

Pengaruh Durasi Pengasapan Terhadap Sifat Tarik Serat Tunggal dan Morfologi Permukaan Serat Pelelah Aren (*Arenga Pinnata*)

Lery Alfriany Salo^{1*}, Musa Bondaris Palungan², Nitha³

^{1,2)} Jurusan Teknik mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus

Jalan Perintis Kemerdekaan Km 13 No. 28 Daya, Makassar, Indonesia 90243

Email: musbop@ukipaulus.ac.id²

^{1,3)} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indosesia Toraja

Jl. Nusantara No. 12, Makale 91811, Tana Toraja

Email: lerysalo@ukitoraja.ac.id^{1*}, nithamaska@yahoo.com³

ABSTRAK

Pemanfaatan serat alam sebagai penguat komposit ramah lingkungan terus meningkat, namun keterbatasan sifat fisik, kimia, dan ikatan antarmuka masih menjadi tantangan utama dalam aplikasinya. Salah satu pendekatan modifikasi serat yang potensial dan relatif sederhana adalah perlakuan pengasapan, yang mampu memodifikasi struktur kimia dan morfologi permukaan serat. Penelitian ini menganalisis pengaruh durasi pengasapan suhu rendah terhadap komposisi kimia, sifat fisik, morfologi permukaan, dan kekuatan tarik serat tunggal pelelah aren bagian bawah. Pengasapan dilakukan menggunakan kotak pengasapan dengan sumber asap dari pembakaran tempurung kelapa, pada suhu terkontrol 45 °C, dengan variasi durasi 0, 5, 10, 15, dan 20 jam. Parameter yang diuji meliputi komposisi kimia, kekuatan tarik serat tunggal, serta karakterisasi permukaan menggunakan SEM. Hasil menunjukkan hemiselulosa menurun dari 23,70% menjadi 19,70% dan lignin dari 17,17% menjadi 10,34%. Kekuatan tarik meningkat dari 210,64 MPa menjadi maksimum 421,59 MPa pada durasi 15 jam, kemudian menurun pada 20 jam. Citra SEM mengonfirmasi peningkatan kekasaran permukaan hingga durasi optimum 15 jam, sedangkan pengasapan 20 jam menunjukkan indikasi *microcrack* dan delaminasi. Durasi pengasapan 15 jam direkomendasikan sebagai kondisi optimum.

Kata kunci: Serat Pelelah Aren, Pengasapan, Kekuatan Tarik, Komposisi Kimia, Morfologi Permukaan

ABSTRACT

*The use of natural fibers as environmentally friendly composite reinforcements has increased significantly; however, limitations in physical and chemical properties, as well as in interfacial bonding, remain major challenges. One potential and relatively simple fiber modification approach is smoking treatment, which can alter the chemical structure and surface morphology of fibers. This study investigates the effect of low-temperature smoking duration on the chemical composition, physical properties, surface morphology, and single-fiber tensile strength of lower-part sugar palm (*Arenga pinnata*) sheath fibers. The smoking process was conducted using a smoking chamber with coconut shell combustion as the smoke source at a controlled temperature of 45 °C, with treatment durations of 0, 5, 10, 15, and 20 h. The evaluated parameters included chemical composition, single-fiber tensile strength, and surface characterization using SEM. The results show that hemicellulose decreased from 23.70% to 19.70% and lignin from 17.17% to 10.34%, and an increase in density from 0.7905 to 1.0663 g/cm³. The tensile strength increased from 210.64 MPa to a maximum of 421.59 MPa at 15 h of smoking, followed by a decrease at 20 h. SEM images confirmed enhanced surface roughness up to an optimum duration of 15 h, whereas 20 h of smoking showed microcracks and delamination. A smoking duration of 15 h is recommended as the optimum condition.*

Keywords: Sugar Palm Fiber, Smoking Treatment, Tensile Strength, Chemical Composition, Surface Morphology

Pendahuluan

Transformasi industri menuju praktik produksi yang lebih hijau semakin menguat seiring meningkatnya perhatian terhadap ekonomi sirkular dan penurunan emisi karbon. Kondisi ini menjadikan material berbasis biomassa, terutama serat alam, sebagai alternatif penting untuk menggantikan material sintetis pada berbagai aplikasi komposit. Serat lignoselulosa banyak dipilih karena sifatnya ringan, dapat diperbarui, serta memungkinkan proses produksi yang relatif sederhana sehingga berpotensi mengurangi dampak lingkungan [1], [2], [3], [4], [5]. Dari perspektif industri terapan, problem utama tidak berhenti pada pencapaian kekuatan mekanik semata, melainkan juga terkait kebutuhan material yang konsisten, mudah diproses, dan mampu mempertahankan performa pada skala produksi [6]. Sejumlah studi menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi serat alam dalam produk industri bergantung kuat pada strategi modifikasi permukaan yang tepat, khususnya melalui optimasi parameter proses yang memperhatikan efisiensi, keamanan, dan keberlanjutan [6], [7], [8].

Di Indonesia, aren (*Arenga pinnata*) memiliki ketersediaan biomassa yang besar, termasuk bagian pelepahnya yang selama ini umumnya belum dimaksimalkan sebagai bahan baku bernilai tinggi. Serat aren mempunyai potensi mekanik yang cukup baik untuk dikembangkan sebagai penguat komposit, sehingga sangat relevan bagi penguatan industri material berbasis sumber daya lokal [9]. Selain itu, pemanfaatan serat alam dalam bentuk filamen komposit untuk teknologi manufaktur aditif seperti FDM juga semakin meningkat, sehingga serat aren berpeluang masuk ke arah pengembangan material modern [10]. Walaupun demikian, proses industrialisasi menuntut karakter serat yang stabil dan seragam, sedangkan serat alam cenderung menunjukkan variasi akibat perbedaan sumber, bagian tanaman, dan lingkungan tumbuh [2]. Kajian komparatif terhadap serat aren mengindikasikan adanya perbedaan kandungan kimia dan sifat tarik yang dipengaruhi oleh lokasi dan karakter serat, sehingga perlakuan modifikasi diperlukan untuk mencapai keseragaman performa sebelum diaplikasikan pada material komposit [2], [11].

Kendala teknis yang umum dijumpai pada serat lignoselulosa dalam sistem komposit berkaitan dengan sifat higroskopis, keberadaan komponen pengganggu pada permukaan serat, serta lemahnya kompatibilitas dengan matriks polimer [4], [12]. Kondisi ini terutama dipengaruhi oleh fraksi hemiselulosa yang bersifat amorf dan mudah menyerap air, diikuti keberadaan lignin serta lapisan wax yang dapat mengurangi adhesi. Selulosa merupakan komponen yang menentukan serat dan bagian kristalin yang berkaitan erat dengan kekuatan tarik, sementara hemiselulosa sering dikaitkan dengan ketidakstabilan dimensi dan peningkatan penyerapan kelembaban; lignin berperan meningkatkan kekakuan namun dapat berdampak beragam terhadap interaksi permukaan [12], [13] dan [14]. Dalam pengembangan material berbasis hemiselulosa, perubahan fraksi amorf berpengaruh terhadap ketahanan dan peningkatan nilai tambah biomassa [13]. Oleh sebab itu, modifikasi serat diperlukan untuk mengubah komposisi kimia serta karakter permukaan, karena kedua aspek tersebut menentukan performa tarik serat tunggal sekaligus kualitas ikatan antarmuka pada komposit [4], [7].

Dalam praktik industri, metode perlakuan serat dituntut tidak hanya efektif meningkatkan performa, tetapi juga harus ekonomis, aman diterapkan, serta memungkinkan pengendalian proses yang mudah. Perlakuan berbasis alkali dan bahan kimia sering dipakai untuk meningkatkan kekuatan mekanik [15]. Namun perlakuan alkali dapat meningkatkan biaya produksi serta menghasilkan residu yang memerlukan penanganan lingkungan [7], [16]. Hal tersebut mendorong berkembangnya metode perlakuan alternatif yang lebih bersih, sederhana, dan lebih realistik diterapkan oleh industri, termasuk perlakuan fisik dan pendekatan berbasis asap [7]. Strategi modifikasi yang minim bahan kimia menjadi arah penting dalam industrialisasi serat alam, khususnya untuk memperbaiki adhesi antarmuka serta menghasilkan proses yang lebih ramah lingkungan [4].

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas serat alam adalah pengasapan. Proses pengasapan telah lama digunakan dalam pengawetan bahan organik seperti kayu dan makanan, dan belakangan ini mulai diterapkan dalam pengolahan serat alam. Pengasapan diharapkan dapat meningkatkan ketahanan serat terhadap kelembaban, meningkatkan daya rekat dengan matriks dalam material komposit, serta memperbaiki karakteristik mekanik serat seperti kekuatan tarik dan ketahanan aus [2]. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengaruh pengasapan terhadap karakteristik serat pelepah aren menjadi penting untuk mengeksplorasi potensi material ini sebagai alternatif bahan dalam berbagai aplikasi teknik dan industri.

Perlakuan pengasapan pada permukaan serat dilakukan dengan menggunakan asap hasil pembakaran tempurung kelapa. Selama proses pengasapan berlangsung, terjadi penarikan air dan pengendapan berbagai senyawa kimia dari asap yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia serat yang diasapi. Asap dari tempurung kelapa mengandung senyawa seperti karbonil, fenol, dan asam asetat. Gugus karbonil berperan dalam mengubah warna permukaan serat menjadi kuning kecoklatan hingga coklat tua, sementara fenol memiliki sifat antioksidan dan antimikroba yang dapat memperpanjang ketahanan serat terhadap degradasi lingkungan [2], [1].

Penggunaan asap tempurung kelapa pada suhu rendah (45°C) dapat dipandang sebagai metode modifikasi yang berpotensi murah, praktis, dan tidak bergantung pada bahan kimia agresif, sehingga menarik untuk aplikasi terapan berbasis biomassa lokal. Dalam kerangka proses, durasi pengasapan (0–20 jam) diperkirakan menjadi parameter dominan yang menentukan intensitas perubahan komposisi kimia serta pergeseran mikrostruktur serat [2], [17]. Senyawa volatil dalam asap diketahui dapat berinteraksi dengan permukaan serat dan berkontribusi terhadap perubahan pada komponen amorf seperti hemiselulosa melalui paparan panas ringan dan reaksi di permukaan [18]. Sejumlah penelitian mengenai perlakuan pengasapan menunjukkan bahwa perlakuan jenis ini mampu memodifikasi tampilan permukaan serat (SEM) dan meningkatkan sifat tarik serat tunggal, terutama ketika perlakuan dilakukan pada durasi optimum tertentu—sehingga relevan untuk optimasi proses pada skala industrial [17], [19]. Bahkan, penelitian terbaru menunjukkan pengasapan dapat memberikan peningkatan kekuatan tarik disertai perbaikan morfologi, menandakan bahwa kontrol parameter proses menjadi kunci dalam membentuk karakter serat [19], [20].

Komposisi (selulosa, hemiselulosa, lignin) berperan sebagai indikator perubahan struktur internal, sedangkan SEM mencerminkan perubahan permukaan melalui indikator seperti kekasaran, pori, retak mikro, deposisi permukaan, atau tingkat kebersihan serat. Uji tarik serat tunggal menjadi indikator utama untuk menilai kinerja mekanik serat sebagai kandidat penguat komposit [4], [12]. Peningkatan kekasaran permukaan dan reduksi komponen amorf tertentu dapat mendorong perbaikan ikatan (*interlocking*) dan adhesi, namun perlakuan yang terlalu intensif dapat menyebabkan *microcrack* yang justru melemahkan serat [4], [2], [20].

Penelitian mengenai peningkatan sifat mekanik serat aren sebelumnya dilakukan dengan perlakuan alkali 5%, dimana meningkatkan kekuatan tarik maksimal sebesar 297,2 MPa [21]. Beberapa penelitian sebelumnya mengenai perlakuan

pengasapan untuk serat alam dengan tujuan meningkatkan sifat mekanis. Perlakuan pengasapan pada serat daun nanas raja meningkatkan kekuatan tarik serat tunggal hingga mencapai nilai tertinggi pada pengasapan 15 jam [1], [2]. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa perlakuan pengasapan tertutup dengan variasi pengasapan 1,2,3,4 dan 5 jam pada serat Beluru berpengaruh nyata terhadap perilaku mekanik komposit, di mana sampel komposit yang menggunakan serat dengan pengasapan 2 jam memiliki defleksi yang lebih kecil dibandingkan dengan komposit yang menggunakan serat tanpa perlakuan pengasapan, mengindikasikan bahwa pengasapan serat dapat meningkatkan kekakuan dan respons mekanik material komposit terhadap beban lentur yang diberikan [22].

Gap penelitian ini terletak pada belum adanya studi pengasapan serat pelepah aren suhu rendah (45°C) yang mengintegrasikan analisis komposisi kimia, morfologi SEM, dan sifat tarik serat tunggal sebagai dasar optimasi proses. Novelty penelitian ini adalah penerapan kimia–morfologi–mekanik untuk mengevaluasi variasi durasi pengasapan (0–20 jam) serta menentukan kondisi optimum bagi pengembangan serat komposit berbasis biomassa.

Metode Penelitian

Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan perlakuan berupa variasi durasi pengasapan terhadap serat pelepah aren bagian bawah. Perlakuan pengasapan dilakukan pada suhu tetap 45°C dengan sumber asap tempurung kelapa. Variasi durasi pengasapan terdiri atas lima kelompok perlakuan: tanpa pengasapan (0 jam) sebagai kontrol, serta pengasapan 5 jam, 10 jam, 15 jam, dan 20 jam. Parameter keluaran yang diamati meliputi (1) sifat tarik serat tunggal, (2) morfologi permukaan serat melalui SEM, serta (3) komposisi kimia serat (selulosa, lignin, dan hemiselulosa). Hasil pengujian dianalisis untuk menentukan kecenderungan perubahan sifat serat dan durasi perlakuan optimum.

Alat dan Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian adalah serat pelepah aren (*Arenga pinnata*) yang diambil pelepah bagian bawah (gambar 1). Tempurung kelapa digunakan sebagai sumber asap pada proses pengasapan. Aquades untuk membilas serat pelepah aren. Alat yang digunakan antara lain: penggaris, gunting, palu kayu, jangka sorong, tali, kotak pengasapan (*smoking chamber*) yang dapat dilihat pada gambar 2, termometer, alat uji tarik serat tunggal (*universal testing machine*), *Scanning Electron Microscope* (SEM) FlexSEM 1000 II, dan perangkat analisis komposisi kimia.



Gambar 1. Pelepah aren dan serat pelepah aren

Langkah-Langkah Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian adalah:

1. Pemisahan serat dengan cara ditumbuk dan disisir secara manual.
2. Serat pelepah aren dibersihkan dengan aquades dan dikeringkan pada suhu ruang. Serat dikelompokkan sesuai dengan variasi perlakuan pengasapan.
3. Serat pelepah aren digantung dalam kotak pengasapan.
4. Membakar tempurung kelapa dalam drum hingga mengeluarkan asap, setelah itu apinya dimatikan kemudian drum didorong ke kotak dan asap diarahkan ke kotak pengasapan melalui saluran pipa.
5. Pengasapan berlangsung secara kontinu dengan variasi waktu dalam kotak pengasapan (gambar 2). Serat pelepah aren berturut-turut dikeluarkan dari kotak pengasapan sesuai dengan lama waktu pengasapan masing-masing 5, 10, 15 dan 20 jam.
6. Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) digunakan untuk menganalisis atau mengkarakterisasi morfologi permukaan serat pelepah aren.
7. Uji Komposisi untuk menentukan kandungan hemiselulosa, selulosa, dan lignin.
8. Uji Tarik Serat Tunggal serat pelepah aren untuk mengetahui kekuatan tarik serat tunggal. Spesimen dibuat berdasarkan standar ASTM D3379-02. Pengujian tarik merupakan metode pengukuran untuk mengevaluasi ketahanan bahan terhadap tegangan tarik tertentu, sekaligus mengukur elongasi atau perpanjangan panjang yang terjadi pada bahan tersebut [23].
9. Analisa dan Pembahasan.



Gambar 2. Kotak Pengasapan

Variabel Penelitian

Variabel bebas merupakan variabel yang telah ditentukan dari awal, yaitu variasi waktu perlakuan pengasapan serat pelelah aren masing-masing 5, 10, 15 dan 20 jam. Variabel terikat dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu variabel kualitatif dan kuantitatif. Variabel terikat kualitatif yaitu data yang disajikan dalam bentuk foto seperti foto hasil SEM. Sedangkan variabel terikat kuantitatif yaitu nilai yang diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian seperti komposisi kandungan unsur serat dan tegangan tarik.

Hasil Dan Pembahasan

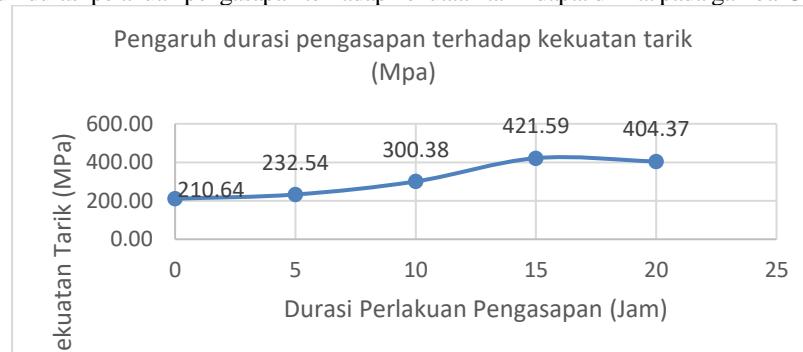
Hasil Uji Tarik Serat Tunggal

Hasil pengujian tarik serat tunggal menunjukkan bahwa variasi durasi pengasapan memberikan pengaruh nyata terhadap kekuatan tarik serat pelelah aren bagian bawah. Serat tanpa perlakuan (0 jam) memiliki kekuatan tarik sebesar 210,64 MPa. Setelah dilakukan pengasapan selama 5 jam, nilai kekuatan tarik meningkat menjadi 232,54 MPa, kemudian meningkat lebih lanjut pada durasi 10 jam menjadi 300,38 MPa. Peningkatan paling tinggi diperoleh pada durasi 15 jam dengan nilai kekuatan tarik mencapai 421,59 MPa, sebelum mengalami penurunan pada durasi 20 jam menjadi 404,37 MPa. Secara umum, tren ini menunjukkan bahwa perlakuan pengasapan mampu meningkatkan kekuatan tarik serat hingga durasi optimum tertentu, kemudian cenderung menurun ketika durasi perlakuan terlalu lama. Hasil uji tarik dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil uji kekuatan tarik serat pelelah aren

Perlakuan (Jam)	Kekuatan Tarik (Mpa)
0	210.64
5	232.54
10	300.38
15	421.59
20	404.37

Grafik pengaruh durasi pelakuan pengasapan terhadap kekuatan tarik dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Grafik pengaruh durasi pelakuan pengasapan terhadap kekuatan tarik

Peningkatan kekuatan tarik akibat perlakuan pengasapan menunjukkan bahwa pengasapan berperan sebagai perlakuan modifikasi yang mampu memperbaiki karakter internal maupun permukaan serat. Kenaikan bertahap dari kontrol menuju 5 jam (naik 10,40%) dan 10 jam (naik 42,60%) mengindikasikan bahwa paparan asap dan panas ringan mulai memengaruhi struktur serat, kemungkinan melalui penurunan komponen amorf tertentu (terutama hemiselulosa) atau perubahan pada ikatan antar komponen lignoselulosa. Pada kondisi ini, serat cenderung menjadi lebih stabil dan lebih “kompak” sehingga mampu menahan beban tarik lebih baik.

Kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada durasi 15 jam, yang mencapai 421,59 MPa atau meningkat sebesar 100,15% dibandingkan dengan kontrol. Nilai ini menunjukkan bahwa durasi 15 jam merupakan kondisi yang paling efektif dalam memaksimalkan perbaikan struktur serat tanpa menimbulkan kerusakan mikro yang berarti. Dari sudut pandang aplikasi industri, kondisi optimum semacam ini penting karena menunjukkan adanya “window process” yang bisa diadopsi secara terukur untuk meningkatkan performa serat lokal dengan metode sederhana dan berbiaya rendah.

Pada durasi 20 jam, kekuatan tarik mengalami penurunan menjadi 404,37 MPa, meskipun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan dengan serat tanpa pengasapan (meningkat sebesar 91,97%). Penurunan ini dapat dijelaskan melalui konsep over-treatment, yaitu kondisi ketika perlakuan yang diberikan melebihi durasi optimum sehingga menimbulkan perubahan struktur mikro yang tidak menguntungkan. Pada pengasapan yang terlalu lama, energi termal yang diterima serat berpotensi menyebabkan degradasi lanjutan komponen struktural, termasuk pemutusan sebagian rantai selulosa dan pelemahan ikatan antar mikrofibril. Selain itu, pengamatan SEM menunjukkan indikasi munculnya mikroretak dan ketidakteraturan permukaan, yang dapat berfungsi sebagai titik konsentrasi tegangan saat serat mengalami pembebaan tarik. Mikroretak tersebut mempermudah inisiasi kegagalan dan menyebabkan serat patah pada tegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi optimum. Fenomena penurunan sifat mekanik akibat perlakuan berlebih ini umum dijumpai pada perlakuan termal atau pemaparan berkepanjangan pada serat alam, di mana peningkatan performa mekanik hanya terjadi hingga batas tertentu, kemudian menurun ketika intensitas atau durasi perlakuan melampaui ambang optimum struktur serat.

Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian Palungan (2017) dimana kekuatan tarik optimum serat nanas raja dihasilkan dari pengasapan 15 jam [2], [3]. Dengan demikian, pola yang terbentuk menunjukkan bahwa durasi pengasapan memberikan efek positif hingga kondisi optimum (15 jam), namun perlakuan yang lebih panjang cenderung mengurangi kekuatan tarik meski masih lebih baik daripada serat tanpa perlakuan. Hasil ini memperkuat bahwa pengasapan suhu rendah menggunakan asap tempurung kelapa dapat berfungsi sebagai metode modifikasi serat yang potensial, selama durasi perlakuan dikontrol secara tepat.

Perubahan Komposisi Kimia Serat akibat Variasi Durasi Pengasapan

Hasil analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa perlakuan pengasapan pada suhu 45°C menggunakan asap tempurung kelapa dengan variasi durasi 0–20 jam menyebabkan perubahan signifikan pada komponen lignoselulosa serat pelepas aren bagian bawah. Secara umum, kadar hemiselulosa dan lignin mengalami penurunan seiring bertambahnya durasi pengasapan, sedangkan selulosa cenderung stabil. Perubahan ini mengindikasikan bahwa perlakuan pengasapan suhu rendah memengaruhi fraksi amorf dan matriks pengikat pada serat. Nilai komposisi kimia serat pelepas aren dapat dilihat pada Tabel 2.

Kadar hemiselulosa menurun dari 23,7% (0 jam) menjadi 19,7% (20 jam). Penurunan ini menunjukkan bahwa hemiselulosa merupakan komponen yang responsif terhadap pengasapan, karena hemiselulosa bersifat amorf dan lebih mudah terdegradasi atau terurai pada perlakuan panas ringan. Penurunan hemiselulosa biasanya berdampak positif karena hemiselulosa berkaitan erat dengan daya serap air. Berkurangnya hemiselulosa berarti serat menjadi lebih stabil dan lebih tahan terhadap kelembaban.

Tabel 2. Komposisi kimia serat pelepas aren

Perlakuan (Jam)	Hemiselulosa (%)	Selulosa (%)	Lignin (%)
0	23.7	51.91	17.17
5	22.67	52.03	16.74
10	21.06	52.09	15.19
15	20.09	52.93	12.83
20	19.7	50.18	10.34

Kadar hemiselulosa menurun dari 23,7% (0 jam) menjadi 19,7% (20 jam). Penurunan ini menunjukkan bahwa hemiselulosa merupakan komponen yang responsif terhadap pengasapan, karena hemiselulosa bersifat amorf dan lebih mudah terdegradasi atau terurai pada perlakuan panas ringan. Secara praktis, penurunan hemiselulosa biasanya berdampak positif karena hemiselulosa berkaitan erat dengan daya serap air. Berkurangnya hemiselulosa berarti serat menjadi lebih stabil dan lebih tahan terhadap kelembaban.

Kadar selulosa cukup stabil dari 51,91% menurun menjadi 50,18%. Ini menandakan bahwa perlakuan pengasapan bukan hanya mempengaruhi fraksi amorf, tetapi juga berdampak pada struktur selulosa atau menyebabkan hilangnya komponen selulosa dalam bentuk tertentu (misalnya karena perubahan struktur atau degradasi sebagian).

Lignin menurun dari 17,17% (0 jam) menjadi 10,34% (20 jam). Penurunan lignin menunjukkan bahwa pengasapan membantu mengurangi matriks pengikat aromatik pada serat. Lignin pada satu sisi meningkatkan kekakuan, tetapi pada sisi lain dapat membentuk lapisan yang menutupi permukaan serat dan mengurangi adhesi. Dengan berkurangnya lignin, permukaan serat cenderung lebih terbuka dan mudah dimodifikasi.

Hasil Foto SEM

Foto SEM serat tanpa pengasapan menunjukkan permukaan serat yang relatif halus dan homogen, dengan lapisan permukaan yang masih didominasi oleh komponen non-selulosa seperti lignin dan hemiselulosa. Pada kondisi ini, void dan pori mikro permukaan masih tampak terbuka, serta struktur mikrofibril selulosa belum terekspos secara jelas. Keberadaan lapisan amorf dan void permukaan tersebut berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan lokal saat pembebahan tarik, sehingga serat menunjukkan kekuatan tarik terendah, yaitu sebesar 210,64 MPa.

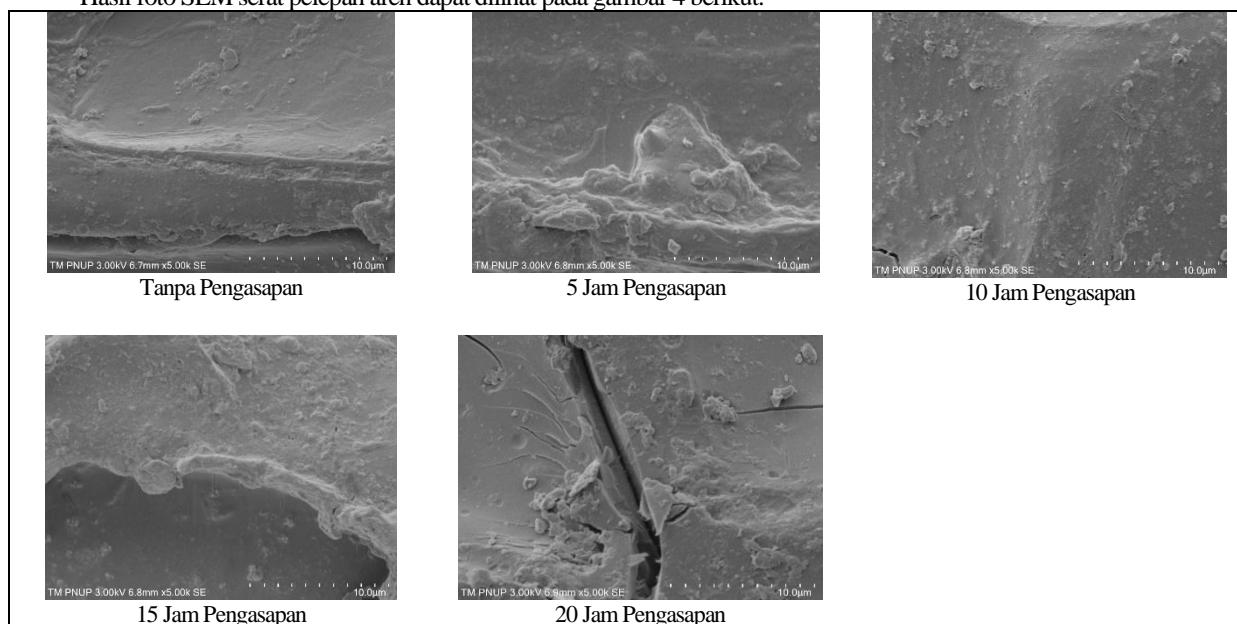
Pada durasi pengasapan 5 jam, permukaan serat mulai menunjukkan peningkatan kekasaran disertai dengan ketidakteraturan ringan. Foto SEM mengindikasikan terjadinya degradasi parsial hemiselulosa dan lignin, sehingga sebagian struktur selulosa mulai terekspos. Selain itu, beberapa void permukaan tampak lebih dangkal dibandingkan serat tanpa pengasapan, yang mengindikasikan awal proses penutupan pori permukaan. Kondisi ini berkorelasi dengan peningkatan kekuatan tarik menjadi 232,54 MPa, yang menunjukkan bahwa pengasapan awal mulai memberikan pengaruh positif terhadap sifat mekanik serat.

Serat yang mengalami pengasapan selama 10 jam menunjukkan perubahan morfologi yang lebih jelas. Permukaan serat tampak lebih kasar namun relatif merata, dengan eksposur mikrofibril selulosa yang lebih jelas. Pengamatan SEM juga menunjukkan bahwa void permukaan semakin berkurang secara visual, sehingga permukaan serat terlihat lebih kompak. Kekasaran pada kondisi ini lebih ideal karena terbentuk oleh topografi mikro yang merata, bukan oleh partikel besar atau retak. Kondisi ini memungkinkan distribusi tegangan tarik yang lebih merata pada struktur serat, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik secara signifikan menjadi 300,38 MPa.

Pada pengasapan 15 jam, serat menunjukkan kondisi morfologi yang paling optimum. Permukaan serat tampak kasar namun homogen dan padat, dengan eksposur mikrofibril selulosa yang jelas tanpa disertai kerusakan dinding sel yang signifikan. Void permukaan pada kondisi ini tampak paling minimal secara kualitatif, yang mengindikasikan terjadinya penutupan sebagian pori permukaan oleh produk karbon hasil proses pengasapan. Permukaan yang lebih kompak ini diperkirakan mampu mengurangi konsentrasi tegangan lokal saat pembebahan tarik. Kondisi tersebut sejalan dengan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 421,59 MPa, sehingga durasi pengasapan 15 jam dapat dianggap sebagai durasi pengasapan optimum untuk meningkatkan kekuatan tarik serat pelepas aren.

Pada pengasapan 20 jam, foto SEM mulai menunjukkan ketidakseragaman morfologi, seperti munculnya mikroretak dan delaminasi lokal pada dinding sel. Hal ini berpotensi menjadi titik awal kegagalan saat pembebahan tarik. Hal ini menyebabkan kekuatan tarik serat mengalami penurunan menjadi 404,37 MPa, meskipun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan serat tanpa pengasapan.

Hasil foto SEM serat pelepas aren dapat dilihat pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. Foto SEM Permukaan Serat Pelepas Aren

Korelasi morfologi permukaan, komposisi kimia, dan kekuatan tarik

Hasil penelitian ini menunjukkan pola yang sangat konsisten antara perubahan komposisi kimia, sifat fisik, morfologi permukaan, dan performa mekanik serat pelelah aren akibat perlakuan pengasapan. Ketika durasi pengasapan dinaikkan dari 0 hingga 20 jam, komponen hemiselulosa dan lignin menurun secara bertahap. Perubahan tersebut selanjutnya tercermin pada citra SEM yang menunjukkan permukaan semakin terbuka hingga mencapai kondisi optimum. Puncaknya terlihat pada perlakuan 15 jam, di mana semua parameter bergerak ke arah yang mendukung peningkatan kekuatan tarik.

Perlakuan pengasapan pada 45°C menunjukkan hubungan yang konsisten antara perubahan komposisi kimia, morfologi permukaan, dan kekuatan tarik serat pelelah aren. Seiring durasi pengasapan meningkat dari 0 hingga 20 jam, hemiselulosa turun dari 23,70% menjadi 19,70% dan lignin turun dari 17,17% menjadi 10,34. Pola ini menunjukkan bahwa pengasapan mengurangi komponen amorf dan hidroskopis.

Penurunan lignin juga sangat berkaitan dengan perubahan permukaan pada SEM. Lignin turun dari 17,17% menjadi 10,34% (20 jam), yang berarti lapisan pengikat permukaan semakin berkurang. Hal ini terlihat pada SEM, di mana serat tanpa perlakuan masih tampak tertutup dan tidak homogen, sedangkan pada 5–10 jam permukaan mulai terbuka dengan tekstur yang lebih kasar.

Korelasi ini kemudian terlihat jelas pada hasil uji tarik serat tunggal. Kekuatan tarik meningkat dari 210,64 MPa (0 jam) menjadi 232,54 MPa (5 jam), lalu naik signifikan menjadi 300,38 MPa (10 jam) dan mencapai maksimum pada 15 jam sebesar 421,59 MPa. Peningkatan ini didukung oleh kombinasi penurunan hemiselulosa-lignin serta permukaan yang lebih terbuka dan kasar secara stabil berdasarkan SEM. Dengan kata lain, pada 15 jam semua parameter bergerak ke arah yang sama dan menghasilkan performa mekanik terbaik.

Pada durasi 20 jam, kekuatan tarik sedikit turun menjadi 404,37 MPa. SEM menunjukkan bahwa pada durasi ini muncul *microcrack* dan indikasi delaminasi, sehingga kekasaran menjadi dominan akibat retakan yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, durasi 15 jam merupakan kondisi optimum karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara perubahan kimia, fisik, mikrostruktur, dan kekuatan tarik.

Dengan demikian, seluruh hasil dalam penelitian ini saling mendukung dan membentuk satu mekanisme yang utuh: pengasapan menurunkan hemiselulosa dan lignin serat, permukaan menjadi lebih terbuka (SEM), kekuatan tarik meningkat hingga durasi optimum (15 jam). Ketika perlakuan melampaui kondisi optimum (20 jam), perbaikan kimia dan fisik masih berlanjut, namun mulai muncul cacat mikro pada permukaan serat yang menyebabkan penurunan kekuatan tarik. Oleh karena itu, durasi pengasapan 15 jam dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum yang paling seimbang karena menghasilkan kombinasi terbaik antara perubahan komposisi kimia dan performa tarik tertinggi.

Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa perlakuan pengasapan serat pelelah aren bagian bawah pada suhu 45°C menggunakan asap tempurung kelapa mampu memodifikasi komposisi kimia, sifat fisik, morfologi permukaan, dan performa mekanik serat secara konsisten sesuai durasi perlakuan. Seiring peningkatan durasi pengasapan, kadar hemiselulosa dan lignin menurun secara bertahap, sementara selulosa cenderung stabil. Perubahan tersebut selaras dengan hasil SEM yang menunjukkan permukaan serat menjadi lebih terbuka dan lebih kasar secara aktif hingga mencapai kondisi optimum, sehingga mendukung peningkatan kekuatan tarik serat tunggal.

Kekuatan tarik meningkat dari 210,64 MPa pada serat tanpa perlakuan menjadi maksimum 421,59 MPa pada durasi pengasapan 15 jam, kemudian sedikit menurun pada durasi 20 jam menjadi 404,37 MPa. Penurunan kekuatan tarik pada durasi terpanjang dipengaruhi oleh munculnya *microcrack* dan delaminasi pada permukaan serat yang teramat pada SEM. Dengan demikian, durasi pengasapan 15 jam dinyatakan sebagai kondisi optimum karena menghasilkan kombinasi terbaik antara penurunan komponen amorf, kekasaran permukaan yang stabil, dan kekuatan tarik tertinggi.

Hasil ini menunjukkan bahwa pengasapan suhu rendah merupakan metode modifikasi serat yang sederhana, ekonomis, dan berpotensi diterapkan pada skala industri untuk meningkatkan kualitas serat pelelah aren sebagai kandidat penguat komposit berbasis biomassa. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian kekasaran dan evaluasi performa serat dalam sistem komposit untuk memperkuat implikasi aplikatif pada produk industri.

Daftar Pustaka

- [1] M. B. Palungan, R. Soenoko, Y. S. Irawan, and A. Purnowidodo, “The effect of fumigation treatment towards agave cantala Roxb fibre strength and morphology,” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 1399–1414, 2017.
- [2] M. B. Palungan, R. Soenoko, and F. Gapsari, “The effect of king pineapple leaf fiber (Agave Cantala Roxb) fumigated toward the fiber wettability and the matrix epoxy interlocking ability,” *EnvironmentAsia*, vol. 12, no. 3, pp. 129–139, 2019, doi: 10.14453/ea.2019.50.
- [3] M. Palungan, “Pengaruh Perlakuan Pengasapan Serat Daun Nanas Raja (Agave Cantala Roxb) Terhadap Kompatibilitas Serat-Matriks Epoksi,” 2017, [Online]. Available:

- [4] http://repository.ub.ac.id/id/eprint/160529/
M. Balasubramanian, R. Saravanan, and T. Sathish, "Exploring natural plant fiber choices and treatment methods for contemporary composites: A comprehensive review," *Results Eng.*, vol. 24, no. July, p. 103270, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103270.
- [5] T. Eleutério, M. Jo, and M. G. Meirelles, "A Review of Natural Fibers : Classification , Composition , Extraction , Treatments , and Applications," pp. 1–39, 2025.
- [6] M. Samanth and K. S. Bhat, "Sustainable Chemistry for Climate Action Conventional and unconventional chemical treatment methods of natural fibres for sustainable biocomposites," *Sustain. Chem. Clim. Action*, vol. 3, no. February, p. 100034, 2023, doi: 10.1016/j.scca.2023.100034.
- [7] J. Hindi *et al.*, "Retting and Chemical Treatment of Natural Fibers – A Review Retting and Chemical Treatment of Natural Fibers – A Review," *J. Nat. Fibers*, vol. 22, no. 1, 2025, doi: 10.1080/15440478.2025.2562479.
- [8] O. Suparno, "Potensi Dan Masa Depan Serat Alam Indonesia Sebagai Bahan Baku Aneka Industri," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 30, no. 2, pp. 221–227, 2020, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.221.
- [9] M. Rizal *et al.*, "Sugar Palm Fibre-Reinforced Polymer Composites : Influence of Chemical Treatments on Its Mechanical Properties," 2022.
- [10] M. Rafiee, R. Abidnejad, A. Ranta, K. Ojha, and A. Karakoç, "Exploring the possibilities of FDM filaments comprising natural fiber-reinforced biocomposites for additive manufacturing," vol. 8, no. April, pp. 524–537, 2021, doi: 10.3934/matersci.2021032.
- [11] S. Sudarisman, S. Hamdan, H. Sosiati, and K. Krisdiyanto, "The effect of hybrid ratio on the flexural properties of Arenga Pinnata fiber/E-glass fiber/polyester hybrid composites," vol. 22, pp. 59–66, 2024.
- [12] G. Liao, E. Sun, E. B. G. Kana, H. Huang, and I. A. Sanusi, "Renewable hemicellulose-based materials for value-added applications," vol. 341, no. May, p. 210014, 2024.
- [13] D. O. Bichang *et al.*, "Heliyon Comparative property investigation of raw and treated coconut shell biomass for potential polymer composite application," *Heliyon*, vol. 10, no. 23, p. e40704, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40704.
- [14] K. Nasri, "Effect of cellulose and lignin content on the mechanical properties and drop-weight impact damage of injection-molded polypropylene- fl ax and -pine fi ber composites," vol. 57, no. 21, pp. 3347–3364, 2023, doi: 10.1177/00219983231186208.
- [15] H. Supriadi, A. Iwang, and M. Badaruddin, "Pengaruh perlakuan alkali NaOH terhadap kekuatan tarik dan fatik kayu merbau," vol. 11, no. 2, pp. 177–185, 2022.
- [16] M. Muslimin, W. A. Wirawan, and M. B. Palungan, "Review : Various Treatments Naoh , Sea Water , Fumigation , Liquid Smoke To Improve Tensile Strength And Surface Morphology Of Natural," vol. 15, no. 2, pp. 911–918, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1600.
- [17] M. Muslimin, M. Rahim, A. Seng, and S. Rais, "Liquid Smoke Treatment for Natural Fibers : The Effect on Tensile Properties , Surface Morphology , Crystalline Properties , and Functional Groups of Banana Stem Fibers," 2022.
- [18] M. Mukhlis, W. Hardi, and R. Mustafa, "The Effect of Treatment of Coconut Fiber with Liquid Smoke on Mechanical Properties of Composite," vol. 7010, pp. 10–13, 2021.
- [19] M. Muslimin *et al.*, "Enhancement of Sansevieria Trifasciata Laurentii Fiber Properties with Liquid Smoke Treatment Enhancement of Sansevieria Trifasciata Laurentii Fiber Properties," *J. Nat. Fibers*, vol. 22, no. 1, 2025, doi: 10.1080/15440478.2025.2453482.
- [20] M. A. Suyuti, D. B. Darmadi, and P. H. Setyarini, "Enhancing the tensile strength and morphology of Sansevieria trifasciata Laurentii fibers using liquid smoke and microwave treatments: an RSM approach," pp. 1–19, 2025.
- [21] E. Yusuf, "Analisa Kekuatan Tarik Serat Pelepas Aren," vol. 5, no. 2, pp. 1–4, 2021.
- [22] V. S. Pasinggi, M. B. Palungan, and ..., "Sifat Mekanik Material Komposit Penguat-Serat Beluru (Entada Rheedii) Dengan Perlakuan Pengasapan Tertutup," ... *Ilmu Pengetah. dan ...*, vol. 2, no. 1, pp. 66–69, 2024, [Online]. Available: <https://www.jurnal.yapri.ac.id/index.php/semnassmipt/article/view/305%0Ahttps://www.jurnal.yapri.ac.id/index.php/semnassmipt/article/download/305/252>
- [23] Nitha, "Pengaruh arus pengelasan terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur mikro hasil las smaw," vol. 1, no. 2, pp. 19–29, 2019.