

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Identifikasi Faktor Efisiensi Penguatan Komposit Epoksi Berpenguat Serat Alam Menggunakan Aturan Campuran Termodifikasi dan Metode Kuadrat Terkecil

Identification of Reinforcement Efficiency Factors in Natural Fiber Reinforced Epoxy Composites Using a Modified Rule of Mixtures and the Least-Squares Method

Evani Shilo Manullang*, Sovian Aritonang

*Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

shilomanullang@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

Natural fiber–reinforced polymer composites (NFRPCs) are increasingly considered as substitutes for synthetic fiber composites owing to their low weight and sustainability, although the mechanical data reported in the literature are widely scattered. This study builds a mathematical framework that allows such data to be interpreted quantitatively. A total of 35 epoxy composite systems reinforced with seven natural fibers (flax, hemp, sisal, jute, banana, coir, kenaf), collected from a recent literature review, were examined using Voigt–Reuss bounds, a modified rule of mixtures containing an efficiency factor η, least-squares regression, analysis of variance (ANOVA), and a first-order degradation kinetics model. Screening against the Voigt upper bound revealed three modulus entries that are physically implausible. From the 32 remaining entries, the effective matrix modulus was found to be E_m = 2.42 ± 0.77 GPa, together with a modulus efficiency factor η_E = 0.163 ± 0.038 and a strength efficiency factor η_σ = 0.173 ± 0.037. Most modulus values, 23 out of 32, lie below the Reuss lower bound, pointing to poor stress transfer between fiber and matrix. Chemical treatment raised η_σ significantly, from 0.052 for untreated fibers to 0.195–0.238 (ANOVA: F(4,27) = 3.13; p = 0.031). Tensile strength showed a positive relationship with fiber volume fraction (r = 0.536; p = 0.002). The first-order kinetics model estimates degradation half-lives of biodegradable composites in the range of 201 to 955 days. The proposed framework may be used both to screen data and as a basis for the preliminary design of natural fiber composites.

Keywords : *Natural Fiber Composites, Rule Of Mixtures, Efficiency Factor, Least Squares, Voigt–Reuss Bounds*

Abstrak

Komposit polimer yang diperkuat serat alam (NFRPC) banyak dilirik sebagai pengganti komposit serat sintetis karena bobotnya ringan dan sifatnya berkelanjutan, namun data sifat mekanik yang tersedia di literatur menunjukkan sebaran yang lebar. Studi ini menyusun sebuah kerangka matematis agar data tersebut dapat ditafsirkan secara kuantitatif. Sebanyak 35 sistem komposit epoksi dengan tujuh jenis penguat serat alam (rami, hemp, sisal, jute, pisang, sabut kelapa, kenaf) yang dikumpulkan dari kajian pustaka terkini dianalisis dengan batas Voigt–Reuss, aturan campuran termodifikasi yang memuat faktor efisiensi η, regresi kuadrat terkecil, analisis varians (ANOVA), serta model kinetika degradasi orde-satu. Melalui penapisan terhadap batas atas Voigt, ditemukan tiga data modulus yang tidak masuk akal secara fisis. Dari 32 data yang tersisa, diperoleh modulus matriks efektif E_m = 2,42 ± 0,77 GPa, faktor efisiensi modulus η_E = 0,163 ± 0,038, dan faktor efisiensi kekuatan η_σ = 0,173 ± 0,037. Sebagian besar data modulus, yakni 23 dari 32, terletak di bawah batas bawah Reuss sehingga mengisyaratkan lemahnya penyaluran tegangan antara serat dan matriks. Pemberian perlakuan kimia menaikkan η_σ secara bermakna, dari 0,052 pada serat tanpa perlakuan menjadi 0,195–0,238 (ANOVA: F(4,27) = 3,13; p = 0,031). Kekuatan tarik memiliki hubungan positif dengan fraksi volume serat (r = 0,536; p = 0,002). Berdasarkan model kinetika orde-satu, waktu paruh degradasi komposit biodegradabel diperkirakan berada pada rentang 201

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

hingga 955 hari. Kerangka yang diusulkan berpotensi dimanfaatkan untuk menyaring data sekaligus sebagai dasar perancangan awal komposit serat alam.

Kata Kunci: Komposit Serat Alam, Aturan Campuran, Faktor Efisiensi, Kuadrat Terkecil, Batas Voigt–Reuss

Penulis Korespondensi : Evani Shilo Manullang

I. PENDAHULUAN

Dorongan untuk memperoleh material yang ringan, ekonomis, dan bersahabat dengan lingkungan telah memacu pengembangan komposit polimer yang diperkuat serat alam (*natural fiber reinforced polymer composites*, NFRPC). Rami (*flax*), hemp, jute, sisal, dan kenaf mempunyai densitas 1,2–1,6 g/cm³, lebih kecil dibandingkan serat gelas yang densitasnya sekitar 2,4 g/cm³, sehingga komposit yang dihasilkan mampu bersaing dari sisi kekuatan spesifik (Ajayi *et al.*, 2025). Pemanfaatan komposit jenis ini sudah merambah sektor otomotif, konstruksi, pertahanan, hingga infrastruktur (Ajayi *et al.*, 2025).

Meski demikian, NFRPC memiliki sejumlah kekurangan, terutama sifat serat yang hidrofilik, ikatan serat–matriks yang kurang kuat, dan sifat yang sangat beragam (Thimmegowda *et al.*, 2025; Temesgen, Kaufmann and Cebulla, 2026). Untuk menanggulanginya, peneliti telah menguji beberapa strategi, antara lain perlakuan kimia pada serat (alkali, silan, asetilasi, benzoilasi), hibridisasi serat, dan penambahan *nanofiller* (Thimmegowda *et al.*, 2025). Di luar sifat mekanik, ketahanan jangka panjang dan kecepatan degradasi turut menentukan layak tidaknya NFRPC selama siklus hidupnya (Ramful, 2024).

Temesgen, Kaufmann and Cebulla (2026) telah mengumpulkan data sifat mekanik komposit epoksi yang diperkuat tujuh jenis serat alam dari banyak peneliti. Ulasan tersebut masih bersifat deskriptif karena data hanya ditampilkan dalam tabel lalu dibandingkan berdasarkan rerata. Ulasan itu belum memeriksa kesesuaian data dengan batas teoretis mekanika komposit, dan juga belum menakar seberapa efektif serat mentransfer sifatnya kepada komposit.

Sebenarnya, mekanika komposit telah menyediakan perangkat matematis yang mapan untuk menjawab persoalan tersebut. Batas Voigt dan Reuss (Voigt, 1889; Reuss, 1929) menentukan rentang modulus yang dimungkinkan secara fisis. Aturan campuran termodifikasi yang memuat faktor efisiensi (Krenchel, 1964; Hull and Clyne, 1996) dapat menakar porsi sifat serat yang benar-benar dimanfaatkan. Sementara itu, metode kuadrat terkecil dan ANOVA (Draper and Smith, 1998; Montgomery, 2017) memungkinkan parameter-parameter tersebut ditentukan dari data dan diuji secara statistik.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini ditujukan untuk: (1) memeriksa konsistensi fisis data sifat mekanik NFRPC dari Temesgen, Kaufmann and Cebulla (2026) dengan batas Voigt–Reuss; (2) menentukan modulus matriks efektif dan faktor efisiensi penguatan melalui metode kuadrat terkecil; (3) menguji apakah jenis perlakuan kimia berpengaruh terhadap faktor efisiensi; dan (4) memodelkan kinetika degradasi komposit biodegradabel memakai data Ramful (2024). Sumbangan utama penelitian ini berupa kerangka matematis yang mengolah data hasil kajian pustaka menjadi parameter kuantitatif yang siap digunakan dalam perancangan.

II. METODE

Studi ini tergolong penelitian pemodelan matematis yang memanfaatkan data sekunder. Langkah-langkahnya meliputi pengumpulan data, penentuan sifat serat acuan, penyusunan model, identifikasi parameter, pengujian statistik, dan pemodelan kinetika degradasi.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Data utama berupa 36 baris sifat mekanik komposit epoksi yang diperkuat serat rami, hemp, sisal, jute, pisang, sabut kelapa, dan kenaf (Tabel 4–10 dalam Temesgen, Kaufmann and Cebulla, 2026). Tiap baris berisi bentuk serat (searah/UD, anyaman, mat, pendek), jenis perlakuan, V_f, kekuatan tarik, modulus tarik, kekuatan lentur, dan kekuatan impak. Satu baris, yaitu rami/epoksi UD tanpa perlakuan, tidak memuat nilai tarik sehingga tidak diikutkan, dan jumlah data menjadi $n = 35$. Data yang dilaporkan dalam bentuk rentang diwakili oleh nilai tengahnya; sebagai contoh, V_f 38–42% dianggap 40%. Sebagai data pendukung, digunakan data degradasi dari Tabel 5 Ramful (2024) dan data perendaman dalam air laut dari Temesgen, Kaufmann and Cebulla (2026).

Nilai sifat serat ditetapkan sebagai titik tengah rentang yang tercantum pada Tabel 3 Temesgen, Kaufmann and Cebulla (2026). Karena kenaf tidak termuat dalam tabel itu, sifatnya diambil dari Tabel 1 Ajayi *et al.* (2025). Nilai-nilai tersebut dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Serat Acuan (Titik Tengah Rentang Literatur)

Serat	ρ_f (g/cm³)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	Sumber
Rami (*flax*)	1,42	700	53,5	Temesgen *et al.* (2026)
Hemp	1,16	900	50,0	Temesgen *et al.* (2026)
Kenaf	1,05	707	35,5	Ajayi *et al.* (2025)
Jute	1,51	583	32,5	Temesgen *et al.* (2026)
Sisal	1,43	600	23,5	Temesgen *et al.* (2026)
Pisang	1,25	328	19,0	Temesgen *et al.* (2026)
Sabut kelapa (*coir*)	1,30	140,5	5,0	Temesgen *et al.* (2026)

Pada komposit dua fasa dengan fraksi volume serat V_f dan fraksi matriks $V_m = 1 - V_f$, model regangan seragam (*iso-strain*, Voigt) menghasilkan batas atas modulus, sementara model tegangan seragam (*iso-stress*, Reuss) menghasilkan batas bawahnya (Voigt, 1889; Reuss, 1929; Hull and Clyne, 1996):

$$E_V = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \qquad (1)$$

$$E_R = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m}\right)^{-1} \qquad (2)$$

dalam hal ini E_f adalah modulus serat dan E_m adalah modulus matriks. Setiap komposit harus memenuhi $E_R \leq E_c \leq E_V$. Apabila nilai terukur E_c lebih besar daripada E_V, data tersebut dianggap tidak konsisten secara fisis. Penapisan menggunakan E_m = 3,0 GPa yang merupakan nilai lazim untuk resin epoksi (Hull and Clyne, 1996), dan data yang memenuhi $E_c > E_V$ tidak diikutkan dalam analisis.

Serat alam yang pendek, tersebar acak, atau ikatannya lemah tidak mampu meneruskan seluruh sifatnya kepada komposit. Pengaruh ini diwakili oleh faktor efisiensi η ($0 < \eta \leq 1$) (Krenchel, 1964; Kelly and Tyson, 1965; Madsen and Lilholt, 2003):

$$E_c = \eta_E E_f V_f + E_m(1 - V_f) \qquad (3)$$

$$\sigma_c = \eta_\sigma \sigma_f V_f + \sigma_m'(1 - V_f) \qquad (4)$$

dengan σ_f menyatakan kekuatan tarik serat dan σ_m' menyatakan tegangan efektif matriks pada saat komposit mengalami kegagalan. Krenchel (1964) menjelaskan bahwa η dapat dipecah menjadi $\eta = \eta_o \eta_l$, yakni faktor orientasi η_o (bernilai 1 untuk serat searah, kira-kira 0,5 untuk anyaman dua arah, dan kira-kira 0,375 untuk serat acak bidang) serta faktor panjang dan adhesi η_l. Pada penelitian ini, η diperlakukan sebagai satu parameter gabungan yang ditentukan langsung dari data.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Persamaan (3) dan (4) bersifat linear terhadap dua parameter yang belum diketahui. Dengan n data, persamaan modulus dapat dinyatakan dalam bentuk matriks $\mathbf{y} = \mathbf{X\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\begin{bmatrix} E_{c,1} \\ \vdots \\ E_{c,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - V_{f,1} & E_{f,1}V_{f,1} \\ \vdots & \vdots \\ 1 - V_{f,n} & E_{f,n}V_{f,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_m \\ \eta_E \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \qquad (5)$$

Penduga kuadrat terkecil diperoleh dengan meminimumkan jumlah kuadrat galat $S(\boldsymbol{\beta}) = (\mathbf{y} - \mathbf{X\beta})^T(\mathbf{y} - \mathbf{X\beta})$. Dengan mensyaratkan $\partial S / \partial \boldsymbol{\beta} = 0$, diperoleh persamaan normal (Draper and Smith, 1998):

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y} \qquad (6)$$

Galat baku setiap parameter dihitung dari unsur diagonal matriks kovarians $s^2(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$, di mana $s^2 = S(\hat{\boldsymbol{\beta}})/(n-p)$ dan p adalah banyaknya parameter. Ketepatan model diukur melalui koefisien determinasi R^2 dan akar rata-rata kuadrat galat (RMSE). Persamaan (4) diselesaikan dengan prosedur serupa, hanya saja kolom kedua $\mathbf{X}$ diganti dengan $\sigma_f V_f$. Untuk menguji pengaruh perlakuan kimia, data dibagi ke dalam lima kelompok perlakuan (tanpa perlakuan, alkali, silan, alkali + silan, dan lainnya: asetilasi, benzoilasi, permanganat). Selanjutnya, kolom $\sigma_f V_f$ diuraikan memakai variabel indikator D_j yang bernilai 1 jika data menggunakan perlakuan j dan 0 jika tidak:

$$\sigma_c = \sigma_m'(1 - V_f) + \sum_{j=1}^{k} \eta_{\sigma,j}\, D_j\, \sigma_f V_f \qquad (7)$$

Nilai faktor efisiensi untuk setiap data diperoleh dengan menyusun ulang Persamaan (4):

$$\eta_{\sigma,i} = \frac{\sigma_{c,i} - \sigma_m'(1 - V_{f,i})}{\sigma_{f,i}\, V_{f,i}} \qquad (8)$$

Selanjutnya, perbedaan rerata η_σ di antara kelompok perlakuan diuji menggunakan ANOVA satu arah (Montgomery, 2017) dengan taraf α = 0,05:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{k} n_j \left(\bar{\eta}_j - \bar{\eta}\right)^2/(k-1)}{\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n_j}\left(\eta_{ij} - \bar{\eta}_j\right)^2/(n-k)} \qquad (9)$$

Uji Kruskal–Wallis dipakai sebagai pembanding nonparametrik. Keeratan hubungan linear antarvariabel (V_f, kekuatan tarik, modulus, kekuatan lentur, dan kekuatan impak) dinyatakan dengan koefisien korelasi Pearson r, dan signifikansinya diuji dengan statistik

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \qquad (10)$$

dengan derajat bebas $n - 2$. Kekuatan spesifik dihitung dari σ_c/ρ_c, dengan $\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m(1 - V_f)$ dan ρ_m = 1,2 g/cm³ untuk epoksi (Hull and Clyne, 1996).

Proses degradasi komposit biodegradabel dimodelkan sebagai reaksi orde-satu, artinya laju degradasi berbanding lurus dengan fraksi material yang masih utuh:

$$\frac{dD}{dt} = k\,(1 - D), \qquad D(0) = 0 \qquad (11)$$

Dengan memisahkan variabel lalu mengintegrasikannya, diperoleh:

$$D(t) = 1 - e^{-kt} \qquad (12)$$

Jika fraksi yang telah terdegradasi D_τ pada waktu τ diketahui, konstanta laju dan waktu paruh dapat dihitung melalui:

$$k = -\frac{\ln(1 - D_\tau)}{\tau}, \qquad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \qquad (13)$$

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

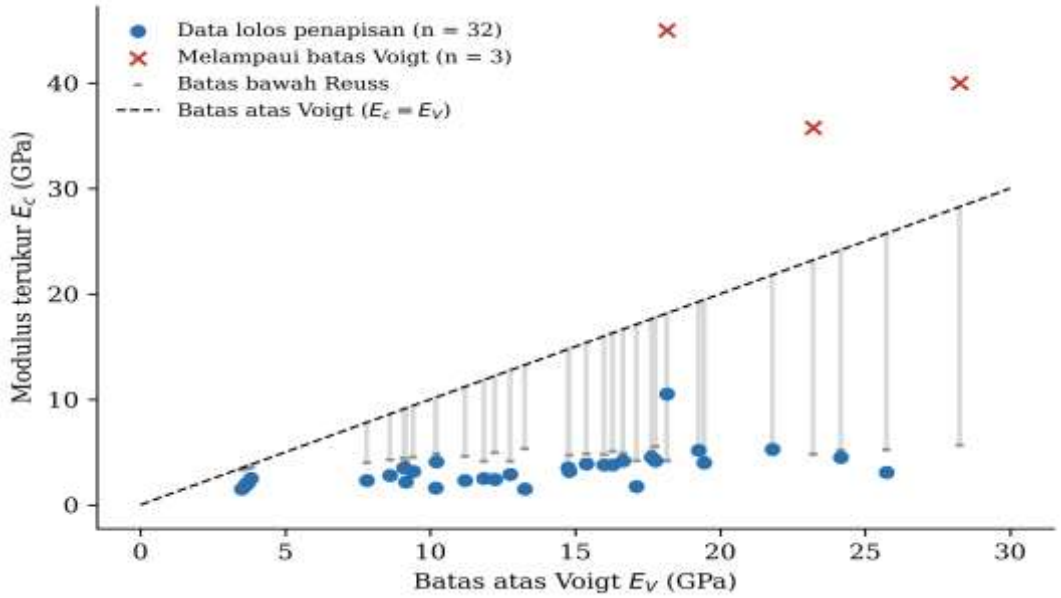
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Model serupa dalam bentuk retensi, $P(t) = P_0 e^{-kt}$, digunakan untuk menggambarkan penurunan sifat mekanik akibat perendaman dalam air laut. Semua perhitungan dikerjakan dengan Python (NumPy dan SciPy), sedangkan grafik disusun menggunakan Matplotlib.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Dari 35 data modulus, tiga di antaranya melewati batas atas Voigt dan seluruhnya berasal dari komposit rami/epoksi, yaitu anyaman alkali + silan (40 GPa, sementara E_V = 28,3 GPa), UD perlakuan enzim (35,75 GPa terhadap 23,2 GPa), dan mat asetilasi (45 GPa terhadap 18,2 GPa). Ketiga data itu dikeluarkan sehingga analisis lanjutan menggunakan n = 32. Seperti terlihat pada Gambar 1, data yang lolos penapisan jauh lebih rendah daripada batas Voigt, dengan rasio rerata E_c/E_V = 0,31. Selain itu, 23 dari 32 data berada di bawah batas bawah Reuss (yang dihitung memakai E_m = 2,42 GPa hasil identifikasi), dengan rasio rerata E_c/E_R = 0,90.



Gambar 1. Modulus Terukur terhadap Batas Atas Voigt (garis abu-abu: rentang Reuss–Voigt; tanda silang: data yang dikeluarkan)

Tabel 2. Hasil Identifikasi Parameter Aturan Campuran Termodifikasi (n = 32)

Model	Parameter matriks	Faktor efisiensi	R^2	RMSE
Modulus tarik	E_m = 2,42 ± 0,77 GPa	η_E = 0,163 ± 0,038	0,303	1,39 GPa
Kekuatan tarik	$\sigma_m{}'$ = 31,1 ± 14,1 MPa	η_σ = 0,173 ± 0,037	0,239	23,9 MPa

Penggunaan model variabel indikator (Persamaan 7) meningkatkan R^2 kekuatan tarik dari 0,239 menjadi 0,406 (Tabel 3). ANOVA satu arah terhadap η_σ per data memberikan F(4, 27) = 3,13 dan p = 0,031,

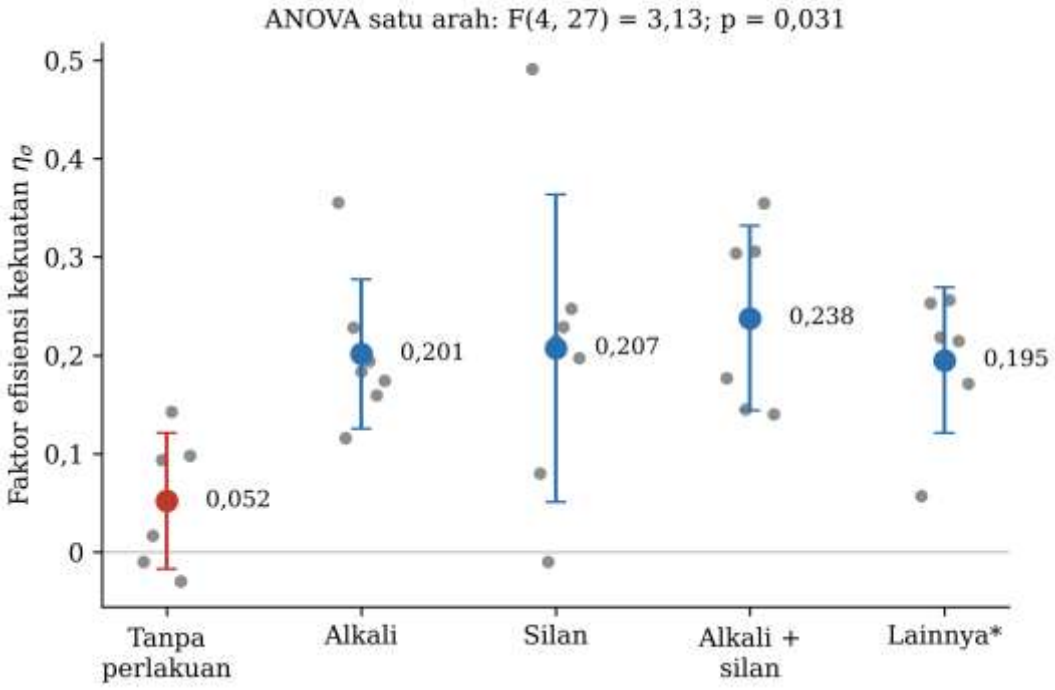
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

sedangkan uji Kruskal–Wallis menghasilkan H = 10,18 dan p = 0,037 (Gambar 2). Dengan demikian, kedua uji sepakat bahwa perbedaan antarkelompok bermakna pada α = 0,05.

Tabel 3. Faktor Efisiensi Kekuatan per Kelompok Perlakuan

Perlakuan	n	η_σ model indikator (± galat baku)	η_σ rata-rata per data (± simpangan baku)
Tanpa perlakuan	6	−0,003 ± 0,081	0,052 ± 0,069
Alkali	7	0,189 ± 0,047	0,201 ± 0,076
Silan	7	0,139 ± 0,044	0,207 ± 0,156
Alkali + silan	6	0,158 ± 0,053	0,238 ± 0,094
Lainnya	6	0,136 ± 0,053	0,195 ± 0,074



Gambar 2. Faktor Efisiensi Kekuatan per Kelompok Perlakuan (titik besar: rata-rata; batang galat: simpangan baku; *Lainnya: asetilasi, benzoilasi, permanganat)

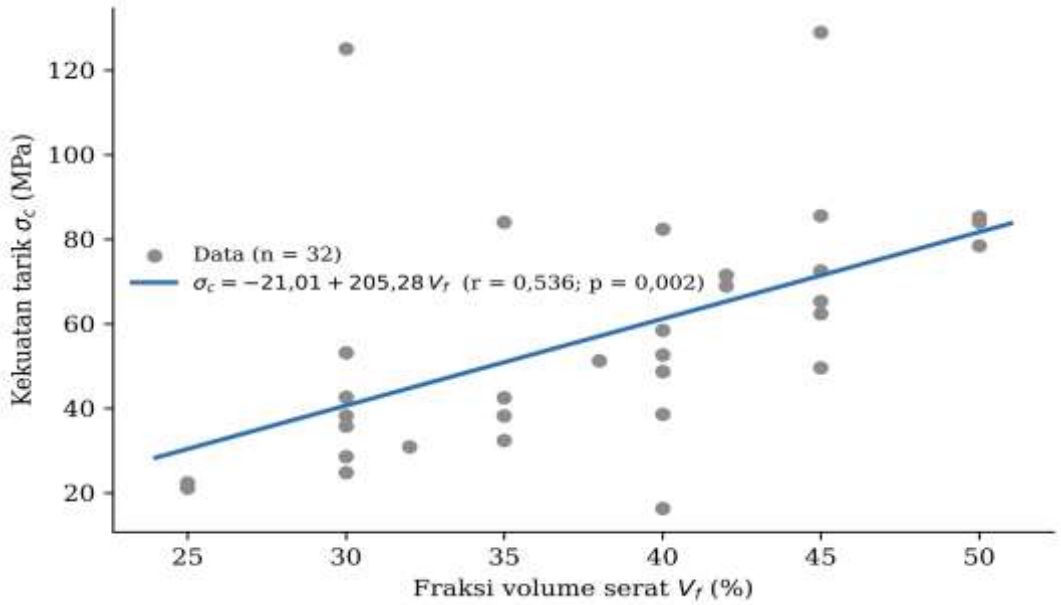
Tabel 4 menampilkan matriks korelasi Pearson. Kekuatan tarik dan kekuatan lentur naik secara signifikan seiring bertambahnya V_f, sementara modulus dan kekuatan impak tidak menunjukkan pola tersebut. Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah $\sigma_c = -21{,}01 + 205{,}28\, V_f$ (r = 0,536; p = 0,002) untuk rentang V_f 25–50% (Gambar 3).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 4. Koefisien Korelasi Pearson (n = 32; tanda * berarti p < 0,01)

	V_f	Kekuatan tarik	Modulus	Kekuatan lentur	Impak
V_f	1	0,536*	0,176	0,490*	0,260
Kekuatan tarik		1	0,555*	0,695*	0,171
Modulus			1	0,117	−0,146
Kekuatan lentur				1	−0,067
Impak					1



Gambar 3. Regresi Linear Kekuatan Tarik terhadap Fraksi Volume Serat

Tabel 5 menyajikan kekuatan spesifik komposit beserta rasio pemanfaatannya terhadap kekuatan spesifik serat. Kekuatan spesifik paling tinggi dicapai oleh komposit rami dan kenaf, sedangkan rasio pemanfaatan tertinggi dimiliki sabut kelapa (0,23) dan yang terendah dimiliki hemp (0,05).

Tabel 5. Kekuatan Spesifik Komposit dan Rasio Pemanfaatannya terhadap Serat

Serat	ρ_c rata-rata (g/cm³)	σ_c/ρ_c (MPa·cm³/g)	σ_f/ρ_f (MPa·cm³/g)	Rasio pemanfaatan
Rami (n = 2)	1,28	99,0	493	0,20
Kenaf	1,14	57,7	673	0,09
Jute	1,33	45,9	386	0,12
Sisal	1,29	45,5	421	0,11
Hemp	1,18	41,3	779	0,05
Pisang	1,22	39,5	262	0,15
Sabut kelapa	1,23	24,8	108	0,23

Tabel 6 memuat parameter kinetika orde-satu yang diturunkan dari data degradasi 100 hari (Ramful, 2024), dengan $t_{90} = \ln 10/k$ sebagai waktu yang dibutuhkan hingga 90% material terdegradasi. Kurva

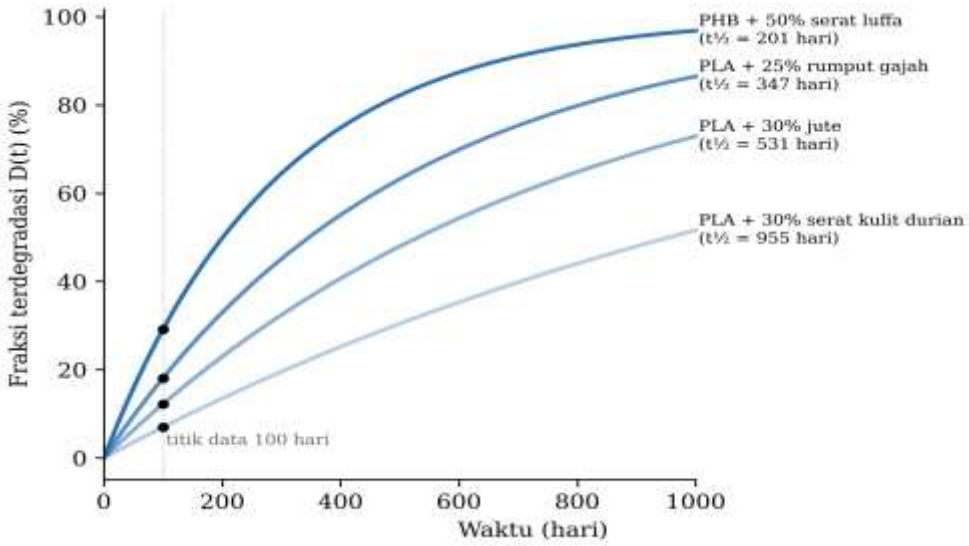
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

degradasi hasil pemodelan ditampilkan pada Gambar 4. Pada hemp/epoksi yang direndam dalam air laut selama 150 hari (Temesgen, Kaufmann and Cebulla, 2026), kekuatan tarik turun 13%, kekakuan turun 10%, dan kekuatan lentur turun 17%, yang setara dengan k masing-masing 0,93 × 10⁻³, 0,70 × 10⁻³, dan 1,24 × 10⁻³ hari⁻¹. Bila diekstrapolasi hingga 365 hari, retensi yang diprediksi adalah 71,3% untuk kekuatan tarik, 77,4% untuk kekakuan, dan 63,5% untuk kekuatan lentur.

Tabel 6. Parameter Kinetika Degradasi Orde-Satu

Komposit	D_{100} (%)	k (×10⁻³ hari⁻¹)	$t_{1/2}$ (hari)	t_{90} (hari)
PLA + 30% serat kulit durian	7,00	0,726	955	3173
PLA + 9% sabut + 21% serat daun nanas	11,20	1,188	584	1938
PLA + 30% jute	12,24	1,306	531	1764
PLA + 30% serat daun nanas	12,40	1,324	524	1739
PLA + 25% rumput gajah	18,12	1,999	347	1152
PHB + 50% serat luffa	29,17	3,449	201	668



Gambar 4. Kurva Degradasi Orde-Satu untuk Empat Komposit Biodegradabel (titik hitam: data 100 hari)

2. Pembahasan

Ketiga data rami yang tidak diikutkan memiliki nilai 35–45 GPa, jauh melampaui modulus komposit serat alam lainnya yang hanya 1,5–10,5 GPa. Nilai sebesar itu tidak mungkin dicapai secara fisis pada V_f 30–50%, sehingga besar kemungkinan disebabkan oleh kesalahan penulisan, perbedaan definisi modulus, atau sifat serat yang menyimpang jauh dari nilai acuan. Hasil ini memperlihatkan bahwa batas Voigt dapat difungsikan sebagai alat penyaring yang sederhana sebelum data dari kajian pustaka dipakai untuk keperluan perancangan.

Batas Reuss mewakili keadaan ketika serat dan matriks memikul tegangan yang sama tanpa saling menopang. Banyaknya data yang jatuh di bawah batas tersebut menandakan adanya cacat lain, misalnya porositas, rongga pada antarmuka, dan air yang terserap, yang tidak diperhitungkan dalam model dua fasa ideal (Madsen and Lilholt, 2003). Modulus matriks efektif yang diperoleh, yaitu 2,42 GPa, jatuh dalam rentang umum resin epoksi (Hull and Clyne, 1996) walaupun nilai ini tidak diberikan sebagai masukan model.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Kecocokan tersebut menjadi bukti internal bahwa aturan campuran termodifikasi memiliki makna fisis untuk data yang dianalisis.

Nilai η_E = 0,163 dan η_σ = 0,173 menunjukkan bahwa, secara rata-rata, kekakuan dan kekuatan intrinsik serat yang berhasil diteruskan ke komposit hanya sekitar 16–17%. Padahal faktor orientasi Krenchel sendiri bernilai 0,375–1 (Krenchel, 1964), sehingga kecilnya η tidak dapat dijelaskan hanya dari orientasi serat. Faktor panjang dan adhesi η_l diperkirakan hanya sekitar 0,2–0,4, yang mengindikasikan buruknya transfer tegangan di antarmuka. Rendahnya R^2 (0,24–0,30) dapat dimaklumi karena data dikumpulkan dari banyak laboratorium dengan bentuk serat, cara fabrikasi, dan kondisi pengujian yang tidak seragam (Temesgen, Kaufmann and Cebulla, 2026).

Untuk komposit tanpa perlakuan, η_σ tidak berbeda secara bermakna dari nol, yang berarti kekuatan komposit hampir sepenuhnya bergantung pada matriks dan serat pada dasarnya hanya berfungsi sebagai pengisi. Pemberian perlakuan kimia meningkatkan η_σ kira-kira 3,7–4,6 kali, dan rerata tertinggi dicapai oleh kombinasi alkali + silan (0,238). Temuan ini selaras dengan mekanisme yang diuraikan Thimmegowda *et al.* (2025), yakni alkali menghilangkan hemiselulosa dan lilin sehingga permukaan serat menjadi lebih kasar, kemudian silan membentuk ikatan kimia yang menjembatani gugus hidroksil serat dengan matriks.

Berdasarkan kemiringan garis regresi, setiap penambahan V_f sebesar 10 poin persen meningkatkan kekuatan tarik rata-rata kira-kira 20,5 MPa. Intersep yang bernilai negatif tidak dapat dimaknai secara fisis karena terletak di luar rentang data. Tidak ditemukannya korelasi antara kekuatan impak dan V_f mengisyaratkan bahwa ketangguhan impak lebih ditentukan oleh mekanisme penyerapan energi, seperti tercabutnya serat dan penjembatanan retak (Ramful, 2024), ketimbang oleh banyaknya serat.

Menariknya, hemp yang memiliki kekuatan spesifik intrinsik paling tinggi (779 MPa·cm³/g) justru menunjukkan rasio pemanfaatan paling rendah, sebaliknya sabut kelapa yang paling lemah memiliki rasio paling tinggi. Kecenderungan ini mengisyaratkan bahwa keunggulan serat berkekuatan tinggi paling mudah hilang di antarmuka, sehingga peningkatan adhesi berpeluang memberikan perbaikan terbesar pada serat kuat seperti hemp dan kenaf.

Dengan model orde-satu, satu titik pengukuran dapat diperluas menjadi kurva degradasi yang lengkap. Komposit berbasis PHB yang kandungan seratnya tinggi terdegradasi hampir lima kali lebih cepat dibandingkan PLA + serat kulit durian. Tiga sistem yang degradasinya melebihi 100% dalam 100 hari tidak dapat dimodelkan karena $\ln(1 - D)$ tidak terdefinisi apabila $D \geq 1$. Prediksi retensi selama satu tahun di air laut bertumpu pada asumsi bahwa mekanisme degradasi tetap sama sepanjang paparan, sehingga masih harus dibuktikan melalui eksperimen jangka panjang sebelum dijadikan acuan desain.

IV. KESIMPULAN

Kerangka matematis yang memadukan batas Voigt–Reuss, aturan campuran termodifikasi, dan metode kuadrat terkecil terbukti mampu mengolah data deskriptif hasil kajian pustaka NFRPC menjadi parameter kuantitatif. Penapisan dengan batas Voigt menemukan 3 dari 35 data modulus yang tidak konsisten secara fisis. Identifikasi parameter memberikan E_m = 2,42 GPa yang sesuai dengan rentang epoksi, serta η_E = 0,163 dan η_σ = 0,173, yang berarti hanya sekitar 16–17% sifat intrinsik serat yang diteruskan ke komposit. Perlakuan kimia menaikkan η_σ secara bermakna dari 0,052 menjadi 0,195–0,238 (p = 0,031), dengan nilai tertinggi pada kombinasi alkali + silan. Kekuatan tarik bertambah secara linear terhadap V_f, sedangkan kekuatan impak tidak demikian. Model kinetika orde-satu memperkirakan waktu paruh degradasi komposit biodegradabel sebesar 201–

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

955 hari. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar η dipisahkan menjadi faktor orientasi dan faktor panjang, porositas dimasukkan ke dalam model, dan parameter yang diperoleh divalidasi melalui eksperimen pada serat lokal Indonesia seperti rami, sabut kelapa, dan kenaf.

DAFTAR PUSTAKA

Ajayi, N. E., Rusnakova, S., Ajayi, A. E., Ogunleye, R. O., Agu, S. O. and Amenaghawon, A. N. (2025) 'A Comprehensive Review of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites as Emerging Materials for Sustainable Applications', *Applied Materials Today*, 43, p. 102666.

Draper, N. R. and Smith, H. (1998) *Applied Regression Analysis*. 3rd edn. New York: Wiley.

Hull, D. and Clyne, T. W. (1996) *An Introduction to Composite Materials*. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press.

Kelly, A. and Tyson, W. R. (1965) 'Tensile Properties of Fibre-Reinforced Metals: Copper/Tungsten and Copper/Molybdenum', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(6), pp. 329–350.

Krenchel, H. (1964) *Fibre Reinforcement*. Copenhagen: Akademisk Forlag.

Madsen, B. and Lilholt, H. (2003) 'Physical and Mechanical Properties of Unidirectional Plant Fibre Composites—An Evaluation of the Influence of Porosity', *Composites Science and Technology*, 63(9), pp. 1265–1272.

Montgomery, D. C. (2017) *Design and Analysis of Experiments*. 9th edn. Hoboken, NJ: Wiley.

Ramful, R. (2024) 'Mechanical Performance and Durability Attributes of Biodegradable Natural Fibre-Reinforced Composites—A Review', *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19, p. 50. doi: 10.1186/s40712-024-00198-0.

Reuss, A. (1929) 'Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle', *ZAMM – Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9(1), pp. 49–58.

Temesgen, A. G., Kaufmann, J. and Cebulla, H. (2026) 'Mechanical Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites with Critical Assessment of Recent Advances and Future Perspectives', *Discover Materials*, 6, p. 205. doi: 10.1007/s43939-026-00673-9.

Thimmegowda, D. Y., Hindi, J., Markunti, G. B. and Kakunje, M. (2025) 'Enhancement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites Using Different Approaches—A Review', *Journal of Composites Science*, 9(5), p. 220.

Voigt, W. (1889) 'Über die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper', *Annalen der Physik*, 274(12), pp. 573–587.