Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026
P-ISSN : 2477-5029
E-ISSN : 2502-0498

Pengaruh Lama Perendaman NaOH Terhadap Pengujian Tarik dan Karakteristik Patahan Komposit Lamina Serat Sisal–Poliester

Fikran [1*], Christof Geraldi Simon [2]
[1,2]Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja
e-mail: *Fikrantorut@gmail.com

Abstrak

Komposit berbasis serat alam berpotensi menjadi alternatif material yang ringan dan lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5% terhadap tegangan tarik maksimum, regangan maksimum, dan karakteristik patahan struktur makro komposit lamina serat sisal bermatriks poliester. Perendaman dilakukan selama 1, 2, 3, 4, dan 5 jam, dengan lima spesimen pada setiap perlakuan. Pengujian tarik mengacu pada ASTM D638 Tipe III menggunakan Universal Testing Machine (UTM), sedangkan patahan diamati menggunakan mikroskop digital. Hasil menunjukkan bahwa rata-rata tegangan tarik tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 27,3002 N/mm² dan terendah pada 1 jam sebesar 17,5245 N/mm². ANOVA menunjukkan perbedaan tegangan tarik yang signifikan (F(4, 20) = 12,3808; p = 0,0000315). Uji lanjut Tukey HSD menunjukkan perbedaan signifikan pada beberapa pasangan kelompok. Rata-rata regangan tertinggi juga diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 8,4982%, tetapi Welch ANOVA tidak menunjukkan perbedaan signifikan antarperlakuan (F(4, 9,50) = 1,2120; p = 0,3675). Hasil Interval regangan juga menunjukkan bahwa seluruh pasangan kelompok tidak berbeda signifikan. Analisis rasio signal-to-noise (S/N) menghasilkan nilai tertinggi pada perendaman 3 jam untuk tegangan tarik dan regangan, masing-masing sebesar 28,5245 dB dan 17,6453 dB. Pengamatan patahan struktur makro menunjukkan adanya void pada perendaman 1–2 jam dan fiber breaking pada perendaman 3–5 jam. Dengan demikian, perendaman 3 jam menghasilkan rata-rata tegangan tarik dan regangan tertinggi pada kondisi penelitian ini, tetapi perbedaan signifikan secara statistik hanya ditemukan pada tegangan tarik.

Kata kunci— *Serat sisal, perlakuan NaOH, tegangan tarik, regangan, karakteristik patahan*

Abstract

Natural fiber composites have potential as lightweight and environmentally friendly materials. This study investigated the effects of sisal fiber immersion time in 5% NaOH solution on the maximum tensile stress, maximum strain, and macrostructural fracture characteristics of polyester-matrix sisal fiber laminate composites. Immersion times were 1, 2, 3, 4, and 5 h, with five specimens per treatment. Tensile testing was conducted according to ASTM D638 Type III using a Universal Testing Machine (UTM), and fracture surfaces were examined using a digital microscope. The highest mean tensile stress was obtained after 3 h of immersion (27.3002 N/mm²), while the lowest occurred after 1 h (17.5245 N/mm²). One-way ANOVA revealed significant differences in tensile stress among treatments (F(4, 20) = 12.3808, p = 0.0000315), and Tukey HSD identified significant differences between several group pairs. The highest mean strain was also observed after 3 h (8.4982%); however, Welch's ANOVA indicated no significant differences among treatments (F(4, 9.50) = 1.2120, p = 0.3675). Signal-to-noise (S/N) analysis yielded the highest values at 3 h for tensile stress and strain, at 28.5245 dB and 17.6453 dB, respectively. Macroscopic observations revealed voids in specimens immersed for 1–2 h and fiber breaking in those immersed for 3–5 h. Overall, 3 h of immersion produced the

highest mean tensile stress and strain, although significant differences were found only in tensile stress.

Keywords— *Sisal fiber, NaOH treatment, tensile stress, strain, fracture characteristics.*

1. PENDAHULUAN

Material komposit banyak dikembangkan karena mampu menggabungkan dua atau lebih material untuk menghasilkan kombinasi sifat yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Salah satu jenis komposit yang banyak digunakan adalah komposit bermatriks poliester karena memiliki bobot relatif ringan, ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan dalam proses fabrikasi. Dalam pengembangannya, serat alam menjadi salah satu alternatif bahan penguat karena berasal dari sumber terbarukan dan berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap serat sintetis. Meskipun demikian, pemanfaatan serat alam sebagai penguat komposit masih menghadapi tantangan, terutama berkaitan dengan variasi sifat serat, sensitivitas terhadap kelembapan, serta kualitas ikatan antara serat dan matriks polimer [1], [2].

Salah satu serat alam yang berpotensi digunakan sebagai penguat komposit adalah serat sisal (*Agave sisalana*). Serat ini memiliki potensi sifat mekanik yang baik dan dapat dimanfaatkan dalam pembuatan komposit bermatriks polimer. Namun, karakteristik permukaan serat alam dan keberadaan komponen non-selulosa dapat memengaruhi interaksi antara serat dan matriks. Kondisi tersebut menyebabkan perlakuan permukaan menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan komposit serat alam. Perlakuan alkali menggunakan natrium hidroksida (NaOH) banyak diteliti karena dapat mengubah kondisi permukaan serat dan berpotensi memperbaiki interaksi antarmuka serat–matriks. Efektivitas perlakuan tersebut bergantung pada kondisi proses dan karakteristik bahan yang digunakan, sehingga peningkatan sifat mekanik tidak dapat diasumsikan terjadi pada setiap kondisi perlakuan [3], [4].

Lama perendaman merupakan salah satu parameter yang perlu diperhatikan dalam perlakuan alkali. Perendaman yang berbeda dapat menghasilkan perubahan karakteristik permukaan serat yang berbeda pula. Perlakuan yang belum memadai mungkin tidak menghasilkan perubahan permukaan yang diharapkan, sedangkan perlakuan berlebihan berpotensi merusak struktur serat dan menurunkan kinerja komposit [5], misalnya, mengevaluasi komposit serat sisal–poliester dengan variasi konsentrasi NaOH 2%, 6%, dan 10%, serta waktu perendaman 24, 48, dan 72 jam. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi perlakuan yang menghasilkan sifat mekanik terbaik bergantung pada kombinasi konsentrasi alkali, waktu perendaman, dan komposisi serat terhadap matriks [6] juga mengkaji perlakuan alkali pada serat *Agave cantula* untuk komposit bermatriks poliester. Hasil penelitian terdahulu tersebut memperlihatkan pentingnya mengevaluasi parameter perlakuan berdasarkan jenis serat dan kondisi eksperimen yang digunakan, bukan menganggap satu waktu perendaman berlaku optimum untuk seluruh sistem komposit.

Selain perlakuan serat, susunan penguat dan komposisi penyusun juga dapat memengaruhi sifat mekanik komposit. Orientasi serat terhadap arah pembebanan menentukan sejauh mana beban dapat diteruskan melalui penguat, sedangkan kualitas antarmuka memengaruhi transfer beban antara serat dan matriks. Kajian eksperimental pada komposit berpenguat serat alam menunjukkan bahwa respons mekanik dipengaruhi oleh karakteristik penguat, matriks, dan konfigurasi komposit [7]. Dalam penelitian terdahulu, Fikran dkk. [8]

telah mengkaji sifat mekanik komposit lamina serat sisal bermatriks polimer. Penelitian tersebut menjadi salah satu landasan untuk melanjutkan kajian terhadap komposit lamina serat sisal dengan perhatian khusus pada pengaruh lama perendaman serat sebelum proses pembuatan komposit.

Evaluasi komposit tidak cukup hanya dilakukan melalui pengukuran kekuatan tarik, tetapi perlu mempertimbangkan regangan dan karakteristik patahan untuk memperoleh gambaran yang lebih lengkap mengenai respons material ketika menerima beban. Pengujian tarik dapat digunakan untuk mengevaluasi tegangan dan regangan material, sedangkan pengamatan makro pada permukaan patahan dapat membantu mengidentifikasi bentuk kerusakan yang terlihat, seperti retak matriks, *fiber pull-out*, atau pemisahan antarlamina. Namun, pengamatan makro hanya memberikan informasi berdasarkan ciri visual yang dapat dikenali dan tidak dapat digunakan secara langsung untuk memastikan perubahan kimia atau mekanisme ikatan pada tingkat mikroskopis [9]. Oleh karena itu, analisis sifat tarik dan karakteristik patahan perlu ditempatkan sebagai dua bentuk evaluasi yang saling melengkapi, dengan tetap memperhatikan batas kemampuan masing-masing metode pengujian.

Penelitian mengenai perlakuan alkali pada serat sisal terus berkembang. [10], dalam penelitian mengevaluasi perlakuan NaOH 5% dengan waktu perendaman 0, 2, dan 4 jam pada serat sisal untuk komposit bermatriks poliester tak jenuh. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa waktu perlakuan memengaruhi kinerja sistem komposit yang diteliti. Kedekatan topik tersebut menegaskan bahwa kebaruan penelitian tidak cukup dinyatakan hanya berdasarkan penggunaan NaOH 5% atau serat sisal–poliester. Perbedaan penelitian perlu dijelaskan berdasarkan rentang waktu perlakuan, konfigurasi komposit, respons yang diukur, dan pendekatan analisis yang benar-benar diterapkan. Dalam konteks ini, penelitian sekarang berfokus pada komposit lamina serat sisal–poliester dengan variasi lama perendaman 1, 2, 3, 4, dan 5 jam, serta mengevaluasi tegangan tarik maksimum, regangan maksimum, dan karakteristik patahannya. Analisis statistik digunakan untuk menilai perbedaan respons antarkelompok waktu perendaman, sedangkan rasio signal-to-noise dengan karakteristik *larger-the-better* digunakan sebagai analisis pendukung untuk membandingkan respons yang nilai lebih tingginya dianggap lebih diinginkan [11].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5% selama 1, 2, 3, 4, dan 5 jam terhadap tegangan tarik maksimum, regangan maksimum, serta karakteristik patahan komposit lamina serat sisal bermatriks poliester. Perbedaan respons mekanik antarkelompok waktu perendaman dianalisis secara statistik sesuai dengan karakteristik data dan asumsi metode yang digunakan. Hasil pengamatan patahan digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik kerusakan yang tampak setelah pengujian tarik. Penelitian ini diharapkan memberikan data eksperimental mengenai respons komposit pada rentang waktu perendaman yang diuji, tanpa menggeneralisasi kondisi terbaik di luar batas material dan parameter penelitian.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Eksperimen dan Metode Analisis ANOVA

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen satu faktor, yaitu lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5% sebagai variabel bebas, dengan lima variasi waktu: 1, 2, 3, 4,

dan 5 jam. Variabel terikat meliputi tegangan tarik maksimum (N/mm²) dan regangan maksimum (%), sedangkan variabel terkendali meliputi susunan lamina, fraksi serat/resin, jenis matriks poliester, dan prosedur fabrikasi. Setiap perlakuan terdiri atas lima spesimen, sehingga total terdapat 25 spesimen. Perbedaan rata-rata tegangan tarik dianalisis menggunakan ANOVA satu arah, sedangkan regangan dianalisis menggunakan Welch ANOVA berdasarkan hasil uji Levene, dengan nilai *p* masing-masing sebesar 0,1866 dan 0,0319. Pengujian dilakukan pada taraf signifikansi 0,05. Hasil signifikan menunjukkan adanya perbedaan rata-rata pada setidaknya satu kelompok, bukan berarti seluruh pasangan kelompok berbeda. Kontribusi faktor dihitung berdasarkan rasio jumlah kuadrat faktor terhadap jumlah kuadrat total. Analisis ANOVA mengacu pada prinsip analisis varians untuk rancangan eksperimen [12], sedangkan rasio *signal-to-noise* (S/N) dengan karakteristik *larger-the-better* digunakan sebagai analisis pendukung berdasarkan metode Taguchi [13].

2.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi mesin uji tarik universal (*Universal Testing Machine*/UTM) untuk pengujian tarik, mikroskop digital untuk pengamatan makro patahan, cetakan komposit berukuran 32 cm × 32 cm × 1,27 cm, timbangan digital, gelas ukur, jangka sorong, dan sarung tangan. Bahan penelitian meliputi serat sisal (*Agave sisalana*) sebagai penguat, resin poliester sebagai matriks, katalis metil etil keton peroksida (MEKP), natrium hidroksida (NaOH) untuk perlakuan serat, air suling, dan lilin pemisah untuk memudahkan pelepasan komposit dari cetakan.

2.3 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5%, yaitu 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Susunan sudut lamina dibuat tetap, yaitu 0°/60°/90°/120°/0° dengan lima lapisan. Variabel terikat meliputi kekuatan tarik komposit dan karakteristik makro patahan setelah pengujian tarik. Variabel terkendali meliputi konsentrasi NaOH sebesar 5% dalam 1 liter air, fraksi serat dan resin sebesar 15:85, jumlah lapisan serat sebanyak lima lapis, serta proses *curing* pada suhu ruang.

2.4 Pembuatan Komposit

Serat sisal dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar air sekitar 10%, dipotong sepanjang 320 mm, kemudian direndam dalam larutan NaOH 5% selama 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Setelah perendaman, serat dicuci menggunakan air suling hingga pH netral, lalu dikeringkan selama 24 jam pada suhu 60 °C.

Resin poliester dicampur dengan katalis metil etil keton peroksida (MEKP) sebanyak 1% dari massa resin. Cetakan berukuran 32 × 32 × 1,27 cm dibersihkan dan dilapisi bahan pelepas cetakan. Serat disusun secara kontinu sesuai orientasi lamina 0°/60°/90°/120°/0°, kemudian resin dituangkan secara bertahap menggunakan metode *hand lay-up* hingga seluruh serat terbasahi. Komposit dibiarkan mengeras (*curing*) pada suhu ruang, dilepaskan dari cetakan, dan dipotong sesuai ukuran spesimen pengujian tarik.

Kebutuhan bahan dihitung berdasarkan volume cetakan sebesar 1.300,48 cm³, dengan fraksi volume serat 15% dan resin 85%. Berdasarkan massa jenis serat sisal sebesar 1,5 g/cm³ dan resin poliester sebesar 1,2 g/cm³, massa serat yang dibutuhkan secara teoritis adalah 292,61 g, sedangkan massa resin adalah 1.326,49 g.

2.5 Pengujian Tarik dan Pengamatan Struktur Makro

Spesimen uji tarik dibuat mengacu pada ASTM D638 tipe III [14], dengan panjang total 246 mm, lebar bagian tengah 19 mm, dan ketebalan 12,7 mm. Setiap variasi lama perendaman terdiri atas lima spesimen, sehingga jumlah keseluruhan adalah 25 spesimen. Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) hingga spesimen patah, dengan

panjang ukur awal ((L_0)) sebesar 57 mm. Luas penampang awal, tegangan tarik, dan regangan dihitung menggunakan Persamaan (1)–(3).

$$A_0 = w \times t \quad (1)$$

$$\sigma = F / A_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon = (\Delta L / L_0) \times 100\% \quad (3)$$

Dengan (A_0) adalah luas penampang awal (mm²), (w) adalah lebar spesimen (mm), (t) adalah ketebalan spesimen (mm), (\sigma) adalah tegangan tarik (N/mm²), (F_{\max}) adalah beban maksimum (N), (\Delta L) adalah pertambahan panjang (mm), (L_0) adalah panjang ukur awal (mm), dan (\varepsilon) adalah regangan (%).

Setelah pengujian tarik, permukaan patahan diamati menggunakan mikroskop digital dengan perbesaran 20–100× untuk mengidentifikasi karakteristik kegagalan secara makroskopis, meliputi retak matriks, rongga (*void*), tercabutnya serat (*fiber pull-out*), putusnya serat (*fiber breaking*), delaminasi, dan terlepasnya ikatan antarmuka serat–matriks (*debonding*) [15].

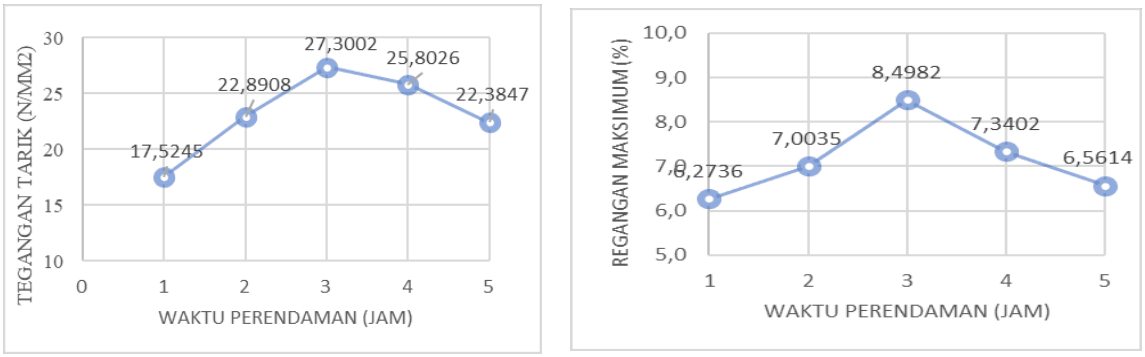
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tegangan dan Regangabn Tarik Maksimum

Sebagai contoh perhitungan, spesimen 1 pada perendaman 1 jam dengan F = 3.974,1 N dan A_0 = 19 × 12,7 = 241,3 mm² menghasilkan σ = 3.974,1/241,3 = 16,4695 N/mm². Hasil pengujian 25 spesimen dirangkum pada Tabel 1 dan Gambar 1(a,b).

Tabel 1 . Hasil pengujian tarik setiap spesimen dan rata-rata tegangan tarik serta regangan maksimum (n = 5 per perlakuan).

Lama perendaman (jam)	Spesimen	Beban maksimum (N)	Elongasi (mm)	Tegangan tarik maksimum (N/mm²)	Regangan maksimum (%)	Rata-rata tegangan tarik maksimum (N/mm²)	Rata-rata regangan maksimum (%)
1 jam	1	3,974.1	3.1800	16.4695	5.5789	17.5245	6.2736
	2	4,523.4	5.3800	18.7460	9.4386		
	3	3,808.0	2.8600	15.7812	5.0175		
	4	4,163.0	2.3799	17.2524	4.1753		
	5	4,674.8	4.0799	19.3734	7.1577		
2 jam	1	4,968.7	4.4800	20.5914	7.8596	22.8909	7.0035
	2	6,272.2	3.8999	25.9934	6.8419		
	3	5,836.1	3.8600	24.1861	6.7719		
	4	5,749.3	3.9000	23.8264	6.8421		
	5	4,791.5	3.8200	19.8570	6.7018		
3 jam	1	5,760.9	3.3800	23.8744	5.9298	27.3002	8.4982
	2	7,334.6	6.5200	30.3962	11.4386		
	3	5,613.2	3.5000	23.2623	6.1404		
	4	6,591.8	4.6999	27.3179	8.2454		
	5	7,637.2	6.1200	31.6502	10.7368		
4 jam	1	6,118.0	4.4600	25.3543	7.8246	25.8026	7.3403
	2	6,752.3	3.9599	27.9830	6.9472		
	3	6,278.1	3.7399	26.0178	6.5612		
	4	5,982.2	4.9799	24.7915	8.7367		
	5	6,000.3	3.7800	24.8666	6.6316		
5 jam	1	5,616.0	4.0599	23.2739	7.1226	22.3847	6.5613
	2	5,610.1	3.6800	23.2495	6.4561		
	3	4,597.9	3.3600	19.0547	5.8947		
	4	5,414.8	4.0200	22.4401	7.0526		
	5	5,768.4	3.5800	23.9055	6.2807		



(a) (b)

Gambar 1 Grafik (a) tegangan tarik maksimum dan (b) regangan maksimum terhadap lama perendaman (batang galat: simpangan baku)

Tegangan Tarik Maksimum

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 1(a), tegangan tarik rata-rata meningkat dari 17,5245 N/mm² pada lama perendaman 1 jam menjadi 22,8909 N/mm² pada 2 jam, kemudian mencapai nilai tertinggi sebesar 27,3002 N/mm² pada 3 jam. Nilai pada perendaman 3 jam meningkat sekitar 55,8% dibandingkan dengan perendaman 1 jam. Selanjutnya, tegangan tarik rata-rata menurun menjadi 25,8026 N/mm² pada 4 jam dan 22,3847 N/mm² pada 5 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa, dalam rentang perlakuan yang diuji, rata-rata tegangan tarik tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam.

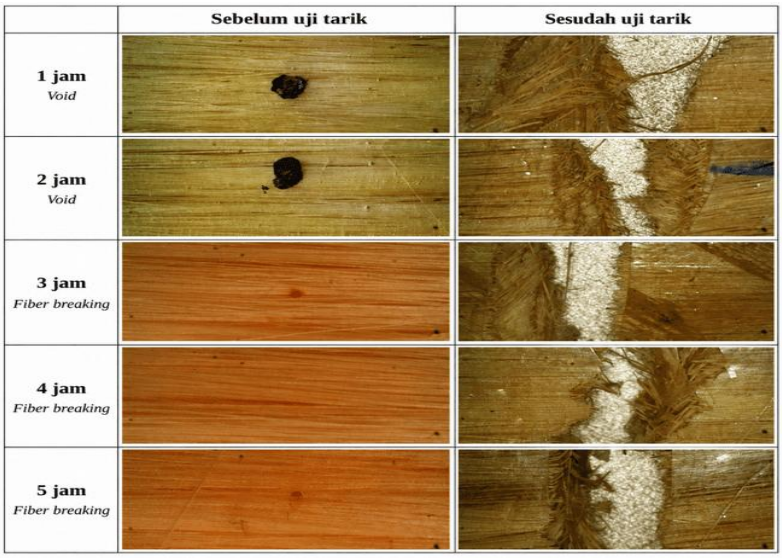
Kecenderungan peningkatan tegangan tarik hingga 3 jam diduga berkaitan dengan perubahan permukaan serat akibat perlakuan alkali. Perlakuan NaOH dapat membantu menghilangkan sebagian komponen non-selulosa pada permukaan serat, sehingga berpotensi meningkatkan kekasaran permukaan dan memperbaiki interaksi antarmuka serat–matriks. Kondisi tersebut dapat mendukung transfer beban antara matriks poliester dan serat. Sebaliknya, penurunan tegangan tarik pada perendaman 4 dan 5 jam menunjukkan bahwa perpanjangan waktu perendaman tidak menghasilkan peningkatan nilai rata-rata tegangan tarik pada kondisi penelitian ini. Meskipun perubahan struktur serat akibat paparan alkali yang lebih lama dapat menjadi salah satu kemungkinan penjelasan, mekanisme tersebut belum dapat dipastikan karena penelitian ini tidak mencakup karakterisasi kimia atau morfologi serat secara khusus. Kecenderungan ini perlu dibandingkan dengan penelitian terdahulu mengenai perlakuan alkali pada serat sisal dan komposit bermatriks poliester [5],[6], dengan mempertimbangkan perbedaan konsentrasi NaOH, lama perendaman, fraksi serat, dan kondisi fabrikasi.

Regangan Maksimum

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 1(b), regangan maksimum rata-rata meningkat dari 6,2736% pada perendaman 1 jam menjadi 7,0035% pada 2 jam dan mencapai nilai tertinggi sebesar 8,4982% pada 3 jam. Setelah itu, regangan maksimum rata-rata menurun menjadi 7,3403% pada 4 jam dan 6,5613% pada 5 jam. Pola ini secara deskriptif menyerupai kecenderungan tegangan tarik, yaitu nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam.

Regangan maksimum menggambarkan pertambahan panjang relatif spesimen terhadap panjang ukur awal. Dengan demikian, nilai rata-rata yang lebih tinggi pada perendaman 3 jam menunjukkan bahwa spesimen pada kelompok tersebut mengalami regangan maksimum yang lebih besar selama pengujian tarik. Namun, pola deskriptif yang serupa antara tegangan tarik dan regangan tidak dengan sendirinya membuktikan adanya hubungan sebab-akibat atau mekanisme perubahan sifat serat tertentu. Selain itu, karena penelitian ini tidak menggunakan kelompok kontrol berupa serat tanpa perlakuan NaOH, hasil yang diperoleh hanya menunjukkan perbedaan respons tarik di antara variasi lama perendaman yang diuji, bukan besarnya peningkatan akibat perlakuan alkali dibandingkan kondisi tanpa perlakuan.

3.2 Karakteristik Patahan Struktur Makro



Gambar 2 Struktur makro spesimen sebelum dan sesudah uji tarik pada lama perendaman 1–5 jam

Berdasarkan pengamatan makro pada Gambar 2, spesimen dengan lama perendaman 1 dan 2 jam memperlihatkan rongga (*void*) pada permukaan komposit sebelum pengujian tarik, serta kerusakan lokal pada daerah patahan setelah pengujian. Pada kelompok perendaman 3, 4, dan 5 jam, serat yang tampak terputus (*fiber breaking*) dapat diamati pada permukaan patahan. Perbedaan kenampakan tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik kerusakan komposit pada setiap kelompok perlakuan. Namun, karena pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop digital, identifikasi mekanisme kegagalan dibatasi pada kenampakan makroskopis dan belum dapat memastikan kondisi ikatan antarmuka serat–matriks secara langsung.

Perlakuan alkali dapat memodifikasi permukaan serat alam melalui penghilangan sebagian komponen non-selulosa, sehingga berpotensi memengaruhi interaksi antara serat dan matriks [16], [17]. Meskipun demikian, keberadaan *fiber breaking* pada spesimen dengan perendaman 3–5 jam tidak dapat dijadikan bukti tunggal bahwa ikatan antarmuka serat–matriks menjadi lebih kuat. Demikian pula, keberadaan *void* tidak cukup untuk menentukan penyebab penurunan kekuatan tarik tanpa analisis tambahan. Pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) atau pengujian khusus antarmuka diperlukan untuk mengidentifikasi karakteristik morfologi dan mekanisme kegagalan secara lebih terperinci.

Jika dikaitkan dengan hasil pengujian tarik, kelompok perendaman 3 jam memiliki rata-rata tegangan tarik tertinggi sebesar 27,3002 N/mm² dan rata-rata regangan maksimum tertinggi sebesar 8,4982%. Hasil ini menunjukkan bahwa perendaman 3 jam memberikan kinerja tarik rata-rata terbaik di antara variasi waktu yang diuji. Akan tetapi, hasil pengamatan makro patahan belum cukup untuk menjelaskan secara pasti penyebab perbedaan sifat mekanik tersebut. Oleh karena itu, interpretasi karakteristik patahan dibatasi pada kenampakan yang teramati dan kondisi eksperimen yang digunakan.

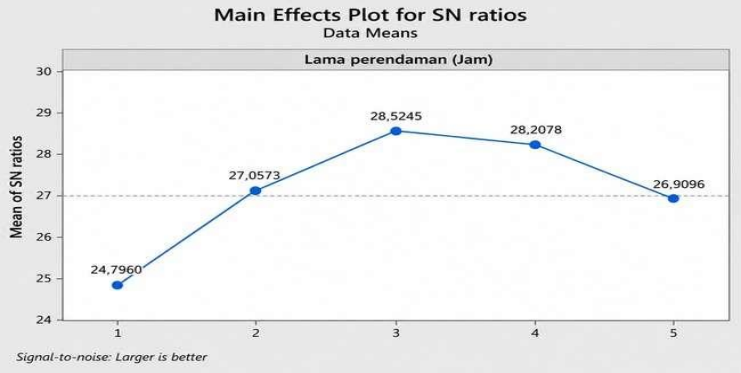
3.3 Analisis Taguchi dan ANOVA Tegangan Tarik Maksimum

Analisis rasio Signal-to-Noise (S/N) menggunakan karakteristik larger-the-better karena respons tegangan tarik yang lebih tinggi diharapkan. Perhitungan dilakukan menggunakan lima hasil pengujian spesimen pada setiap level lama perendaman. Hasil perhitungan rasio S/N disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rasio S/N Taguchi untuk tegangan tarik maksimum

Lama perendaman	Rata-rata tegangan (N/mm²)	S/N (dB)	Peringkat
3 jam	27.3002	28.5245	1
4 jam	25.8026	28.2078	2
2 jam	22.8909	27.0573	3
5 jam	22.3847	26.9096	4
1 jam	17.5245	24.7960	5

Rasio S/N tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 28.5245 dB, diikuti 4 jam (28.2078 dB), 2 jam (27.0573 dB), 5 jam (26.9096 dB), dan 1 jam (24.7960 dB). Dengan demikian, berdasarkan nilai rasio S/N dengan karakteristik larger-the-better, perendaman 3 jam menunjukkan respons tegangan tarik terbaik di antara variasi waktu perendaman yang diuji. Simpangan baku pada level 3 jam sebesar 3.7599 N/mm², sehingga rata-rata tertinggi tidak berarti variasi terkecil. ANOVA satu arah digunakan untuk mengevaluasi perbedaan rata-rata tegangan tarik antarlevel lama perendaman.



Gambar 3. Grafik rasio S/N tegangan tarik maksimum berdasarkan lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5%.

Grafik ini memperlihatkan pola respons rasio *signal-to-noise* (S/N) tegangan tarik maksimum pada berbagai lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5%. Kurva menunjukkan kecenderungan peningkatan respons hingga perendaman 3 jam, kemudian menurun pada perendaman 4 dan 5 jam. Pola tersebut mengindikasikan bahwa penambahan lama perendaman tidak selalu diikuti peningkatan respons tegangan tarik secara berkelanjutan. Kecenderungan ini relevan dengan temuan [18], [19], yang menunjukkan bahwa perlakuan kimia serat sisal dapat memengaruhi sifat mekanik komposit bermatriks poliester, dengan hasil yang bergantung pada kondisi perlakuan. [20] juga menjelaskan bahwa sifat tarik komposit polimer berpenguat serat alam dipengaruhi oleh karakteristik serat, perlakuan kimia, serta adhesi antarmuka serat–matriks. Dengan demikian, grafik ini memberikan gambaran visual mengenai perubahan respons S/N pada rentang lama perendaman yang diuji, sedangkan signifikansi perbedaan rata-rata tegangan tarik dievaluasi melalui ANOVA.

Tabel 3. Hasil ANOVA satu arah untuk tegangan tarik maksimum

Sumber variasi	SS	df	MS	F	p-value	Kontribusi (%)
Lama perendaman	282.7750	4	70.6938	12.3808	0.0000315	71.23
Galat	114.1991	20	5.7100	—	—	—
Total	396.9741	24	—	—	—	100.00

Hasil ANOVA menunjukkan F=12.3808 dan p=0.0000315. Karena p<0,05, hipotesis nol ditolak sehingga terdapat perbedaan rata-rata tegangan tarik yang signifikan antarlevel lama perendaman. Kontribusi jumlah kuadrat lama perendaman terhadap jumlah kuadrat total adalah 71,23%; angka ini menunjukkan proporsi variasi sampel yang terasosiasi dengan faktor dalam model, bukan persentase peningkatan kekuatan. ANOVA merupakan uji omnibus, sehingga hasil ini tidak dengan sendirinya menunjukkan pasangan waktu mana yang berbeda [10].

Tabel 4. Hasil Uji Lanjut Tukey HSD untuk Tegangan Tarik Maksimum

Pasangan kelompok	Selisih rata-rata (N/mm²)	IK 95% selisih (N/mm²)	Nilai p terkoreksi	Keputusan
1 jam – 2 jam	-5,3664	-9,8887 s.d. -0,8440	0,0153	Signifikan
1 jam – 3 jam	-9,7757	-14,2980 s.d. -5,2534	<0,001	Signifikan
1 jam – 4 jam	-8,2781	-12,8005 s.d. -3,7558	0,0002	Signifikan
1 jam – 5 jam	-4,8602	-9,3826 s.d. -0,3379	0,0314	Signifikan
2 jam – 3 jam	-4,4093	-8,9317 s.d. 0,1130	0,0582	Tidak signifikan
2 jam – 4 jam	-2,9118	-7,4341 s.d. 1,6106	0,3360	Tidak signifikan
2 jam – 5 jam	0,5061	-4,0162 s.d. 5,0285	0,9971	Tidak signifikan
3 jam – 4 jam	1,4976	-3,0248 s.d. 6,0199	0,8563	Tidak signifikan
3 jam – 5 jam	4,9155	0,3931 s.d. 9,4378	0,0291	Signifikan
4 jam – 5 jam	3,4179	-1,1044 s.d. 7,9402	0,1985	Tidak signifikan

Hasil uji lanjut Tukey HSD menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan pada beberapa pasangan waktu perendaman (Tabel 4). Perbedaan terbesar ditemukan antara perendaman 1 jam dan 3 jam, dengan selisih rata-rata tegangan tarik sebesar 9,7757 N/mm² ($p <$ 0,001). Perbandingan perendaman 3 jam dan 5 jam juga menunjukkan perbedaan signifikan ($p =$ 0,0291). Sementara itu, pasangan kelompok lainnya tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada taraf 5%. Interval kepercayaan 95% yang tidak mencakup nol mendukung adanya perbedaan signifikan antarkelompok. Analisis ini mengikuti prinsip perbandingan berganda Tukey HSD (NIST/SEMATECH, n.d.). Hasil menunjukkan bahwa perendaman 3 jam memiliki rata-rata tegangan tarik tertinggi pada kondisi penelitian ini.

3.4 Analisis Taguchi dan ANOVA Regangan Tarik Maksimum

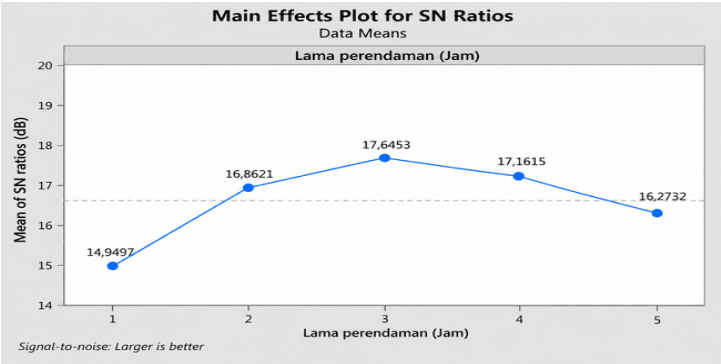
Regangan dianalisis sebagai respons tambahan menggunakan karakteristik larger-the-better. Rasio S/N dihitung dari lima nilai regangan individual pada setiap level.

Tabel 5. Rasio S/N Taguchi untuk regangan maksimum

Lama perendaman	Rata-rata regangan (%)	S/N (dB)	Peringkat
3 jam	8.4982	17.6453	1
4 jam	7.3403	17.1615	2
2 jam	7.0035	16.8621	3
5 jam	6.5613	16.2732	4
1 jam	6.2736	14.9497	5

Nilai S/N tertinggi untuk regangan diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 17.6453 dB, diikuti 4 jam (17.1615 dB), 2 jam (16,8621 dB), 5 jam (16.2732 dB), dan 1 jam (14.9497

dB). Rata-rata regangan juga tertinggi pada perendaman 3 jam, yaitu 8.4982%. Hasil ini menunjukkan kecenderungan respons terbaik pada 3 jam. Meskipun rata-rata dan rasio S/N regangan tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam, signifikansi perbedaan antarperlakuan perlu dievaluasi menggunakan uji statistik. Karena asumsi homogenitas varians tidak terpenuhi berdasarkan uji Levene (p = 0.0319), analisis inferensial dilakukan menggunakan Welch ANOVA. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.



Gambar 4. Grafik rasio S/N regangan maksimum komposit lamina serat sisal bermatriks poliester berdasarkan lama perendaman dalam larutan NaOH 5%.

Dapat dilihat pada pola Grafik respons rasio signal-to-noise (S/N) regangan maksimum pada berbagai lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5%. Kurva menunjukkan peningkatan respons hingga perendaman 3 jam, kemudian menurun pada perendaman 4 dan 5 jam. Pola ini menunjukkan bahwa perendaman 3 jam menghasilkan nilai S/N regangan tertinggi sebesar 17,6453 dB. Kecenderungan tersebut sejalan dengan Ayalew dan Wodag [18], yang menunjukkan bahwa perlakuan kimia serat sisal dapat memengaruhi sifat mekanik komposit bermatriks poliester. Ku et al. [20] juga menjelaskan bahwa sifat mekanik komposit berpenguat serat alam dipengaruhi oleh karakteristik serat, perlakuan kimia, dan adhesi antarmuka serat–matriks. Namun, hasil Welch ANOVA menunjukkan bahwa perbedaan regangan antarperlakuan tidak signifikan secara statistik (\(p=0{,}3675\)). Dengan demikian, pola grafik ini bersifat deskriptif dan belum membuktikan adanya pengaruh signifikan lama perendaman terhadap regangan maksimum.

Tabel 6. Hasil Welch ANOVA untuk regangan maksimum

Uji statistik	F	df1	df2	p-value	Keputusan	Catatan
Welch ANOVA	1.2120	4	9.50	0.3675	Tidak signifikan	α = 0,05
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—

Uji Levene menunjukkan bahwa varians regangan antar kelompok tidak homogen (p=0.0319), sehingga Welch ANOVA digunakan untuk inferensi utama. Hasil Welch ANOVA menunjukkan F(4; 9.50)=1,2120 dan p=0.3675. Karena p>0,05, hipotesis nol tidak ditolak; data belum memberikan bukti yang cukup bahwa rata-rata regangan berbeda antarlevel lama perendaman pada taraf signifikansi 5%. Kontribusi jumlah kuadrat dari ANOVA klasik (23.51%) tidak digunakan sebagai dasar inferensi setelah asumsi homogenitas varians tidak terpenuhi. Meskipun perendaman 3 jam menghasilkan rata-rata dan S/N regangan tertinggi, kecenderungan tersebut bersifat deskriptif dan tidak membuktikan pengaruh signifikan terhadap regangan.

Tabel 7. Hasil Uji Interval untuk Regangan Maksimum

Pasangan	Selisih rata-rata	IK 95% selisih	Nilai p	Keputusan

kelompok	(poin %)	(poin %)	Games–Howell	
1 jam – 2 jam	-0,7299	-4,7624 s.d. 3,3027	0,8091	Tidak signifikan
1 jam – 3 jam	-2,2246	-7,3482 s.d. 2,8990	0,2930	Tidak signifikan
1 jam – 4 jam	-1,0667	-4,9920 s.d. 2,8587	0,6083	Tidak signifikan
1 jam – 5 jam	-0,2877	-4,3074 s.d. 3,7319	0,9909	Tidak signifikan
2 jam – 3 jam	-1,4947	-6,4661 s.d. 3,4767	0,4612	Tidak signifikan
2 jam – 4 jam	-0,3368	-2,0908 s.d. 1,4172	0,8391	Tidak signifikan
2 jam – 5 jam	0,4421	-0,6576 s.d. 1,5418	0,3590	Tidak signifikan
3 jam – 4 jam	1,1579	-3,6811 s.d. 5,9970	0,6769	Tidak signifikan
3 jam – 5 jam	1,9369	-3,0221 s.d. 6,8959	0,2794	Tidak signifikan
4 jam – 5 jam	0,7789	-0,9800 s.d. 2,5379	0,2541	Tidak signifikan

Hasil Welch ANOVA menunjukkan bahwa lama perendaman NaOH tidak memberikan perbedaan rata-rata regangan yang signifikan secara statistik (F = 1,2120; p = 0,3675). Hasil uji lanjut juga menunjukkan bahwa seluruh pasangan waktu perendaman memiliki nilai $p > 0,05$ dan interval kepercayaan 95% yang mencakup nol. Dengan demikian, belum terdapat bukti statistik yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan regangan yang signifikan antarkelompok. Meskipun grafik menunjukkan bahwa rata-rata regangan tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 8,4982%, pola tersebut bersifat deskriptif dan tidak membuktikan perbedaan yang signifikan secara statistik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH 5% berpengaruh signifikan terhadap tegangan tarik komposit lamina serat sisal bermatriks poliester ($F(4, 20) = 12,3808$; $p = 0,0000315$), dengan kontribusi sebesar 71,23% terhadap variasi total tegangan tarik. Rata-rata tegangan tarik tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 27,3002 N/mm² dan terendah pada 1 jam sebesar 17,5245 N/mm². Uji lanjut Tukey HSD menunjukkan perbedaan signifikan pada beberapa pasangan kelompok, terutama antara perendaman 1 jam dan 3 jam serta antara 3 jam dan 5 jam.
2. Rata-rata regangan tertinggi diperoleh pada perendaman 3 jam sebesar 8,4982%, sedangkan terendah pada 1 jam sebesar 6,2736%. Karena varians tidak homogen ($p = 0,0319$), analisis dilanjutkan menggunakan Welch ANOVA, yang menunjukkan tidak adanya perbedaan regangan yang signifikan secara statistik ($F(4, 9,50) = 1,2120$; $p = 0,3675$). Hasil uji lanjut juga menunjukkan bahwa seluruh pasangan waktu perendaman tidak berbeda signifikan, dengan interval kepercayaan 95% yang mencakup nol.
3. Analisis rasio signal-to-noise (S/N) dengan kriteria *larger-the-better* menunjukkan bahwa perendaman 3 jam menghasilkan nilai S/N tertinggi untuk tegangan tarik sebesar 28,5245 dB dan regangan sebesar 17,6453 dB. Pengamatan karakteristik patahan struktur makro menunjukkan adanya *void* pada spesimen perendaman 1 dan 2 jam, sedangkan *fiber breaking* ditemukan pada perendaman 3, 4, dan 5 jam. Dengan demikian, perendaman 3 jam menunjukkan respons rata-rata dan rasio S/N tertinggi pada kondisi penelitian ini, tetapi belum dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum universal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] L. Hamdi, B. Asma, and B. Ali, “Tensile mechanical performance of natural/natural fiber reinforced hybrid bio-composite materials—A statistical approach,” Journal of Industrial Textiles, vol. 54, 2024, doi: 10.1177/15280837241264014.

[2] C. I. Madueke, O. M. Mbah, and R. Umunakwe, “A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study,” Polymer Bulletin, vol. 80, no. 4, pp. 3489–3506, 2023, doi: 10.1007/s00289-022-04241-y.

[3] Z. Millenio, F. Paundra, H. T. Yudhistira, E. Pujiyulianto, and I. Prabowo, "Pengaruh perlakuan alkali terhadap kekuatan tarik bahan komposit serat rumput teki," Journal of Applied Mechanical Technology, vol. 1, no. 1, pp. 10–15, 2022, doi: 10.31884/jamet.v1i1.5.

[4] A. A. Bekele, H. T. Mekonnen, B. S. Yigezu, and A. Y. Nega, "Experimental investigation on tensile strength and impact strength of palmyra palm leaf stalk–sisal fiber reinforced polymer hybrid composite," Heliyon, vol. 10, no. 20, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39555.

[5] A. A. Ayalew and A. F. Wodage, "Characterization of chemically treated sisal fiber/polyester composites," Journal of Engineering, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/8583213.

[6] J. J. S. Nesimnasi, K. Boimau, and Y. M. Pell, "Pengaruh perlakuan alkali (NaOH) pada serat Agave cantula terhadap kekuatan tarik komposit polyester," Lontar Jurnal Teknik Mesin, 2015. [Online]. Available: http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU

[7] M. A. Suyuti, R. Nur, T. W. Patandean, and A. M. S. Usman, "Kaji eksperimental sifat mekanik komposit resin epoxy berpenguat serat alam," Jurnal Teknik Mesin Sinergi, vol. 23, no. 1, pp. 137–148, 2025, doi: 10.31963/sinergi.v23i1.5516.

[8] [8] Fikran, M. Balfas, and Mardin, "Analisis sifat mekanis bahan komposit lamina serat sisal (*Sisalana Agave*) bermatriks polimer," *Journal of Technology Process*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2022. [Online]. Available: Artikel pada laman resmi Journal of Technology Process.

[9] N. H. Sari, S. Suteja, S. Hidayatullah, F. H. Al-Farizi, and I. P. Lokantara, "Performance evaluation of hybrid sisalana Agave fiber and carbon powder in polyester composites: A study on mechanical, thermal, and microstructural characteristics," Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 11, 2025, Art. no. 101215, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101215.

[10] Ismadi, Juwono, A. L., Munawar, S. S., & Wibowo, E. S. (2026). Optimizing NaOH treatment of sisal fibers to improve interfacial adhesion and composite performance with unsaturated polyester matrix. Journal of Wood Chemistry and Technology, 46(3), 99–111.DOI: 10.1080/02773813.2026.2635371.

[11] Mitra, A. (2011). The Taguchi method. WIREs Computational Statistics, 3(5), 472–480. DOI: https://doi.org/10.1002/wics.169

[12] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005. doi: 10.1002/9780470258354.

[13] M. W. Hisam, A. A. Dar, M. O. Elrasheed, M. S. Khan, R. Gera, et al., "The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines," Journal of Statistical Theory and Applications, vol. 23, pp. 365–389, 2024, doi: 10.1007/s44199-024-00093-9.

[14] ASTM International, ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.

[15] A. R. Ramachandran et al., "Modification of Fibers and Matrices in Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Review," Macromolecular Rapid Communications, vol. 43, no. 17, Art. no. 2100862, 2022. doi: 10.1002/marc.202100862.

[16] M. Varma and S. Chandran, "Surface treatment of natural fibers for enhancing interfacial adhesion and mechanical properties in biocomposites—A comprehensive review," *Composite Interfaces*, vol. 32, pp. 1729–1765, 2025, doi: 10.1080/09276440.2025.2498795.

[17] R. A. Armstrong, F. Eperjesi, and B. Gilmartin, "The application of analysis of variance (ANOVA) to different experimental designs in optometry," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 22, no. 3, pp. 248–256, 2002, doi: 10.1046/j.1475-1313.2002.00020.x.

[18] A. Kusmiran and R. Desiasni, "Analisis pengaruh konsentrasi natrium hidroksida terhadap sifat mekanik biokomposit berpenguat serat sisal," *Jurnal Fisika*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.15294/jf.v10i2.25462.

[19] S. O. Amiandamhen, M. Meincken, and L. Tyhoda, "Natural fibre modification and its influence on fibre-matrix interfacial properties in biocomposite materials," Fibers and Polymers, vol. 21, pp. 677–689, 2020, doi: 10.1007/s12221-020-9362-5

[20] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 856–873, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010