

Studi Modifikasi Permukaan Serat Rami untuk Meningkatkan Karakteristik Mekanik Biokomposit PLA Berpenguat Serat Rami

Elok Hidayah¹, Ummi L. Jamilah², Aminatur Rosyidah³, Riris Idiawati⁴

^{1,3,4}Universitas KH. Mukhtar Syafaat, Program Studi Tadris IPA

²Universitas Jember, Program Studi Fisika

Email: elokhidayah@iaida.ac.id, umilailatul@unej.ac.id

Abstrak

Studi berbasis review ini bertujuan untuk mengeksplorasi efektivitas modifikasi permukaan serat rami dalam meningkatkan kinerja biokomposit berbasis PLA. Metode penelitian melibatkan analisis komprehensif terhadap artikel-artikel dari jurnal bertaraf internasional, yang dikumpulkan dari tahun 2015 hingga 2024. Studi analisis dilakukan terhadap artikel yang berfokus pada modifikasi permukaan serat rami, dan aplikasi serat rami hasil modifikasi sebagai penguat biokomposit PLA. Hasil studi terhadap beberapa artikel menunjukkan bahwa alkalisasi menggunakan NaOH diidentifikasi sebagai metode yang paling efektif, karena mampu meningkatkan kekasaran permukaan serat, memperkuat interaksi serat-matriks, dan meningkatkan kristalinitas. Perlakuan lain, seperti aplikasi *silane*, *thermal annealing*, dan *coupling agent*, juga memberikan kontribusi pada ikatan yang lebih baik serta peningkatan sifat mekanik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi berbagai perlakuan permukaan dapat mengoptimalkan sifat biokomposit rami/PLA, menjadikannya pilihan yang cukup baik untuk aplikasi material berkelanjutan.

Kata kunci: Serat Rami, Modifikasi Permukaan, Biokomposit PLA, Alkalisasi

[1] PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi dan perkembangan teknologi terbaru telah mendorong komunitas ilmiah untuk mengeksplorasi material baru yang dapat bersaing dengan teknologi mutakhir, sekaligus tetap ramah lingkungan dan berkelanjutan [1], [2]. Serat alami, ketika diperkuat dalam berbagai matriks polimer, menawarkan sifat mekanik dan termal yang sangat baik, menjadikannya alternatif menarik untuk serat sintetis. Dalam satu dekade terakhir, minat terhadap penggunaan serat alami sebagai bahan penguat pada bio dan green composite semakin meningkat [3], [4], [5].

Biokomposit adalah material komposit di mana salah satu atau kedua konstituennya bersifat biodegradable, sedangkan green composite secara khusus terdiri dari komponen yang sepenuhnya biodegradable [5], [6], [7]. Biokomposit dapat dikategorikan berdasarkan sifat konstituennya: matriks dapat berupa biopolimer dengan serat sintetis, serat dapat berupa serat alami dengan matriks sintetis, atau kedua komponen dapat bersifat biodegradable [5], [8]. Pergeseran menuju penggunaan biokomposit ini menunjukkan potensinya untuk menggantikan serat sintetis dalam material berkelanjutan [3].

Namun, terdapat beberapa tantangan terkait serat alami yang perlu diatasi, seperti daya lekat dan kompatibilitas yang buruk dengan matriks polimer hidrofobik, stabilitas termal yang terbatas,

kecenderungan membentuk agregat, serta ketahanan terhadap kelembapan yang rendah [1], [9], [10], [11]. Penelitian ekstensif telah dilakukan pada serat lignoselulosa dan integrasinya dalam berbagai matriks polimer, menghasilkan banyak ulasan komprehensif.

Adhesi yang buruk antara serat alami dan matriks dalam biokomposit memengaruhi karakteristik biokomposit yang dihasilkan, seperti kekuatan mekanik rendah, ketahanan termal rendah, dan daya serap air yang tinggi. Untuk mengatasi masalah ini, sejumlah penelitian telah dilakukan guna meningkatkan interaksi antara serat dan matriks dalam biokomposit berbasis serat alami. Modifikasi permukaan serat alami merupakan metode yang banyak digunakan untuk memperbaiki interaksi antara serat alami dan matriks polimer [12], [13].

Mariana et al. [14] dan Devnani [15] melakukan analisis tinjauan terkait modifikasi permukaan serat alami, dengan membahas metode-metode modifikasi permukaan baik secara kimiawi maupun fisik. Mereka juga menguraikan karakteristik biokomposit yang dihasilkan berdasarkan metode modifikasi permukaan yang digunakan. Zwawi [11] juga melakukan tinjauan terhadap biokomposit, meliputi modifikasi permukaan serat alami serta karakteristik serat alami setelah dimodifikasi, seperti kekuatan mekanik, ketahanan termal, daya serap, dan interaksi serat-matriks. Selain itu, ulasan tersebut juga membahas aspek aplikasi serat alami dengan berbagai polimer alami, teknik

pencampuran serat dan polimer, serta penerapan biokomposit.

Sementara itu, Mohammed et al. [16] membahas modifikasi permukaan serat alami untuk meningkatkan sifat hidrofobiknya. Artikel tersebut mencakup berbagai aspek penting, termasuk karakterisasi komposit berbasis serat alami, dampak modifikasi permukaan terhadap sifat mekanik dan termal serat alami, komponen kimia serat, sifat hidrofilik serat, serta interaksi serat-matriks. Seluruh diskusi didasarkan pada analisis berbagai metode modifikasi permukaan serat alami.

Elfaleh et al. [17] melakukan ulasan komprehensif terkait serat alami dan aplikasinya dalam material komposit. Artikel tersebut memberikan analisis mendalam tentang beberapa topik utama, termasuk karakteristik serat alami, aplikasinya dalam material komposit, serta dampak modifikasi permukaan terhadap kinerja komposit. Ulasan ini juga mencakup analisis potensi material komposit sebagai alternatif material konvensional.

Banyak ulasan telah membahas modifikasi permukaan serat alami (termasuk kenaf, rami, jute, flax, hemp, sabut kelapa, bagas tebu, bambu, nanas, dan lainnya) serta aplikasinya dalam material komposit (dengan matriks sintesis maupun alami) [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Namun, hanya sedikit yang secara khusus berfokus pada jenis serat dan matriks tertentu. Berdasarkan ulasan yang ada terkait serat alami, artikel ini bertujuan untuk menguraikan teknik modifikasi permukaan serat alami, khususnya serat rami, dan aplikasinya dalam biokomposit dengan matriks polylactic acid (PLA). Artikel ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti pemula dan pihak lain dalam memilih metode modifikasi yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk sintesis biokomposit berbasis serat rami dengan matriks PLA.

[2] METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian deskriptif dan analitis untuk mengeksplorasi modifikasi permukaan serat rami serta aplikasinya sebagai penguat dalam biokomposit berbasis PLA. Data penelitian diperoleh dari sumber informasi yang terindeks di Google Scholar. Pencarian di Google Scholar dilakukan menggunakan kata kunci yang relevan dengan topik penelitian mengenai modifikasi permukaan serat rami dan dampaknya pada biokomposit berbasis PLA.

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap semua artikel yang dikumpulkan (dari tahun 2015 hingga 2024). Fokus penelitian diarahkan pada artikel internasional. Dari total artikel yang terkumpul, dilakukan seleksi untuk memilih artikel yang secara khusus membahas modifikasi permukaan serat rami dalam biokomposit berbasis polylactic acid (PLA). Selanjutnya, dilakukan tinjauan komprehensif terhadap artikel-artikel terpilih untuk memberikan wawasan mendalam terkait topik penelitian.

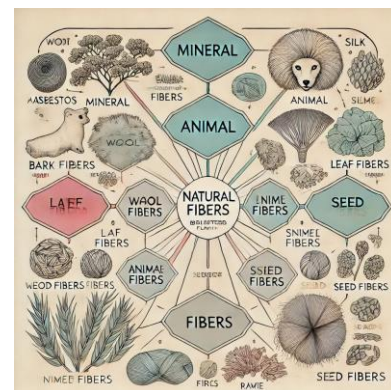
[3] HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Serat Alami

Serat alami berasal dari berbagai sumber, seperti tumbuhan (misalnya linen, hemp, jute, kapas), hewan (misalnya wol, sutra), dan mineral (misalnya asbes). Namun, karena risiko kesehatan seperti kanker akibat asbes, beberapa jenis serat alami dilarang di berbagai negara. Meski demikian, serat alami tetap populer di industri komposit. Serat-serat ini mencakup serat bast (flax, jute, rami, hemp, kenaf), serat biji (kapas, kelapa, kapuk), serat daun (nanas, abaka, sisal), serta serat dari rumput, alang-alang, dan kayu.

Serat primer, seperti jute, hemp, kenaf, dan sisal, dibudidayakan secara khusus untuk menghasilkan serat, sedangkan serat sekunder, seperti nanas, kelapa sawit, dan sabut kelapa, merupakan produk sampingan [15], [24], [25]. Serat bast dipisahkan dari batang tumbuhan melalui proses perendaman, di mana bakteri dan kelembapan membantu dalam ekstraksi serat. Sementara itu, serat daun diperoleh melalui metode manual atau mekanis.

Sumber yang berbeda menghasilkan serat dengan karakteristik yang unik. Serat daun, seperti sisal dan pisang, memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan serat bast. Serat kelapa diambil dari kulit luar buah kelapa. Serat biji berasal dari kapsul tumbuhan seperti kapas, sedangkan serat batang berasal dari tanaman tangguh dan ringan seperti tebu, jagung, dan gandum. Serat rumput dari jenis tanaman tinggi seperti bambu juga memiliki sifat unik. Pohon menyediakan serat kayu lunak dan kayu keras, yang sering dikombinasikan dengan bahan daur ulang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Klasifikasi serat alam berdasarkan sumbernya [17]

Proses ekstraksi serat alami merupakan tahap penting dalam pembuatan komposit berbasis serat. Berbagai teknik digunakan untuk ekstraksi serat, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan:

a. **Metode Dekortikasi:** Cocok untuk tanaman dengan batang berserat (seperti flax, hemp, dan jute), metode dekortikasi bertujuan menghilangkan lapisan kulit luar untuk memperlihatkan serat. Proses ini dapat dilakukan secara mekanis atau kimiawi, tergantung pada jenis tanaman dan kondisinya [26], [27].

b. **Proses Retting:** Merupakan teknik mikrobiologi yang memisahkan serat tumbuhan dari batangnya. Metode ini memanfaatkan mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, untuk menguraikan zat pektin yang mengikat serat. Retting dapat dilakukan di berbagai lingkungan: di udara terbuka, direndam dalam air, atau menggunakan bahan kimia tertentu untuk mempercepat proses [28].

c. **Metode Blow Molding:** Digunakan untuk ekstraksi serat bambu, metode ini melibatkan pemanasan dan pelunakan serat dengan menggunakan screw extruder. Serat kemudian didinginkan dalam ruang khusus, menghasilkan serat kontinu yang dikenal memiliki sifat mekanik yang sangat baik [29].

d. **Metode Enzimatis:** Menggunakan enzim tertentu untuk menguraikan komponen non-serat pada tanaman, metode ini efektif untuk mengekstraksi serat seperti sisal dan kenaf. Teknik ini menghasilkan serat berkualitas tinggi dengan tingkat kemurnian yang tinggi [30].

Pemilihan metode ekstraksi tergantung pada jenis serat dan aplikasi yang diinginkan. Serat rami merupakan salah satu jenis serat alami yang menggunakan metode dekortikasi untuk memisahkan serat dari kulit batangnya. Sebelum digunakan sebagai penguat dalam sintesis komposit, serat rami hasil dekortikasi memerlukan perlakuan khusus. Serat rami telah banyak digunakan dalam penelitian komposit, baik dengan matriks sintetis seperti polipropilena (PP) maupun matriks berbasis alami seperti polylactic acid (PLA) [28].

3.2 Serat Rami

Serat rami, yang berasal dari tanaman *Boehmeria nivea* (Gambar 2), merupakan serat bast yang diperoleh dari kulit luar batang. Tanaman ini terutama dibudidayakan di Asia Timur dan Asia Tenggara, termasuk di Tiongkok, India, dan Filipina, di mana iklim tropis dan subtropis mendukung pertumbuhannya. Rami dikenal karena kandungan selulosanya yang tinggi, yang berkontribusi pada kekuatan mekanik dan daya tahannya yang sangat baik [21], [31]. Tanaman ini dapat dipanen beberapa kali dalam setahun, menjadikannya sumber serat yang berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang minimal.

Salah satu karakteristik utama serat rami adalah sifat mekaniknya yang mengesankan, termasuk kekuatan tarik tinggi dan stabilitas termal. Karakteristik ini menjadikannya cocok untuk aplikasi komposit, di mana serat rami dapat bersaing dengan serat sintetis seperti serat kaca [2], [25].



Gambar 2. Serat rami [26]

Selain itu, serat rami memiliki densitas rendah, yang berkontribusi pada pembuatan komposit ringan, serta secara alami tahan terhadap bakteri dan jamur, meningkatkan daya tahannya dalam berbagai kondisi lingkungan [25].

Tiongkok merupakan produsen utama serat rami di dunia, menyumbang sebagian besar pasokan global. Produksi rami dunia diperkirakan mencapai sekitar 100.000 ton per tahun, dengan kontribusi yang lebih kecil dari Brasil, India, dan negara-negara Asia Tenggara lainnya [17], [25]. Meskipun pasar serat rami masih tergolong kecil dibandingkan dengan kapas, sifatnya yang berkelanjutan dan dapat diperbarui telah mendorong popularitasnya dalam aplikasi tekstil dan komposit ramah lingkungan.

3.3 Biokomposit PLA

Poli(asam laktat) (PLA) adalah polimer biodegradable yang berasal dari sumber daya terbarukan seperti pati jagung atau tebu. PLA banyak digunakan dalam biokomposit karena manfaat lingkungannya, transparansi yang sangat baik, serta sifat mekanik yang sebanding dengan plastik konvensional. Namun, PLA memiliki keterbatasan, seperti sifat rapuh dan stabilitas termal yang rendah, yang dapat memengaruhi kinerjanya dalam aplikasi yang menuntut. Kombinasi PLA dengan serat alami bertujuan untuk menciptakan material yang lebih berkelanjutan, meningkatkan sifat mekaniknya sambil mempertahankan sifat biodegradabilitasnya. Kompatibilitas PLA dengan serat alami menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi komposit ramah lingkungan [5], [7], [32].

Interaksi antara PLA dan serat alami memegang peranan penting dalam menentukan kinerja biokomposit. Serat alami seperti rami, jute, dan flax sering dipilih karena bobotnya yang ringan, kekuatan spesifik yang tinggi, dan sifat biodegradabilitasnya [21], [22]. Namun, mencapai adhesi antar muka yang kuat antara PLA yang bersifat hidrofobik dan serat alami yang bersifat hidrofilik merupakan tantangan tersendiri. Adhesi yang buruk dapat menyebabkan sifat mekanik yang lemah, seperti kekuatan tarik dan ketahanan benturan yang rendah [32]. Oleh karena itu, meningkatkan adhesi pada antarmuka serat-PLA sangat penting untuk memastikan biokomposit dapat berfungsi dengan baik dalam aplikasi teknis dan industri.

Untuk meningkatkan interaksi antara PLA dan serat alami, beberapa perlakuan modifikasi permukaan digunakan. Perlakuan alkali, misalnya, merupakan metode umum yang digunakan untuk meningkatkan kekasaran permukaan serat dan menghilangkan kotoran, sehingga menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan PLA. Perlakuan kimia seperti penggunaan agen kopling silan juga diterapkan untuk memperkenalkan gugus fungsi yang memfasilitasi adhesi serat-matriks yang lebih kuat [33], [34]. Perlakuan fisik, seperti thermal annealing, dapat lebih meningkatkan ikatan dengan memodifikasi morfologi serat [35]. Teknik-teknik ini membantu mengoptimalkan sifat mekanik dan termal biokomposit berbasis PLA, sehingga lebih cocok untuk berbagai aplikasi sambil mempertahankan keunggulan lingkungannya.

3.4 Modifikasi Permukaan Serat Rami

Adhesi antarmuka yang efektif dapat dicapai dengan memodifikasi serat, menggunakan aditif aktif antarmuka, atau mengubah teknik modifikasi matriks untuk serat selulosa. Teknik modifikasi serat ini terbagi menjadi tiga kategori [25]: fisik, kimia, dan biologis (Gambar 3). Metode kimia menggunakan zat seperti asam, alkali, dan agen kopling, sedangkan teknik fisik meliputi perlakuan plasma, corona discharge, dan iradiasi UV [25], [36]. Pendekatan biologis memanfaatkan enzim. Penting untuk dicatat bahwa tidak semua teknik modifikasi ramah lingkungan.



Gambar 3. Modifikasi permukaan serat alam [25]

Di antara ketiga metode tersebut, perlakuan kimia adalah yang paling sering digunakan dalam aplikasi teknis dan penelitian. Perlakuan alkali, khususnya dengan NaOH, banyak diterapkan karena dianggap efektif, mudah didapat, dan relatif biaya rendah [13], [37], [38], [39]. Perlakuan alkali hampir selalu digunakan pada tahap awal pemrosesan serat alami, sebelum serat digunakan dalam aplikasi teknis atau penelitian. Perlakuan ini mengoptimalkan kandungan selulosa kristalin pada serat alami dan menghilangkan daerah amorf, sehingga meningkatkan interaksi antara serat alami dan polimer, serta meningkatkan sifat mekanik dan termal serat tersebut [40]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa perlakuan alkali sering diterapkan dalam modifikasi permukaan serat alami, khususnya serat rami (Tabel 1).

Tabel 1. Modifikasi permukaan serat rami dan aplikasinya dalam biokomposit PLA

Modifikasi serat rami	Biokomposit PLA (dengan serat rami hasil modifikasi)	Ref.
penambahan Diisocyanates (IPDI) (0.5%, 1%, 1.5% dan 2%)	Penambahan IPDI meningkatkan sifat mekanik dan termal biokomposit PLA/rami. Peningkatan optimal terjadi pada penambahan IPDI 1,5%.	[21]
Alkalisasi NaOH (5%) selama 1 jam	Meningkatkan kekasaran permukaan serat, sehingga adhesi serat rami-PLA meningkat, begitu juga dengan kekuatan Tarik dan kekuatan bending biokomposit PLA berpenguat serat rami hasil modifikasi.	[22]
Perlakuan mekanik dan alkalisasi serat rami dengan NaOH (5%, 1 jamh)	Meningkatkan interaksi serat rami-PLA dan meningkatkan karakteristik mekanik biokomposit PLA berpenguat serat rami (kelenturan dan kekerasan).	[22]
Alkalisasi NaOH (7%, 3 jam) dengan variasi massa serat (30, 40, dan 50 (%))	- Alkalisasi memisahkan serat rami dari pengotor dan komponen amorf serat, sehingga interaksi (adhesi) serat rami-PLA meningkat - meningkatkan kekuatan mekanik biokomposit PLA berpenguat serat rami	[41]
Silane Coupling Agent (7%, 3 jam) dengan variasi massa serat 30, 40, and 50 (%)	- meningkatkan kekuatan Tarik dan bending biokomposit PLA berpenguat serat rami - pemberian silane mampu membentuk formasi baru dalam serat, sehingga meningkatkan ikatan serat rami-PLA	[41]
Kombinasi alkalisasi+silane (NaOH 7%, Silane 7%) dengan perendaman selama 3 jam (variasi massa serat 30, 40, and 50 (%))	Menghasilkan biokomposit PLA berpenguat serat rami dengan kekuatan Tarik dan dampak yang baik	[41]
Alkalisasi NaOH (7%, selama 3 jam) dengan variasi massa serat 5, 10, 20, 30, 40 (%)	-meningkatkan kekasaran permukaan serat rami -meningkatkan adhesi serat rami-PLA -meningkatkan kekuatan mekanik biokomposit PLA berpenguat serat rami	[42]
Silane 7%, selama 3 jam dengan variasi massa serat (5, 10, 20, 30, 40, (%))	-meningkatkan persebaran gugus hidroksil dalam serat rami -meningkatkan daya ikat serat rami/PLA -meningkatkan kekuatan Tarik dan bending biokomposit PLA berpenguat serat rami	[42]
Thermal Annealing (dengan variasi massa serat 5, 10, 20, 30, 40, (%))	- meningkatkan interaksi serat rami/PLA -meningkatkan karakteristik mekanik biokomposit PLA berpenguat serat rami	[42]
Alkalisasi NaOH 5% selama 30 min.	-meningkatkan kekasaran permukaan serat rami -meningkatkan interaksi serat rami/PLA -meningkatkan kekuatan Tarik dan modulus Tarik biokomposit PLA berpenguat serat rami	[40]

Silane 20% selama 1 jam	-meningkatkan gugus hidroksil serat rami -meningkatkan daya ikat (adhesi) antara serat rami/PLA Meningkatkan kekuatan tarik biokomposit rami/PLA	[40]
Kombinasi alkalisasi dan silane	Meningkatkan kekuatan Tarik dan bending biokomposit rami/PLA, sebagai akibat dari peningkatan interaksi serat rami/PLA	[40]
Penambahan Triglycidyl Isocyanurate (TGIC) 0,9 (wt%)	Meningkatkan kekuatan Tarik dan bending secara signifikan, masing-masing 49,8% dan 46,5%	[40]
Alkalisasi NaOH selama 3 jam dan 6 jam	Lama alkalisasi memberikan dampak terhadap peningkatan kekasaran permukaan serat rami (tidak pada kristalinitas), sehingga meningkatkan kekuatan tarik biokomposit rami/PLA	[4]

Penelitian yang dilakukan oleh Yu et al. [21] menunjukkan bahwa penambahan IPDI sebagai compatibilizer secara signifikan meningkatkan kekuatan mekanik dan stabilitas termal biokomposit ramie/PLA. Kondisi optimal dicapai dengan penambahan 1,5% IPDI terhadap total massa serat-matriks. Di sisi lain, penelitian oleh Yang et al. [22][22] menunjukkan bahwa perlakuan serat ramie menggunakan 5% NaOH selama 1 jam meningkatkan kekasaran permukaan serat, yang kemudian memperkuat interaksi antara ramie dan PLA. Peningkatan ini berkontribusi pada peningkatan kekuatan tarik dan kekuatan lentur biokomposit ramie-PLA.

Pada tahun 2017 dan 2018, Debeli et al. [35], [39] melakukan penelitian terhadap biokomposit PLA yang diperkuat dengan serat ramie. Metode modifikasi permukaan yang digunakan adalah perlakuan alkali dan silane. Perlakuan alkali meningkatkan kekasaran permukaan serat ramie, sehingga memperbaiki ikatan dengan PLA serta meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan termal. Sementara itu, perlakuan silane membuat serat menjadi lebih hidrofobik dengan meningkatkan jumlah gugus hidroksil, yang juga memperkuat ikatan dengan PLA. Perbedaan antara penelitian tahun 2017 dan 2018 adalah penggunaan proses thermal annealing pada tahun 2018, yang semakin meningkatkan adhesi serat-matriks.

Serupa dengan Debeli et al. (2017 dan 2018), pada tahun 2021, Zhan et al. menerapkan perlakuan silane dan alkali pada serat ramie untuk meningkatkan interaksi serat-PLA, dengan menggunakan 5 wt% NaOH dan 20 wt% silane [40]. Selain itu, Zhan et al. menambahkan 0,9 wt% Triglycidyl Isocyanurate (TGIC) dalam sintesis biokomposit serat ramie-PLA. Penambahan TGIC secara signifikan meningkatkan sifat mekanik komposit, yaitu kekuatan tarik meningkat sebesar 49,8% dan kekuatan lentur sebesar 46,5%. Perlakuan alkali tetap menjadi metode utama dalam memodifikasi permukaan serat ramie sebelum digunakan sebagai penguat dalam matriks PLA. Pada tahun 2022, Li et al. melakukan perlakuan alkali pada

serat ramie dengan dua durasi perendaman: 3 jam dan 6 jam. Analisis menggunakan SEM dan DSC menunjukkan bahwa durasi perendaman hanya memengaruhi kekasaran permukaan, tetapi tidak memengaruhi kristalinitas. Namun, perlakuan alkali selama 6 jam dianggap lebih unggul karena biokomposit PLA dengan serat yang direndam selama 6 jam memiliki kekuatan tarik 19,6% lebih tinggi dibandingkan dengan serat yang direndam selama 3 jam [4].

Berdasarkan analisis beberapa artikel, perlakuan alkali adalah metode modifikasi permukaan yang paling umum diterapkan pada serat ramie dalam sintesis biokomposit PLA. Perlakuan alkali meningkatkan kekasaran permukaan serat alami, memperbaiki interaksi antara serat dan matriks PLA, serta meningkatkan kristalinitas serat sehingga menjadi lebih hidrofobik. Hal ini menghasilkan peningkatan kekuatan mekanik pada biokomposit PLA/ramie. Konsentrasi alkali yang digunakan berkisar antara 5 wt% hingga 7 wt%, dengan durasi perendaman antara 30 menit hingga 3 jam. Metode lain seperti silane, thermal annealing, dan penambahan agen penghubung juga digunakan untuk mengoptimalkan ikatan serat-matriks.

[4] SUMBER PUSTAKA/RUJUKAN

- [1] C. Wang, Z. Ren, S. Li, and X. Yi, "Effect of ramie fabric chemical treatments on the physical properties of thermoset polylactic acid (PLA) composites," *Aerospace*, vol. 5, no. 3, Sep. 2018, doi: 10.3390/aerospace5030093.
- [2] X. Chen, J. Ren, N. Zhang, S. Gu, and J. Li, "Effects of heat treatment on the thermal and mechanical properties of ramie fabric-reinforced poly(lactic acid) biocomposites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 34, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2015, doi: 10.1177/0731684414562222.
- [3] E. Hidayah, A. Rosyidah, and F. Rizka Tamami, "NAOH EFFECT ON BIOCOMPOSITES: STUDI PENGARUH NAOH TERHADAP KEKUATAN TARIK BIOKOMPOSIT BERPENGUAT SERAT ALAM," *Journal of Educational and Applied Science*, vol. 1, no. 2, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.iaida.ac.id/index.php/jeas>
- [4] L. Guili, Y. Qiuran, H. Mingliang, and L. Haimei, "Effect of surface treatment of ramie fiber on crystallization behavior and tensile properties of poly (lactic acid) ," *China Plastics*, vol. 36, no. 11, pp. 51–58, 2022.
- [5] A. K. Trivedi, M. K. Gupta, and H. Singh, "PLA based biocomposites for sustainable products: A review," Oct. 01, 2023, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.aiepr.2023.02.002.

- [6] T. Khan, T. A. Sebaey, C. Muthukumar, H. I. Rao, R. M. Shahroze, and V. Parthasarathy, "Prediction of the tensile properties of biocomposites: a review of micro-mechanical models," 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s13399-024-06159-z.
- [7] V. H. M. Almeida, R. M. Jesus, G. M. Santana, and T. B. Pereira, "Polylactic Acid Polymer Matrix (Pla) Biocomposites with Plant Fibers for Manufacturing 3D Printing Filaments: A Review," Feb. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/jcs8020067.
- [8] N. Kaouche, M. Mebrek, A. Mokaddem, B. Doumi, M. Belkheir, and A. Boutaous, "Theoretical study of the effect of the plant and synthetic fibers on the fiber-matrix interface damage of biocomposite materials based on PHAs (polyhydroxyalkanoates) biodegradable matrix," *Polymer Bulletin*, vol. 79, no. 9, pp. 7281–7301, Sep. 2022, doi: 10.1007/s00289-021-03849-w.
- [9] C. H. Lee, A. Khalina, and S. H. Lee, "Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review," *Polymers* 2021, vol. 13, no. 3.
- [10] S. Sharma, A. Majumdar, and B. S. Butola, "Improving the Mechanical Properties of Ramie-Polylactic Acid Green Composites by Surface Modification using Single Bath Alkaline and Silane Treatment," May 24, 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-508725/v1.
- [11] M. Zwawi, "A review on natural fiber biocomposites, surface modifications and applications," Jan. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules26020404.
- [12] Sujito, "Fabrication and characterization of Short Single Bamboo Fibers Reinforced Polylactic Acid (PLA) Green Composites (GC)," *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, vol. 14, no. 02, pp. 2–5, 2014.
- [13] E. Hidayah, L. Musyarofah, D. Puspita, and S. Sujito, "Effect of mercerized surface treated natural fiber to the tensile properties of green composite," *Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1217, 2019.
- [14] Mariana D. Banea, Jorge S. S. Neto, and Daniel K. K. Cavalcanti, "Recent Trends in Surface Modification of Natural Fibres for Their Use in Green Composites," *Green Composites*, pp. 329–350, 2021.
- [15] G. L. Devnani, "Recent Trends in the Surface Modification of Natural Fibers for the Preparation of Green Biocomposite," *Green Composites*, pp. 273–293, 2021.
- [16] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications," *Int J Polym Sci*, vol. 2015, pp. 1–15, 2015, doi: 10.1155/2015/243947.
- [17] I. Elfaleh *et al.*, "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials," Sep. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2023.101271.
- [18] Allan C Manalo, E. Wani, N. A. Zukarnain, W. Karunasena, and K. Lau, "Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibre–polyester composites," *Compos B Eng*, vol. 80, pp. 73–83, 2015.
- [19] J. De and R. N. Baxi, "Experimental Investigation and Analysis of Mercerized and Citric Acid Surface Treated Bamboo Fiber Reinforced Composite," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 225, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/225/1/012154.
- [20] R. B. Yusoff, H. Takagi, and A. N. Nakagaito, "Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers," *Ind Crops Prod*, vol. 94, pp. 562–573, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.09.017.
- [21] T. Yu, C. Hu, X. Chen, and Y. Li, "Effect of diisocyanates as compatibilizer on the properties of ramie/poly(lactic acid) (PLA) composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 76, pp. 20–27, May 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.05.010.
- [22] J. Yang, L. Zhu, Z. Yang, L. Yao, and Y. Qiu, "Improving mechanical properties of ramie/poly (lactic acid) composites by synergistic effect of fabric cyclic loading and alkali treatment," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 47, no. 3, pp. 390–407, Sep. 2017, doi: 10.1177/1528083716648763.
- [23] U. L. Jamilah, "THE IMPROVEMENT OF RAMIE FIBER PROPERTIES AS COMPOSITE MATERIALS USING ALKALIZATION TREATMENT: NaOH CONCENTRATION," 2021.
- [24] S. Thomas and P. Balakrishnan, "Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/16122>
- [25] B. Teshome Wagaye *et al.*, "Textile & Leather Review A Review of Cellulosic Fibre Surface Modification Techniques-The Case of Ramie A Review of Cellulosic Fibre Surface Modification Techniques-The Case of Ramie," vol. 7, pp. 1061–1095, 2024, doi: 10.31881/TLR.
- [26] Y. Du, N. Yan, and M. T. Kortschot, "The use of ramie fibers as reinforcements in composites," in *Biofiber Reinforcements in*

- Composite Materials*, Elsevier Inc., 2015, pp. 104–137. doi: 10.1533/9781782421276.1.104.
- [27] M. Liu *et al.*, “Controlled retting of hemp fibres: Effect of hydrothermal pre-treatment and enzymatic retting on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 88, pp. 253–262, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.06.003.
- [28] C. H. Lee, A. Khalina, S. H. Lee, and M. Liu, “A Comprehensive Review on Bast Fibre Retting Process for Optimal Performance in Fibre-Reinforced Polymer Composites,” 2020, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2020/6074063.
- [29] H. Awais, Y. Nawab, A. Amjad, A. Anjang, H. Md Akil, and M. S. Zainol Abidin, “Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review,” Mar. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100082.
- [30] S. K. Paramasivam, D. Panneerselvam, D. Sundaram, K. N. Shiva, and U. Subbaraya, “Extraction, Characterization and Enzymatic Degumming of Banana Fiber,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 4, pp. 1333–1342, 2022, doi: 10.1080/15440478.2020.1764456.
- [31] L. Cheng *et al.*, “Ramie-degumming methodologies: A short review,” 2020, *SAGE Publications Ltd.* doi: 10.1177/1558925020940105.
- [32] “Retraction: PLA based Bio Composite reinforced with natural fibers – Review (IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1145 012069),” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1145, no. 1, p. 012188, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1145/1/012188.
- [33] P. B. Anand, A. Lakshmikanthan, M. P. G. Chandrashekarappa, C. P. Selvan, D. Y. Pimenov, and K. Giasin, “Experimental Investigation of Effect of Fiber Length on Mechanical, Wear, and Morphological Behavior of Silane-Treated Pineapple Leaf Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Fibers*, vol. 10, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/fib10070056.
- [34] C. Kit Ang, “Mechanical Strength and Water Absorption Analysis of Silane Treated Kenaf Natural Composites With Silicon Nanoparticles,” 2021, doi: 10.21203/rs.3.rs-297917/v1.
- [35] D. K. Debeli, M. Tebyetekerwa, J. Hao, F. Jiao, and J. Guo, “Improved thermal and mechanical performance of ramie fibers reinforced poly(lactic acid) biocomposites via fiber surface modifications and composites thermal annealing,” *Polym Compos*, vol. 39, pp. E1867–E1879, Jun. 2018, doi: 10.1002/pc.24844.
- [36] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, “Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview,” *Compos Interfaces*, vol. 8, no. 5, pp. 313–343, 2001, doi: 10.1163/156855401753255422.
- [37] L. Musyarofah, S. Sujito, E. Hidayah, and E. Supriyanto, “Effect of Alkalization on Mechanical Properties of Green Composites Reinforced with Cellulose from Coir Fiber.”
- [38] E. Hidayah, A. Sjaifullah, L. Rohman, and E. Supriyanto, “Influence of Citric Acid Addition and Fiber Treatment on Tensile Properties of Ramie Fiber Reinforced Poly-lactic Acid (PLA) Green Composite,” *Jour of adv research in dynamical & control systems*, vol. 12, p. 2, 2020, doi: 10.5373/JARDCS/V12SP2/SP20201136.
- [39] D. K. Debeli, Z. Qin, and J. Guo, “Study on the Pre-Treatment, Physical and Chemical Properties of Ramie Fibers Reinforced Poly (Lactic Acid) (PLA) Biocomposite,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, no. 4, pp. 596–610, Jul. 2018, doi: 10.1080/15440478.2017.1349711.
- [40] J. Zhan *et al.*, “Effect of the compatilizer and chemical treatments on the performance of poly(lactic acid)/ramie fiber composites,” *Composites Communications*, vol. 27, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.coco.2021.100843.
- [41] D. K. Debeli, Z. Qin, and J. Guo, “Study on the Pre-Treatment, Physical and Chemical Properties of Ramie Fibers Reinforced Poly (Lactic Acid) (PLA) Biocomposite,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, no. 4, pp. 596–610, Jul. 2018, doi: 10.1080/15440478.2017.1349711.
- [42] D. K. Debeli, M. Tebyetekerwa, J. Hao, F. Jiao, and J. Guo, “Improved thermal and mechanical performance of ramie fibers reinforced poly(lactic acid) biocomposites via fiber surface modifications and composites thermal annealing,” *Polym Compos*, vol. 39, pp. E1867–E1879, Jun. 2018, doi: 10.1002/pc.24844.