

Pengaruh Perlakuan Kimia dan Enzimatis terhadap Sifat Mekanik Serat Pelepah Kelapa Sawit untuk Aplikasi Komposit Berkelanjutan

Randis^{1*}, Hadi Hermansyah², Syahrudin³, Arwin⁴, Yolanda⁵

^{1*,2,3,4,5} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Balikpapan

*Email: randisbaharuddin@gmail.com

Abstract

This study comprehensively evaluates the effects of chemical treatments (NaOH and H₂O₂) and enzymatic treatments (bromelain and papain) on the mechanical properties of oil palm frond fibers (OPFF) within the framework of sustainable composite development. Extracted fibers were analyzed to identify changes in diameter, tensile strength, and Young's modulus after treatment. The results demonstrate that NaOH treatment produced the most significant effect, characterized by a diameter reduction of up to 46% (0.4605 mm), an increase in tensile strength to 209.050 MPa, and an enhancement in Young's modulus to 3.575 GPa. In contrast, H₂O₂ treatment resulted in only limited improvements, while enzymatic treatments provided moderate contributions. Papain treatment yielded better performance than bromelain, with tensile strength of 86.231 MPa and modulus of 2.261 GPa, although still considerably lower than NaOH. These findings confirm that alkali treatment remains the most effective approach for improving the mechanical properties of natural fibers, while enzymatic treatments are more appropriately positioned as environmentally friendly complementary methods. Overall, this study highlights the importance of optimizing fiber treatment strategies to improve aspect ratio, strengthen fiber-matrix adhesion, and enhance the mechanical performance of natural fiber-based composites.

Keywords: Oil palm frond fibers, chemical treatment, enzymatic treatment, tensile strength, young's modulus, sustainable composites.

Abstrak

Studi ini secara komprehensif mengevaluasi pengaruh perlakuan kimia (NaOH dan H₂O₂) serta enzimatis (*bromelain* dan *papain*) terhadap sifat mekanik serat pelepah kelapa sawit (SPKS) dalam kerangka pengembangan komposit berkelanjutan. Serat hasil ekstraksi dianalisis untuk mengidentifikasi perubahan diameter, kekuatan tarik, dan modulus elastisitas setelah perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan NaOH memberikan efek paling signifikan, ditandai dengan penyusutan diameter hingga 46% (0,4605 mm), peningkatan kekuatan tarik hingga 209,050 MPa, serta kenaikan modulus elastisitas menjadi 3,575 GPa. Sebaliknya, perlakuan H₂O₂ hanya menghasilkan perbaikan terbatas, sementara perlakuan enzimatis menunjukkan kontribusi moderat. Papain memberikan hasil lebih baik dibandingkan bromelain, dengan kekuatan tarik 86,231 MPa dan modulus 2,261 GPa, meskipun efektivitasnya masih jauh di bawah NaOH. Temuan ini menegaskan bahwa perlakuan alkali tetap menjadi pendekatan paling efektif untuk meningkatkan sifat mekanik serat alam, sedangkan perlakuan enzimatis lebih tepat diposisikan sebagai metode pelengkap yang ramah lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini menekankan pentingnya strategi optimasi perlakuan serat untuk memperbaiki rasio aspek, memperkuat adhesi serat-matriks, dan meningkatkan performa mekanik komposit berbasis serat alam.

Kata kunci: Serat pelepah kelapa sawit, perlakuan kimia, perlakuan enzimatis, kekuatan tarik, modulus elastisitas, komposit berkelanjutan.

1. Pendahuluan

Permintaan global terhadap material komposit berkelanjutan berbasis serat alam terus meningkat seiring kesadaran akan pentingnya pengurangan dampak lingkungan dari penggunaan material sintetis. Serat alam menawarkan keunggulan berupa ketersediaan melimpah, sifat terbarukan, biodegradabilitas, dan bobot ringan, sehingga menjadi alternatif ideal untuk menggantikan serat sintetis dalam berbagai aplikasi teknik [1], [2]. Salah satu sumber serat alam yang potensial adalah serat pelepah kelapa sawit (SPKS), yang merupakan limbah agrikultur yang banyak dihasilkan di negara penghasil sawit seperti Indonesia dan Malaysia [3]–[5].

Meskipun begitu, keterbatasan utama dari serat alam terletak pada sifat mekaniknya yang relatif rendah akibat keberadaan lignin, hemiselulosa, dan senyawa pengotor lainnya yang menurunkan kualitas adhesi antarmuka dengan matriks polimer. Dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode modifikasi serat telah dikembangkan, terutama perlakuan kimia dan enzimatis. Perlakuan kimia, khususnya dengan larutan alkali (NaOH) dan oksidator seperti *hidrogen peroksida* (H_2O_2), telah terbukti mampu meningkatkan kristalinitas selulosa, menghilangkan pengotor, serta memperbaiki kekuatan tarik dan modulus elastisitas serat [6]–[8].

Meskipun perlakuan kimia telah menjadi pendekatan utama dalam meningkatkan performa serat alam, Namun, metode ini menimbulkan persoalan lingkungan serius karena menghasilkan limbah kimia yang sulit terurai sehingga bertentangan dengan prinsip pemanfaatan serat alam sebagai material ramah lingkungan [9]. Selain itu, penggunaan konsentrasi tinggi NaOH berpotensi merusak integritas serat [10]. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru yang tidak hanya mampu meningkatkan performa serat tetapi juga sejalan dengan prinsip keberlanjutan.

Perlakuan enzimatis muncul sebagai solusi potensial atas permasalahan ini. Dengan memanfaatkan enzim alami yang bersifat

biodegradable dan selektif terhadap komponen lignin dan hemiselulosa, pendekatan ini menjanjikan modifikasi serat yang lebih bersih dan ramah lingkungan. Enzim *bromelain* dan *papain* diketahui mampu menghidrolisis senyawa non-selulosa tanpa merusak struktur selulosa utama, sehingga memungkinkan peningkatan sifat mekanik serat secara lebih terkontrol [11], [12]. Namun, efektivitasnya masih belum setara dengan perlakuan kimia konvensional yang terbukti memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan tarik dan modulus elastisitas, sehingga diperlukan studi komparatif yang mendalam untuk mengidentifikasi potensi dan keterbatasan pendekatan enzimatis ini.

Perlakuan dengan larutan NaOH telah lama diakui sebagai metode paling efektif dalam meningkatkan performa serat alam. Penghilangan lignin dan hemiselulosa melalui proses alkalisasi menyebabkan peningkatan eksposur selulosa dan kekasaran permukaan serat, yang mendukung adhesi dengan matriks polimer. Perlakuan NaOH terbukti mampu meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan pada serat kenaf maupun sabut kelapa [1], [13], [14]. Namun, jika konsentrasi terlalu tinggi, struktur serat dapat rusak akibat depolimerisasi selulosa [15], [16].

Perlakuan dengan H_2O_2 juga menjadi alternatif penting yang dapat memperbaiki permukaan serat melalui aksi oksidatif. Flores et al. (2024) menunjukkan bahwa H_2O_2 dapat meningkatkan adhesi dan kekasaran permukaan serat jute secara signifikan [17]. Sementara itu, Ikoya et al. (2024) melaporkan adanya peningkatan sifat mekanik serat *Raphia* pasca perlakuan H_2O_2 [18]. Selain itu, perubahan pada struktur kristalin serat juga dicatat sebagai faktor pendukung dalam peningkatan transfer tegangan [19], [20]. Namun, konsentrasi yang tidak terkontrol dapat menyebabkan degradasi, sehingga optimalisasi parameter menjadi sangat penting [21].

Sebaliknya, pendekatan perlakuan enzimatis seperti penggunaan *bromelain* dan *papain* mulai banyak dilaporkan sebagai strategi hijau. *Bromelain* diketahui mampu

mendegradasi lignin dan hemiselulosa tanpa merusak selulosa utama [11], [12]. Enzim ini juga berkontribusi pada manajemen kelembaban serat [22], [23] dan meningkatkan kekuatan tarik serta daya tahan komposit [24]. Papain juga menunjukkan efek serupa, dengan meningkatkan kekasaran permukaan, fleksibilitas, dan kekuatan tarik serat [11], [25]. Keunggulan lingkungan dari papain menjadikannya kandidat ideal untuk pendekatan keberlanjutan dalam rekayasa material [25].

Penggunaan NaOH dan H₂O₂, telah terbukti efektif dalam meningkatkan sifat fisik dan mekanik serat alam. Namun, efektivitas ini harus dibayar dengan risiko lingkungan yang tinggi, terutama akibat limbah kimia yang dihasilkan dan potensinya dalam mencemari lingkungan. Tantangan besar dalam penggunaan metode kimia adalah ketidaksesuaian dengan prinsip keberlanjutan, terutama dalam konteks rekayasa material yang semakin menekankan pada aspek ekologis.

Sebaliknya, meskipun perlakuan enzimatik seperti bromelain dan papain telah diidentifikasi memiliki potensi untuk memodifikasi serat alam secara selektif dan ramah lingkungan, literatur yang membahas efektivitas keduanya secara komprehensif masih sangat terbatas. Belum banyak studi yang secara langsung membandingkan performa mekanik serat yang telah diberi perlakuan kimia dengan perlakuan enzimatik, khususnya terhadap serat pelepah kelapa sawit. Hal ini menciptakan kesenjangan pengetahuan yang penting, yang perlu diisi melalui penelitian eksperimental yang terfokus dan sistematis.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas dua pendekatan modifikasi serat, yaitu perlakuan kimia (NaOH dan H₂O₂) dan perlakuan enzimatik (bromelain dan papain), terhadap peningkatan sifat mekanik SPKS. Parameter utama yang diamati meliputi diameter serat, kekuatan tarik, dan modulus elastisitas, yang merupakan indikator penting dalam penentuan kelayakan serat untuk aplikasi komposit.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan komparatif terhadap penggunaan enzim *bromelain* dan *papain*, yang belum banyak diteliti dalam konteks modifikasi serat pelepah kelapa sawit untuk keperluan komposit. Studi ini juga memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode perlakuan serat yang lebih berkelanjutan dengan menekankan pada peran biokatalis alami dalam meningkatkan performa mekanik serat alam.

Ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada tahap awal pengembangan material, yaitu peningkatan kualitas serat tunggal. Pengujian terbatas pada karakteristik mekanik dasar seperti diameter, kekuatan tarik, dan modulus elastisitas, dengan tidak mencakup uji termal, degradasi lingkungan, atau performa komposit skala penuh. Pendekatan ini diharapkan menjadi fondasi awal untuk pengembangan material komposit berbasis serat alam yang unggul dan ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

2.1 Material

Serat PKS diperoleh dari perkebunan kelapa sawit di Kecamatan Kuaro, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia. Bahan kimia yang digunakan meliputi *natrium hidroksida* (Sigma-Aldrich, AS), *hidrogen peroksida* (Sigma-Aldrich, AS) semuanya dalam kualitas reagen analitik (AR grade). Sementara enzim *bromelain* dan enzim papain diekstrak masing masing dari buah nanas dan buah pepaya sehingga menghasilkan ekstrak yang kaya.

2.2 Ekstraksi dan Preparasi Serat

Serat diambil dari bagian pangkal yang memiliki densitas serat tinggi dan morfologi seragam. Pelepah dipotong seragam 20 cm, lalu lapisan epidermis keras dihilangkan dengan pisau tajam untuk mengekspos jaringan berserat.

Perendaman dilakukan pada 26 ± 2 °C selama 72 jam untuk melonggarkan hemiselulosa-pektin dan menurunkan kandungan ekstraktif. Pelepah yang melunak kemudian diserautkan manual dan dibersihkan dari sisa kotoran menggunakan bilah pisau.

Serat hasil ekstraksi dicuci dengan air mengalir, lalu dikeringkan hingga kadar air stabil 9–10%. Serat kering tersebut siap untuk perlakuan kimia maupun enzimatis.

2.3 Perlakuan Serat

Serat PKS yang telah dikeringkan diberi perlakuan kimia dan enzimatis untuk meningkatkan kualitasnya. Pada tahapan ini dilakukan 4 jenis perlakuan untuk masing-masing serat. Pertama serat direndam dalam larutan natrium hidroksida (NaOH) 4% selama 60 menit pada suhu ruang dengan pengadukan berkala. Setelah itu, serat dibilas dengan air destilasi hingga pH netral. Serat dengan perlakuan ini diberi kode N4SPKS.

Perlakuan kedua dengan menggunakan larutan hidrogen peroksida (H_2O_2) 4% selama 60 menit dengan kondisi sama, sebelum serat kembali dibilas hingga bersih, selanjutnya serat diberi kode H4SPKS.

Perlakuan enzimatis masing-masing dilakukan dengan bromelain dan papain (2 g L^{-1}), direndam selama 60 menit dengan agitasi ringan. Setelah itu, serat dicuci dengan air destilasi. Tahap akhir berupa pengeringan dalam oven $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam hingga kadar air stabil 9–10%, sehingga serat siap digunakan untuk berbagai uji untuk mengetahui kontribusi perlakuan terhadap perilaku serat Tunggal. Serat dengan perlakuan enzim bromelain diberi kode B2SPKS sementara untuk perlakuan enzim papain diberi kode P2SPKS. Untuk serat tanpa perlakuan diberi kode TPSPKS.

2.4 Pengukuran Diameter Serat

Pengukuran diameter SPKS sebelum dan sesudah perlakuan dilakukan menggunakan mikroskop digital beresolusi tinggi. Setiap sampel ditempatkan pada preparat kaca dengan posisi lurus, lalu difokuskan untuk memperoleh citra yang presisi. Pengukuran dilakukan pada lima titik representatif, terutama bagian tengah, guna meminimalkan bias dan meningkatkan reliabilitas.

2.5 Uji Tarik Serat Tunggal

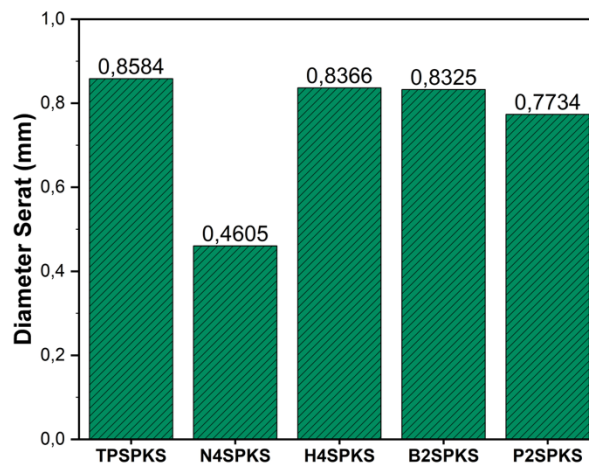
Karakterisasi kekuatan tarik serat tunggal dilakukan berdasarkan standar ASTM D3379-75 untuk memastikan kesesuaian metodologis dan keterbandingan hasil. Spesimen disiapkan dengan menempelkan potongan SPKS sepanjang 10 mm pada media karton, menggunakan resin epoksi sebagai perekat struktural. Daerah penjepit (*grip section*) diperkuat dengan isolasi guna menghindari selip atau kerusakan prematur selama aplikasi beban. Sebelum pengujian, diameter serat diukur menggunakan mikroskop digital untuk memperoleh data dimensi awal yang diperlukan dalam perhitungan tegangan.

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik serat tunggal dengan kecepatan 2 mm/menit, pada kondisi suhu ruang, dengan laju penarikan terkontrol sesuai prosedur standar. Setiap spesimen dipasang secara hati-hati untuk menjaga keselarasan beban aksial. Reliabilitas data diperoleh dengan melakukan pengujian berulang pada sejumlah sampel dengan variasi kondisi perlakuan, sehingga hasil yang diperoleh dapat merepresentasikan sifat mekanik serat secara konsisten dan komprehensif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengukuran Diameter Serat

Pengukuran diameter SPKS dilakukan pada kondisi tanpa perlakuan maupun setelah diberikan perlakuan kimia dan enzimatis. Hasil rata-rata pengukuran diameter ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diameter serat

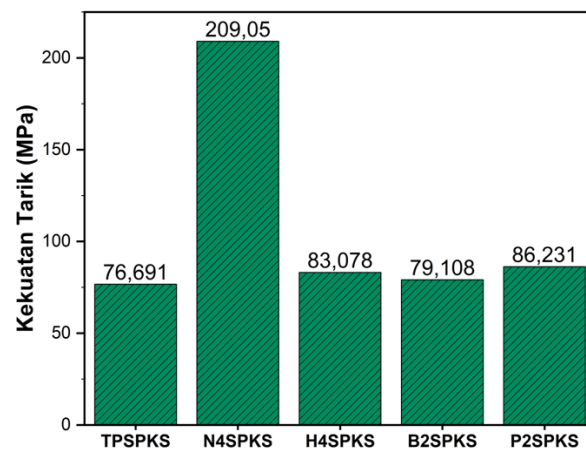
Hasil perlakuan terhadap perubahan diameter serat ditunjukkan pada Gambar 1. Perlakuan NaOH menghasilkan reduksi diameter paling signifikan, yakni 0,4605 mm, atau berkurang hampir setengah dibandingkan kondisi tanpa perlakuan (0,8584 mm). Efek penyusutan ini konsisten dengan literatur yang menegaskan peran alkali dalam melarutkan hemiselulosa, lignin, serta kotoran yang melekat, sehingga menghasilkan struktur serat lebih bersih dan meningkatkan keterikatan dengan matriks polimer [26]–[28]. Penelitian lain juga mencatat bahwa penggunaan NaOH pada berbagai konsentrasi mampu meningkatkan densitas serat karena fenomena penyusutan internal [29].

Sebaliknya, perlakuan dengan H_2O_2 menghasilkan diameter yang relatif mendekati serat asli (0,8366 mm). Hal ini memperlihatkan bahwa fungsi utama agen oksidatif lebih berorientasi pada pemutihan dan pembersihan residu lignin dibandingkan reduksi dimensi serat [30], [31]. Meski tidak secara signifikan menurunkan diameter, perlakuan ini tetap memberikan kontribusi pada kebersihan permukaan serat yang dapat meningkatkan interaksi antarmuka serat–matriks.

Perlakuan enzimatik menghasilkan efek moderat. Bromelain memberikan diameter rata-rata 0,8325 mm, sedangkan papain menunjukkan reduksi lebih besar hingga 0,7734 mm. Bromelain diketahui mampu menghidrolisis komponen non-selulosa sehingga memperbaiki sifat permukaan serat [32]. Sementara itu, papain memiliki kemampuan memecah protein dan hemiselulosa, yang berkontribusi pada penyusutan diameter dan peningkatan sifat mekanik [33].

3.2 Kekuatan Tarik Serat Tunggal

Karakterisasi kekuatan tarik SPKS mengungkapkan perbedaan signifikan antara kondisi tanpa perlakuan dan setelah penerapan modifikasi kimia maupun enzimatik. Nilai hasil pengujian dirangkum pada Gambar 2.



Gambar 2. Nilai Kekuatan Tarik

Peningkatan paling mencolok dicapai melalui perlakuan NaOH, dengan nilai kekuatan tarik 209,050 MPa, hampir tiga kali lipat dibandingkan kontrol. Mekanisme ini erat kaitannya dengan pelepasan lignin dan hemiselulosa, yang memungkinkan fibril selulosa tersusun sejajar sepanjang arah gaya tarik sehingga meningkatkan interlocking struktural [26], [27]. Literatur menegaskan bahwa konsentrasi alkali moderat memberikan efek optimal, sedangkan konsentrasi tinggi dapat menginduksi depolimerisasi selulosa dan menurunkan kekuatan serat [10], [29]. Temuan ini konsisten dengan data diameter, di mana reduksi dimensi hingga 0,4605 mm pada perlakuan NaOH berkorelasi terbalik dengan peningkatan kekuatan tarik.

Perlakuan dengan H_2O_2 menghasilkan kekuatan tarik 83,078 MPa, sedikit lebih tinggi daripada serat tanpa perlakuan. Peran utamanya adalah sebagai agen oksidatif yang mengurangi lignin residual dan meningkatkan kristalinitas, meskipun dampaknya terhadap kekuatan mekanik relatif terbatas. Jika diaplikasikan secara berlebihan, perlakuan ini justru dapat merusak komponen sensitif dalam struktur serat [31].

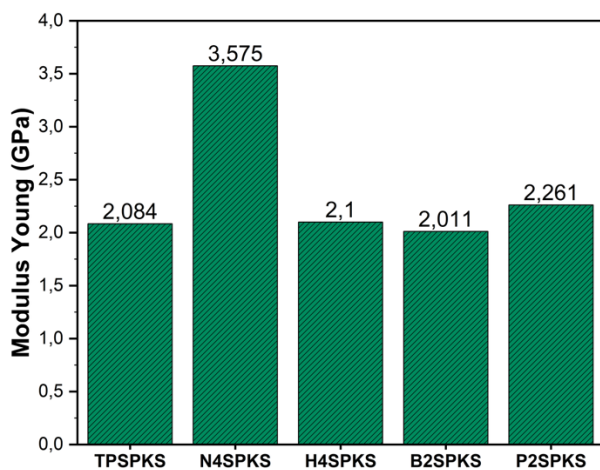
Perlakuan enzimatik memberikan pengaruh moderat. *Bromelain* menghasilkan 79,108 MPa, sedangkan *papain* menunjukkan hasil lebih tinggi, 86,231 MPa. *Bromelain* berkontribusi dengan menghidrolisis komponen non-selulosa dan memperbaiki kebersihan permukaan, sedangkan *papain*

mampu memecah protein dan hemiselulosa, [34]. Efek papain lebih nyata, meskipun keduanya tetap di bawah efektivitas NaOH.

NaOH terbukti sebagai perlakuan paling efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik serat tunggal SPKS, diikuti papain. H_2O_2 dan bromelain berfungsi lebih dominan sebagai agen pembersih dan modifikasi permukaan. Hubungan antara penurunan diameter dan peningkatan kekuatan tarik memperlihatkan pentingnya kontrol dimensi dalam memperbaiki rasio aspek serat, yang pada gilirannya memperkuat interaksi serat–matriks.

3.3 Modulus Elastisitas Serat Tunggal

Pengukuran modulus elastisitas (*modulus Young*) pada SPKS memperlihatkan perbedaan nyata antara kondisi tanpa perlakuan dan setelah diberi perlakuan kimia maupun enzimatis. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Nilai Modulus Elastisitas

Nilai tertinggi dicapai pada perlakuan NaOH dengan 3,575 GPa, meningkat signifikan dibandingkan kontrol (2,084 GPa). Hal ini mencerminkan peran perlakuan alkali dalam menghilangkan lignin dan hemiselulosa, serta meningkatkan kristalinitas selulosa, sehingga *fibril* lebih terorientasi sepanjang arah tegangan. Temuan ini konsisten dengan laporan pada serat *flaks* dan serat *hemp*, yang menunjukkan bahwa perlakuan NaOH meningkatkan *modulus Young* [35], [36]. Namun, konsentrasi berlebih dapat

menurunkan integritas serat melalui depolimerisasi selulosa [10].

Perlakuan H_2O_2 menghasilkan nilai 2,1 GPa, mendekati serat tanpa perlakuan. Efek oksidatif utamanya terbatas pada pembersihan permukaan. Meskipun beberapa studi melaporkan bahwa kombinasi alkali– H_2O_2 dapat meningkatkan modulus dengan mengurangi lignin dan memperbesar fraksi kristalin [37], [38]. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh H_2O_2 terhadap modulus SPKS masih terbatas, tetapi potensial jika dipadukan dengan perlakuan alkali.

Perlakuan enzimatis menunjukkan respons moderat: bromelain menghasilkan 2,011 GPa, hampir setara dengan kontrol, sedangkan papain mencapai 2,261 GPa. Hidrolisis protein dan hemiselulosa oleh enzim ini diduga berkontribusi pada perbaikan keteraturan fibril. Namun, literatur masih minim membahas pengaruh langsung enzim terhadap modulus Young [34], [39], [40], sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami efektivitasnya dibanding perlakuan kimia.

Secara keseluruhan, NaOH terbukti paling efektif dalam meningkatkan modulus elastisitas SPKS. Peningkatan modulus sangat relevan bagi aplikasi komposit, karena sesuai prinsip *rule of mixtures* akan meningkatkan modulus elastisitas komposit. Meski demikian, nilai modulus tinggi perlu diseimbangkan dengan ketangguhan untuk menghasilkan material yang tidak hanya kaku, tetapi juga tahan beban dinamis. Dengan demikian, strategi optimasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara modulus, kekuatan tarik, dan sifat ketangguhan dalam desain material komposit berbasis serat alam.

4. Kesimpulan

Perlakuan SPKS dengan agen kimia dan enzimatis menunjukkan perbedaan nyata pada sifat mekanik. Perlakuan alkali NaOH paling efektif, ditandai dengan peningkatan kekuatan tarik (209,050 MPa) dan modulus elastisitas (3,575 GPa) serta penyusutan diameter yang memperbesar rasio aspek. Efek ini berasal dari

penghilangan lignin dan hemiselulosa yang memperbaiki orientasi fibril selulosa.

Perlakuan enzimatik memberikan hasil lebih moderat. *Bromelain* mendekati kondisi awal (79,108 MPa; 2,011 GPa), sedangkan *papain* menunjukkan perbaikan lebih tinggi (86,231 MPa; 2,261 GPa), meski tetap di bawah NaOH. Mekanisme degradasi biologis hanya memperbaiki permukaan tanpa perubahan struktural signifikan.

Dengan demikian, enzim belum mampu menggantikan perlakuan kimia sebagai metode utama. *Papain* relatif lebih potensial dibanding *bromelain*, namun penggunaannya lebih tepat sebagai pelengkap atau kombinasi dengan NaOH untuk mengoptimalkan sifat mekanik sekaligus mendukung keberlanjutan komposit berbasis serat alam.

5. Saran

Perlakuan enzimatik dengan *bromelain* dan *papain* memiliki potensi dalam memodifikasi serat, meskipun efektivitasnya masih lebih rendah dibandingkan perlakuan kimia konvensional. Untuk meningkatkan kinerjanya, diperlukan optimasi kondisi serta integrasi dengan pendekatan tambahan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah mengatur suhu proses mendekati titik aktivitas optimum enzim, sehingga hidrolisis hemiselulosa dan protein berlangsung lebih efisien. Selain itu, integrasi dengan metode fisik seperti ultrasonikasi berpotensi mempercepat penetrasi enzim dan membersihkan permukaan serat secara lebih menyeluruh. Kombinasi perlakuan enzimatik dengan dosis ringan NaOH atau H_2O_2 juga dapat memperkuat efek modifikasi tanpa merusak selulosa.

Secara keseluruhan, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi pengaruh suhu, durasi, serta kombinasi metode fisik dan kimia ringan pada efektivitas perlakuan enzimatik. Strategi ini diharapkan mampu meningkatkan sifat mekanik serat sekaligus memperkuat posisi perlakuan enzimatik sebagai pendekatan pendukung yang ramah lingkungan dalam pengembangan komposit berbasis serat alam.

6. Daftar Pustaka

- [1] N. F. Ismail, N. A. M. Radzuan, A. B. Sulong, N. Muhamad, and C. H. C. Haron, "The Effect of Alkali Treatment on Physical, Mechanical and Thermal Properties of Kenaf Fiber and Polymer Epoxy Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 2005, 2021, doi: 10.3390/polym13122005.
- [2] S. A. Awad *et al.*, "A Comparative Assessment of Chemical, Mechanical, and Thermal Characteristics of Treated Oil Palm/Pineapple Fiber/Bio Phenolic Composites," *Polym. Compos.*, vol. 43, no. 4, pp. 2115–2128, 2022, doi: 10.1002/pc.26525.
- [3] R. Randis, D. B. Darmadi, F. Gapsari, A. A. A. Sonief, K. Anam, and C. W. Lai, "Cellulose nanofibers of oil palm fronds as a filler in nanocomposite coating for corrosion protection of copper," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 279, p. 135278, 2024.
- [4] R. Randis, D. B. Darmadi, F. Gapsari, A. As, E. D. Akpan, and E. E. Ebenso, "The potential of nanocomposite-based coatings for corrosion protection of metals : A review," *J. Mol. Liq.*, vol. 390, no. PA, p. 123067, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.123067.
- [5] R. S. M. G. and M. H. R. Razak Wahab, Mohd Sukhairi Mat Rasat, Norashikin Mohd Fauzi, Mohamad Saiful Sulaiman, Hashim W. Samsi, Nasihah Mokhtar, "Processing and Properties of Oil Palm Fronds Composite Boards from *Elaeis guineensis*," *Intech*, pp. 1–32, 2021, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00172J%0Ahttps://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.col surfa.2011.12.014>
- [6] Y. Jiang, P. Deng, L. Jing, and T. Zhang, "Tensile properties and structure characterization of palm fibers by alkali treatment," *Fibers Polym.*, vol. 20, no. 5, pp. 1029–1035, 2019.
- [7] J. Chaishome and S. Rattanapaskorn, "The influence of alkaline treatment of plant fibres on tensile properties of single fibres and composites," in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, 2017, pp. 46–49.

- [8] A. Adel Salih, R. Zulkifli, and C. H. Azhari, "Tensile properties and microstructure of single-cellulosic bamboo fiber strips after alkali treatment," *Fibers*, vol. 8, no. 5, p. 26, 2020.
- [9] S. H. Vattathurvalappil, M. M. Shaukat, R. Theravalappil, S. Z. Shuja, and W. G. Abdelrahman, "Techno-environmental evaluation of alkaline treatment in flax reinforced thermoplastics," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 662, 2024.
- [10] J. Kaima *et al.*, "Effect of NaOH Concentration on Tensile Strength of Bamboo Hand Sheet," *Mater. Sci. Forum*, vol. 1067, pp. 113–118, 2022, doi: 10.4028/p-8oo3r9.
- [11] J. Y. Boey, S. Baidurah, and G. S. Tay, "A Review on the Enhancement of Composite's Interface Properties Through Biological Treatment of Natural Fibre/Lignocellulosic Material," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 30, 2022, doi: 10.1177/09673911221103600.
- [12] A. L. Fong *et al.*, "A Review on the Hybrid Polymer Composites Comprising Natural Fibre and Nanomaterial Reinforcement," *J. Compos. Mater.*, 2025, doi: 10.1177/00219983251334861.
- [13] P. Valášek *et al.*, "Influence of Alkali Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Coir and Abaca Fibers," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 10, p. 2636, 2021, doi: 10.3390/ma14102636.
- [14] A. Montero *et al.*, "Coconut-Fiber Composite Concrete: Evaluation of Mechanical Performance," 2023, doi: 10.20944/preprints202305.1939.v1.
- [15] N. Poyyamozhi *et al.*, "Ecosystem Sustainability and Conservation of Waste Natural Fiber Strengthen Epoxy Composites for Lightweight Applications," *Environ. Qual. Manag.*, vol. 33, no. 4, pp. 211–216, 2023, doi: 10.1002/tqem.22047.
- [16] B. T. Amena, H. Altenbach, G. S. Tibba, and N. Hossain, "Physico-Chemical Characterization of Alkali-Treated Ethiopian Arabica Coffee Husk Fiber for Composite Materials Production," *J. Compos. Sci.*, vol. 6, no. 8, p. 233, 2022, doi: 10.3390/jcs6080233.
- [17] A. L. L. Flores *et al.*, "Effect of Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Jute/Polyester Composites," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 10, p. 2320, 2024, doi: 10.3390/ma17102320.
- [18] A. O. Ikoya, O. T. Uzoma, and O. A. Princewill, "Effects of Surface Modification on the Mechanical Properties and Water Absorbition of *Raphia Farinifera* (Raphia Fibre)," *Int. Res. J. Pure Appl. Chem.*, vol. 25, no. 3, pp. 68–75, 2024, doi: 10.9734/irjpac/2024/v25i3857.
- [19] K. Seisa, V. Chinnasamy, and A. U. Ude, "Surface Treatments of Natural Fibres in Fibre Reinforced Composites: A Review," *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 30, no. 2, pp. 82–89, 2022, doi: 10.2478/ftce-2022-0011.
- [20] A. R. Shafi, K. Abdan, N. D. A. Fazil, M. S. Salit, and A. M. Radzi, "Characterisation of Miswak (*Salvadora Persica*) Fibre-Reinforced Polylactic Acid Composites Prepared by Twin Screw Extrusion," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 32, no. S5, pp. 21–40, 2024, doi: 10.47836/pjst.32.s5.02.
- [21] E. M. Ezech, E. U. Luvia, and O. D. Onukwuli, "Evaluation of the Application of Chemically Adapted Gourd Fibre in Polyester Composite Fabrication," *World J. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 113–127, 2024, doi: 10.1108/wje-09-2023-0380.
- [22] C. Arumugam, G. S. Arumugam, A. Ganesan, and S. Muthusamy, "Mechanical and Water Absorption Properties of Short Banana Fiber/Unsaturated Polyester/Molecular Sieves + ZnO Nanorod Hybrid Nanobiocomposites," *Acs Omega*, vol. 6, no. 51, pp. 35256–35271, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c02662.
- [23] H. F. M. de Queiroz and M. D. Banea, "Methods to Increase the Mechanical Performance of Composite Adhesive Joints: An Overview With Focus on Joints With Natural Fibre Composite Adherends," *J. Compos. Mater.*, vol. 56, no. 26, pp. 3993–4010, 2022, doi: 10.1177/00219983221125906.

- [24] A. W. Pinto, D. Esteves, L. Nobre, J. Bessa, F. Cunha, and R. Figueiro, "Mechanical Performance Enhancement in Natural Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Through Surface Treatment and Matrix Functionalisation," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 4, p. 532, 2025, doi: 10.3390/polym17040532.
- [25] R. Choudhary, R. Kaushik, P. Chawla, and S. Manna, "Exploring the Extraction, Functional Properties, and Industrial Applications of Papain From Carica Papaya," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 105, no. 3, pp. 1533–1545, 2024, doi: 10.1002/jsfa.13776.
- [26] R. Ridwan, T. Rihayat, A. Ilmi, and N. Aidy, "PENGARUH SIFAT MATERIAL DAN TERMAL KOMPOSIT PLA (POLY LACTID ACID)/COCONUT FIBER (SABUT KELAPA) DENGAN MODIFIKSI PERENDAMAN NaOH," *J. Sains Dan Teknol. Reaksi*, vol. 20, no. 02, 2022, doi: 10.30811/jstr.v20i02.3390.
- [27] S. Hastuti, H. S. Budiono, D. I. Ivadiyanto, and M. N. Nahar, "Peningkatan Sifat Mekanik Komposit Serat Alam Limbah Sabut Kelapa (Cocofiber) Yang Biodegradable," *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil Dan Tek. Kim.*, vol. 6, no. 1, pp. 30–37, 2021, doi: 10.33366/rekabuana.v6i1.2257.
- [28] T. A. Sutrisno, Ik. D. krisma arta Arta, I. K. A. Widi, and R. Febritasari, "Pengaruh Variasi Fraksi Volume Terhadap Kekuatan Tarik Matrik Resin Epoxy Berpenguat Serat Praksok Dengan Perlakuan Alkalisasi NaOH," *Pros. Seniati*, vol. 6, no. 4, pp. 817–823, 2022, doi: 10.36040/seniati.v6i4.4980.
- [29] S. Majhi, S. Pradhan, V. Prakash, and S. K. Acharya, "Influence of Alkali Treatment on the Interfacial Shear Strength of Agave Lechuguilla Fiber and Its Significance as a Reinforcing Material in Polymer Composites for Mechanical Applications," *Polym. Compos.*, vol. 44, no. 6, pp. 3487–3499, 2023, doi: 10.1002/pc.27336.
- [30] I. Lestari, R. A. Sapitri, D. R. Gusti, and M. El Achaby, "The Potential of Cellulose from the Sugar Palm (Arenga Pinnata) Seed Shell for Removal of Cr(VI) Ions," *J. Fibers Polym. Compos.*, vol. 1, no. 1, pp. 52–65, 2022, doi: 10.55043/jfpc.v1i1.33.
- [31] N. H. Haryanti, Suryajaya, E. Suarso, Khaipanurani, and T. N. Manik, "Modification of Purun Tikus (Eleocharis Dulcis) Long Fiber With Potential as Composite Reinforcement Material," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2392, no. 1, p. 12031, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2392/1/012031.
- [32] R. Raharjo, D. B. Darmadi, F. Gapsari, P. H. Setyarini, and T. D. Widodo, "Characterization of bromelain enzyme treated Bamboo petung fiber (BPF) for composite reinforcement," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 9, p. 100683, 2024.
- [33] W. Tegegne and A. Haile, "Effect of papain enzyme surface modification on hydrophilic and comfort properties of polyester/cotton blend fabric," *Discov. Mater.*, vol. 4, no. 1, p. 2, 2024.
- [34] F. Sharafeddin, Z. Jowkar, and M. Safari, "Effects of Different Concentrations of Bromelain and Papain Enzymes on Shear Bond Strength of Composite Resin to Deep Dentin Using an Etch-and-Rinse Adhesive System," *Dent. Med. Probl.*, vol. 61, no. 1, pp. 85–91, 2024, doi: 10.17219/dmp/133404.
- [35] F. Rothenhäusler, A. Ouali, R. Rinberg, M. Demleitner, L. Kroll, and H. Ruckdaeschel, "Influence of Sodium Hydroxide, Silane, and Siloxane Treatments on the Moisture Sensitivity and Mechanical Properties of Flax Fiber Composites," *Polym. Compos.*, vol. 45, no. 10, pp. 8937–8948, 2024, doi: 10.1002/pc.28386.
- [36] S. Momeni, M. Safder, M. A. H. Khondoker, and A. Elias, "Valorization of Hemp Hurds as Bio-Sourced Additives in PLA-Based Biocomposites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 21, p. 3786, 2021, doi: 10.3390/polym13213786.
- [37] R. Verma, M. Shukla, and D. K. Shukla, "Effect of glass fiber hybridization on the mechanical properties of unidirectional, alkali-treated kenaf-epoxy composites," *Polym. Compos.*, vol. 43, no. 10, pp. 7483–7499, 2022.

- [38] I. Mukhtar, Z. Leman, E. S. Zainudin, and M. R. Ishak, "Effectiveness of alkali and sodium bicarbonate treatments on sugar palm fiber: mechanical, thermal, and chemical investigations," *J. Nat. Fibers*, 2020.
- [39] F. Sharafeddin and M. Safari, "Effect of Papain and Bromelain Enzymes on Shear Bond Strength of Composite to Superficial Dentin in Different Adhesive Systems," *J. Contemp. Dent. Pract.*, vol. 20, no. 9, pp. 1077–1081, 2019, doi: 10.5005/jp-journals-10024-2646.
- [40] F. Sharafeddin, M. H. Yazdanpanah, and Z. Jowkar, "Evaluation of the effects of bromelain and papain enzymes on shear bond strength of composite resin to enamel," *Int. J. Dent.*, vol. 2021, no. 1, p. 3233639, 2021.