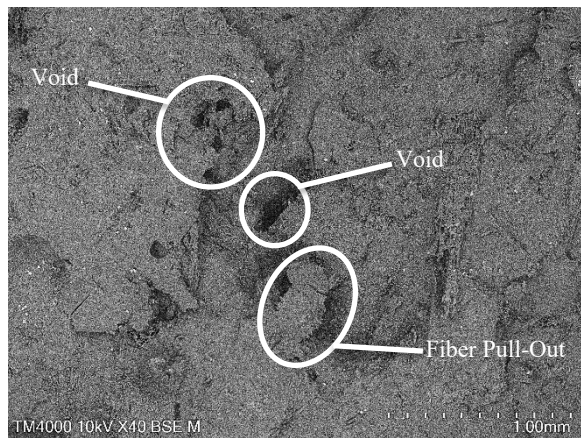
Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, perbedaan karakteristik mekanik antara kedua kelompok juga terlihat dari nilai regangan dan modulus elastisitas. Spesimen TP 20 memiliki nilai regangan terendah, yaitu 1,23%, namun menunjukkan modulus elastisitas tertinggi sebesar 11,38 MPa. Kondisi ini

mengindikasikan bahwa material bersifat kaku tetapi rapuh (*brittle*) [20] [21]. Fenomena tersebut diduga terjadi karena kandungan lignin dan pektin yang masih tinggi menyebabkan serat mudah mengalami aglomerasi selama proses pencampuran dengan resin [22]. Aglomerasi tersebut meningkatkan kekakuan komposit, tetapi sekaligus menjadi titik konsentrasi tegangan yang mempercepat terjadinya retak. Akibatnya, spesimen mengalami kegagalan pada regangan dan beban tarik yang relatif rendah [23].

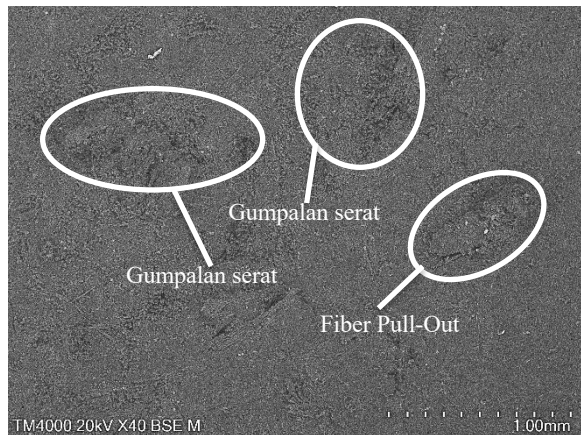
Sebaliknya, komposit DP menunjukkan keseimbangan sifat mekanik yang lebih baik. Spesimen DP 20% dan DP 30% memiliki modulus elastisitas yang relatif stabil yaitu 10,82 MPa dengan regangan antara 1,57% hingga 1,60%. Stabilitas tersebut menunjukkan bahwa ikatan antara serat dan matriks telah terbentuk dengan baik sehingga keduanya mampu bekerja secara sinergis dalam menahan beban [24] [25]. Pengurangan lignin dan hemiselulosa melalui perlakuan NaOH meningkatkan kualitas adhesi antarmuka, memungkinkan komposit mengalami deformasi secara lebih proporsional sekaligus menyerap energi tarik yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan [26] [27]. Hal ini dikonfirmasi dengan peningkatan kekuatan tarik maksimum hingga mencapai 17,27 MPa pada spesimen DP 30%

3.3. Analisis Morfologi Patahan (SEM)

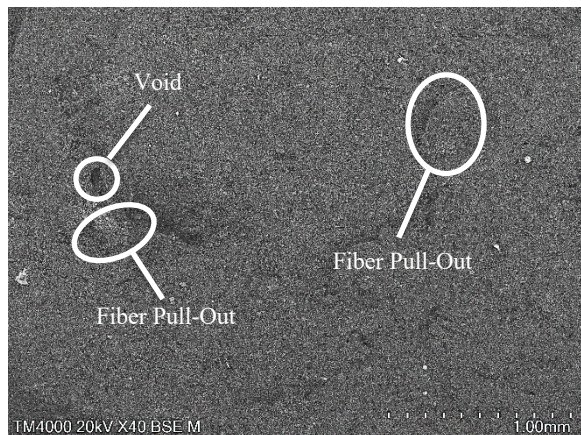
Untuk memperkuat hasil uji tarik, dilakukan pengamatan morfologi permukaan patahan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Citra SEM memberikan bukti visual yang mendukung hasil pengujian mekanik, sehingga hubungan antara morfologi patahan dan variasi kekuatan tarik komposit dapat dianalisis secara lebih komprehensif.



Gambar 4. SEM TP 10%



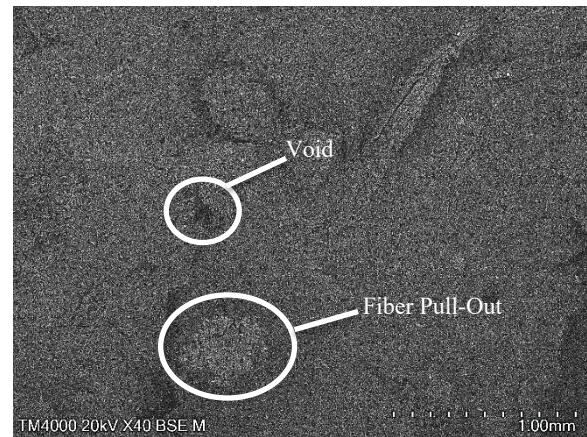
Gambar 5. SEM TP 20%



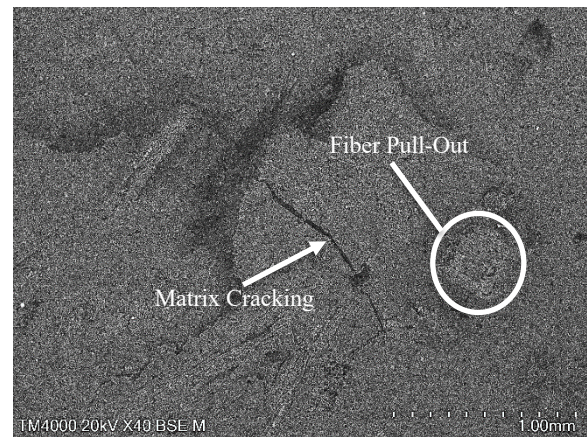
Gambar 6. SEM TP 30%

Pada komposit TP, mekanisme patahan didominasi oleh terbentuknya *void* dan *fiber pull-out*. Keberadaan *void* pada spesimen TP 10% dan TP 30% menunjukkan bahwa perbedaan sifat antara serat yang hidrofilik dan matriks yang hidrofobik menyebabkan resin tidak mampu membasahi permukaan serat secara sempurna [28] [29] [30]. Kondisi paling buruk terlihat pada spesimen TP 20%, di mana

hasil SEM menunjukkan adanya gumpalan selulosa dalam jumlah yang cukup besar. Aglomerasi selulosa ini berperan sebagai titik konsentrasi tegangan sehingga retakan lebih mudah terbentuk saat pembebanan tarik. Akibatnya, kekuatan tarik TP 20% mengalami penurunan signifikan hingga mencapai 11,00 MPa karena beban tidak dapat ditransfer secara efektif ke selulosa penguat [31].



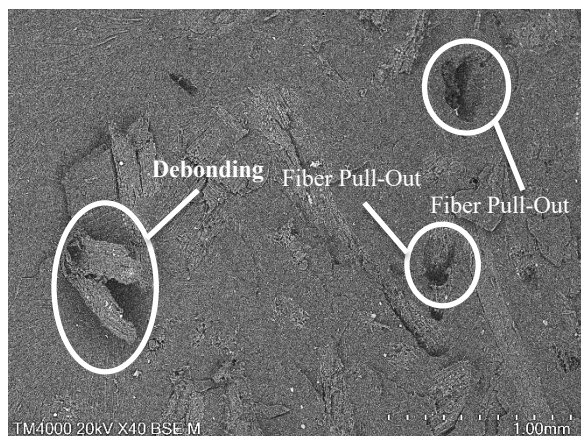
Gambar 7. SEM DP 10%



Gambar 8. SEM DP 20%

Sebaliknya komposit DP menunjukkan kualitas ikatan antarmuka yang jauh lebih baik. Meskipun pada DP 10% masih ditemukan *void* dan *fiber pull-out* akibat rendahnya fraksi volume selulosa, perubahan morfologi patahan mulai terlihat jelas pada fraksi volume yang lebih tinggi [32] [33]. Pada spesimen DP 20%, hasil SEM menunjukkan adanya retakan pada matriks (*matrix cracking*) disertai *fiber pull-out*. Munculnya retakan pada matriks menunjukkan bahwa ikatan antara serat dan matriks telah meningkat setelah lapisan lignin

pada permukaan serat berkurang akibat perlakuan NaOH [34] [35]. Kondisi ini memungkinkan beban tarik ditransfer secara lebih efektif dari matriks ke serat hingga matriks mencapai batas kegagalannya, yang sejalan dengan peningkatan kekuatan tarik spesimen DP 20% menjadi 16,91 MPa.



Gambar 9. SEM DP 30%

Pada spesimen DP 30% masih dijumpai fenomena *debonding* dan *fiber pull-out*, namun komposit ini menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, yaitu 17,27 MPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada fraksi volume serat yang lebih tinggi, mekanisme *mechanical interlocking* yang terbentuk akibat perlakuan alkalisasi NaOH 5% mampu mempertahankan integritas ikatan serat-matriks secara optimal [36]. Akibatnya, komposit mampu menahan beban yang lebih besar sebelum akhirnya mengalami kegagalan, sehingga menghasilkan performa mekanik yang lebih baik dibandingkan komposit tanpa perlakuan [37].

4. Kesimpulan

Perlakuan alkalisasi menggunakan larutan NaOH 5% selama 2 jam terbukti efektif meningkatkan performa komposit polimer ramah lingkungan berbasis limbah selulosa batang rambutan (*Nephelium lappaceum*) melalui perubahan komposisi kimia serat dan peningkatan kualitas ikatan antarmuka. Hasil uji Van Soest menunjukkan penurunan kandungan lignin yang signifikan, dari 25,38% menjadi 13,23%, sehingga lapisan pengotor

pada permukaan serat berhasil dihilangkan dan menghasilkan permukaan yang lebih kasar. Kondisi ini meningkatkan *mechanical interlocking* antara serat dan matriks, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik maksimum hingga 17,27 MPa pada spesimen dengan fraksi volume serat 30% (DP 30). Hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) turut mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan perubahan mekanisme patahan dari dominasi *void* dan aglomerasi serat pada komposit tanpa perlakuan menjadi kegagalan berupa *matrix cracking* pada komposit yang mengalami alkalisasi. Hal ini mengindikasikan bahwa beban tarik dapat ditransfer secara lebih efektif dari matriks ke serat penguat sehingga menghasilkan performa mekanik yang lebih baik.

5. Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya. Pertama, karakterisasi sifat mekanik pada penelitian ini masih terbatas pada uji tarik, sehingga penelitian berikutnya disarankan untuk menambahkan pengujian lentur (*flexural test*) dan dampak (*impact test*) agar kinerja komposit dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh pada berbagai kondisi pembebanan. Kedua, untuk mendukung pengembangan material yang lebih ramah lingkungan, penggunaan resin polimer konvensional dapat digantikan dengan matriks yang bersifat biodegradable, seperti *Polylactic Acid* (PLA) atau bio-epoxy, sehingga dihasilkan biokomposit yang lebih berkelanjutan. Ketiga, penelitian lanjutan juga dapat menggabungkan perlakuan alkalisasi dengan penggunaan *coupling agent*, seperti silane, guna meningkatkan kompatibilitas antarmuka antara serat dan matriks. Selain itu, pengujian daya serap air perlu dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas dimensi komposit ketika digunakan pada lingkungan dengan tingkat kelembapan yang tinggi.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Negeri Malang (UM) atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penelitian ini didukung secara finansial oleh Universitas Negeri Malang melalui Skema Hibah Penelitian Skripsi di bawah program pendanaan penelitian internal 2026, Nomor Kontrak: 14.04.919/UN32.14.1/LT/2026.

6. Daftar Pustaka

- [1] K. Pender, F. Romoli, and J. Fuller, "Environmental impact of glass fibre production with recycled content : A closed-loop recycling solution for legacy composite wind blade waste," pp. 2024–2041, 2026.
- [2] A. Karimah *et al.*, "A comprehensive review on natural fibers: Technological and socio-economical aspects," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 24, 2021, doi: 10.3390/polym13244280.
- [3] S. Riyadi, "Analisis Posisi Buah Tropis Indonesia dalam Global Value Chain di Era Pandemi," 2022.
- [4] S. Torgbo, P. Sukyai, U. Sukatta, S. Böhmendorfer, M. Beaumont, and T. Rosenau, "Cellulose fibers and ellagitannin-rich extractives from rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel by an eco-friendly approach," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 259, p. 128857, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128857>.
- [5] E. I. S. Oliveira, J. B. Santos, A. Paula, B. Gonçalves, and N. M. José, "Characterization of the Rambutan Peel Fiber (*Nephelium lappaceum*) as a Lignocellulosic Material for Technological Applications," vol. 50, pp. 391–396, 2016, doi: 10.3303/CET1650066.
- [6] J. Tisha and M. Dulal, "Advances Adhesion chemistry of plant-based cellulosic fibers and polymeric matrices in composites : a review," *RSC Adv.*, vol. 16, pp. 6132–6163, 2026, doi: 10.1039/D5RA09241H.
- [7] N. M. Nurazzi, "Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites : A Review on Influence of," 2021.
- [8] M. Zwawi, "A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications," 2025.
- [9] S. Pouresmaeeli, S. A. Fazelzadeh, and E. Ghavanloo, "Exact solution for nonlocal vibration of double-orthotropic nanoplates embedded in elastic medium," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3384–3390, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.046>.
- [10] Z. H. Kamaruddin, R. Jumaidin, R. A. Ilyas, M. Z. Selamat, R. H. Alamjuri, and F. A. Yusof, "Influence of Alkali Treatment on the Mechanical , Thermal , Water Absorption , and Biodegradation Properties of Cymbopogon citratus Fiber-Reinforced , Thermoplastic Cassava Starch – Palm Wax Composites," 2022.
- [11] A. E. Bekele and H. G. Lemu, "Study of the Effects of Alkali Treatment and Fiber Orientation on Mechanical Properties of Enset / Sisal Polymer Hybrid Composite," pp. 1–11, 2023.
- [12] M. M. Kabir, M. Y. Alhaik, S. H. Aldajah, K. T. Lau, H. Wang, and M. Islam, "Effect of Hemp Fibre Surface Treatment on the Fibre-Matrix Interface and the Influence of Cellulose , Hemicellulose , and Lignin Contents on Composite Strength Properties," vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9753779.
- [13] D. Bachtiar *et al.*, "Effect of alkaline treatment on the thermal and mechanical properties of sugar palm fibre-reinforced thermoplastic polyurethane composites," pp. 1–14, 2025.
- [14] Mia, N. M., Rabbi, M. S., Parvez, M., Chowdhury, M. A., Naim, M. S. H., Hossain, M. M., & Rahman, M. M. (2026). Advances in tribological performance of plant–fiber reinforced epoxy composites. *RSC Advances*, 16, 1392 - 1442. <https://doi.org/10.1039/d5ra07843a>
- [15] Dalmış, R. (2023). Description of a new cellulosic natural fiber extracted from *Helianthus tuberosus* L. as a composite reinforcement material.. *Physiologia plantarum*, e13960 . <https://doi.org/10.1111/ppl.13960>
- [16] Randis, *et.al.*, "Pengaruh Perlakuan Kimia dan Enzimatik terhadap Sifat Mekanik Serat Pelapah Kelapa Sawit untuk Aplikasi Komposit Berkelanjutan", *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 13, no. 2, pp. 293-

- 302, Okt. 2025, doi: <https://doi.org/10.32487/jtt.v13i2.2740>
- [17] A. Ramachandran, S. M. Rangappa, and V. Kushvaha, "Modification of Fibers and Matrices in Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Review," vol. 2100862, pp. 1–38, 2022, doi: 10.1002/marc.202100862.
- [18] C. Dong, "Journal of Materials Science & Technology Effects of Process-Induced Voids on the Properties of Fibre Reinforced Composites," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 597–604, 2016, doi: 10.1016/j.jmst.2016.04.011.
- [19] S. Han, M. Sung, J.-M. Jang, S. Jeon, and W. Yu, "The effects of adhesion on the tensile strength of steel-polymer sandwich composites," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 30, pp. 443–461, 2020, doi: 10.1080/09243046.2020.1835793.
- [20] A. Mahmood *et al.*, "Geopolymers and Fiber-Reinforced Concrete Composites in Civil Engineering," *Polymers (Basel)*, vol. 13, 2021, doi: 10.3390/polym13132099.
- [21] J. Kumar, P. Thamizhvalavan, M. Balasubramanian, and S. Rajkumar, "Enhanced mechanical performance and failure mechanisms of woven glass fiber-reinforced polymer composites with optimized multi-walled carbon nanotube reinforcement," *Polym. Compos.*, vol. 46, 2025, doi: 10.1002/pc.29995.
- [22] F. Serra-Parareda, Q. Tarrés, F. Espinach, F. Vilaseca, P. Mutjé, and M. Delgado-Aguilar, "Influence of lignin content on the intrinsic modulus of natural fibers and on the stiffness of composite materials," *Int. J. Biol. Macromol.*, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.160.
- [23] A. Kar and D. Saikia, "Characterization of new natural cellulosic fiber from Calamus tenuis (Jati Bet) cane as a potential reinforcement for polymer composites," *Heliyon*, vol. 9, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16491.
- [24] S. Kumar *et al.*, "Physical and Mechanical Properties of Natural Leaf Fiber-Reinforced Epoxy Polyester Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:233461708>
- [25] M. Aravindh *et al.*, "A Review on the Effect of Various Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Renewable Fiber-Reinforced Composites," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246311516>
- [26] M. M. Kabir, M. Y. Al-Haik, S. H. Aldajah, K. A. Lau, H. Wang, and M. M. Islam, "Effect of Hemp Fibre Surface Treatment on the Fibre-Matrix Interface and the Influence of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin Contents on Composite Strength Properties," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244795396>
- [27] J. Y. Boey, C. K. Lee, and G. S. Tay, "Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252249912>
- [28] P. Joseph, K. Joseph, and S. Thomas, "Short sisal fiber reinforced polypropylene composites: the role of interface modification on ultimate properties," *Compos. Interfaces*, vol. 9, pp. 171–205, 2002, doi: 10.1163/156855402760116094.
- [29] E. Wölfel, H. Brünig, I. Curosu, V. Mechtcherine, and C. Scheffler, "Dynamic Single-Fiber Pull-Out of Polypropylene Fibers Produced with Different Mechanical and Surface Properties for Concrete Reinforcement," *Materials (Basel)*, vol. 14, 2021, doi: 10.3390/ma14040722.
- [30] O. Balogun, A. Adediran, J. Omotoyinbo, K. Alaneme, and I. Oladele, "Evaluation of Water Diffusion Mechanism on Mechanical Properties of Polypropylene Composites," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8865748.
- [31] P. Dhamvithee, N. Petchwattana, W. Thong-On, and W. Channuan, "Optimizing Sustainable Poly(lactic acid) (PLA) Composites: A Comprehensive Study on the Impact of Thermoplastic Starch (TPS) and α -Cellulose Ratios," *ACS Omega*, vol. 11, pp. 17329–17338, 2026, doi: 10.1021/acsomega.5c09503.
- [32] R. Aranha *et al.*, "Effect of Water Absorption and Stacking Sequences on the Tensile Properties and Damage Mechanisms of Hybrid Polyester/Glass/Jute Composites,"

- Polymers (Basel)*., vol. 16, 2024, doi: 10.3390/polym16070925.
- [33] A. Chabot, T. Motteu, J. Chevalier, and S. Godet, "In situ characterization of the damage mechanisms during tensile deformation in sustainable Flax-PP spread-tow woven composites," *J. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 20, 2025, doi: 10.1186/s40712-025-00319-3.
- [34] G. U. T. Laksono A, "Application of Fiber Made from Bark of Salak (Salacca Zalacca) Tree as Reinforcement in Polymer Matrix Composites," no. 9, pp. 153–159, 2021.
- [35] M. M. Azad, R. Shah, M. N. Prabhakar, and H. S. Kim, "Deep Learning-Based Microscopic Damage Assessment of Fiber-Reinforced Polymer Composites," pp. 1–16, 2024.
- [36] M. Sodagar, N. E. Lagrou, and T. Gries, "Tensile Strength Characterization of Alkaline-Treated and Untreated Banana Fibres Using Weibull Statistics," *Materials (Basel)*., vol. 18, 2025, doi: 10.3390/ma18214833.
- [37] D. Bichang'a and I. Oladele, "Characterisation of alkali-treated novel cellulosic fibres derived from Dombeya Buettneri plant as a potential reinforcement for polymer composites," *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 20, pp. 1255–1268, 2024, doi: 10.1080/17480272.2024.2392210.