

# Perbandingan Nilai Impak Komposit Serat Alam sebagai Material Alternatif Blade Turbin Angin

Novia Arista Dwi Ramadina<sup>\*1</sup>, Yuliyanto, Muhammad Subhan

<sup>1,2</sup>Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Mesin Jurusan Rekayasa Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung  
e-mail: \*noviaaristadwiramadina@gmail.com, belzanyuliyanto@gmail.com, msubhan00@yahoo.co.id

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jenis serat alam terhadap ketangguhan impact komposit polimer sebagai alternatif material penguat pada aplikasi struktural. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan tiga jenis serat daun alam, yaitu serat ijuk, serat daun nanas, dan serat daun jagung, dengan fraksi volume serat sebesar 5% serta perlakuan alkali selama dua jam. Komposit difabrikasi menggunakan metode hand lay-up dan diuji menggunakan mesin uji impact model GT-7045 untuk memperoleh data ketangguhan impact. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit berbasis serat ijuk menghasilkan nilai ketangguhan impact tertinggi sebesar 24,83 kJ/m<sup>2</sup>, diikuti oleh serat daun nanas sebesar 23,86 kJ/m<sup>2</sup>, dan serat daun jagung sebesar 12,50 kJ/m<sup>2</sup>. Analisis statistik One-Way ANOVA menunjukkan nilai P-value sebesar 0,000, yang menandakan perbedaan signifikan antara ketiga jenis serat. Temuan ini memperlihatkan bahwa karakteristik serat alam berperan penting dalam menentukan ketangguhan impact komposit, sehingga serat ijuk dan serat daun nanas memiliki potensi lebih tinggi sebagai material penguat dibandingkan serat daun jagung. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan material komposit berbasis serat alam dengan performa mekanik yang lebih optimal.

**Kata Kunci:** ANOVA, komposit, ketangguhan impact, serat alam, bilah turbin

**Abstract:** This study aims to investigate the effect of different types of natural fibers on the impact toughness of polymer composites as alternative reinforcement materials for structural applications. The experiment was conducted using three types of leaf fibers—ijuk fiber, pineapple leaf fiber, and corn leaf fiber—with a fiber volume fraction of 5% and alkaline treatment for two hours. The composites were fabricated using the hand lay-up method and tested using a GT-7045 impact testing machine to obtain impact toughness values. The results showed that composites reinforced with ijuk fiber exhibited the highest impact toughness of 24.83 kJ/m<sup>2</sup>, followed by pineapple leaf fiber at 23.86 kJ/m<sup>2</sup>, and corn leaf fiber at 12.50 kJ/m<sup>2</sup>. One-Way ANOVA analysis revealed a P-value of 0.000, indicating a statistically significant difference between the three fiber types. These findings demonstrate that the intrinsic characteristics of natural fibers play an essential role in determining the impact toughness of composites, with ijuk and pineapple leaf fibers showing greater reinforcement potential compared to corn leaf fiber. This research provides a foundation for the development of natural fiber-reinforced composites with enhanced mechanical performance

**Keywords:** ANOVA, composite, impact toughness, natural fiber, wind turbine blade

Perubahan paradigma menuju pemanfaatan energi bersih dan berkelanjutan telah mendorong peningkatan pemanfaatan sumber energi terbarukan, salah satunya energi angin [1]. Sistem pembangkit listrik tenaga angin bekerja dengan mengubah energi kinetik aliran udara menjadi energi mekanik melalui rotor, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator [2]. Dalam sistem tersebut, bilah turbin (blade) berperan sangat vital sebagai elemen utama penangkap aliran angin dan penyalur torsi ke rotor, sehingga karakteristik geometrik dan sifat mekaniknya secara langsung mempengaruhi kinerja serta efisiensi konversi energi [3]. Selama beberapa dekade terakhir, material komposit berbasis serat sintetis seperti serat kaca dan serat karbon banyak digunakan sebagai material utama bilah turbin angin karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat

(specific strength) dan kekakuan yang tinggi [4], [5]. Walaupun demikian, material tersebut menghadapi sejumlah permasalahan mendasar, seperti tingginya biaya produksi, keterbatasan ketersediaan bahan baku, serta tantangan signifikan dalam proses daur ulang di akhir siklus pakai [6], [7]. Seiring meningkatnya urgensi keberlanjutan lingkungan, fokus penelitian dalam bidang rekayasa material mengalami pergeseran menuju pemanfaatan material berbasis sumber daya alam yang dapat diperbarui, termasuk serat alam sebagai penguat alternatif dalam material komposit [8], [9]. Serat alam memiliki berbagai keunggulan seperti densitas rendah, ketersediaan melimpah, harga ekonomis, serta sifat biodegradabilitas yang mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengurangan jejak karbon [10], [11]. Sejumlah kajian eksperimental dan tinjauan literatur menunjukkan bahwa penggunaan serat alam sebagai penguat pada komposit polimer mampu meningkatkan karakteristik mekanik, khususnya kekuatan tarik, lentur, dan ketangguhan, yang sangat dipengaruhi oleh orientasi serat, fraksi volume, serta metode fabrikasi [12].

Dalam konteks penerapan pada bilah turbin angin, sejumlah kajian terdahulu menunjukkan bahwa serat alam memiliki potensi aplikatif sebagai material struktural, meskipun performa mekaniknya masih berada di bawah serat sintesis konvensional untuk beban tinggi [1], [8]. Salah satu penelitian mengenai serat abaca melaporkan peningkatan signifikan terhadap sifat lentur dan ketangguhan komposit, namun belum memperluas kajian pada jenis serat daun tropis lainnya [13]. Selain itu, sejumlah penelitian terkait komposit hibrid antara serat alam dan serat sintesis melaporkan peningkatan signifikan pada kekuatan mekanik, khususnya pada ketahanan terhadap beban tarik dan lentur. Namun demikian, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam aspek keberlanjutan karena masih mengandalkan penggunaan material sintesis yang tidak terbarukan [14], [15]. Serat daun nanas (pineapple leaf fiber) memiliki kandungan selulosa tinggi serta karakteristik tarik yang baik, sehingga berpotensi sebagai penguat komposit alternatif [16]. Demikian pula, serat ijuk (*Arenga pinnata*) menunjukkan karakteristik mekanik dan ketahanan termal yang cukup kompetitif dibandingkan beberapa jenis serat alami lainnya, sehingga menjadikannya kandidat potensial untuk penguatan komposit struktural [17]. Di sisi lain, serat daun jagung, yang merupakan limbah biomassa pertanian, memiliki keunggulan dalam aspek ketersediaan dan biaya rendah, sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan [18]. Salah satu aspek krusial dalam perancangan material bilah turbin angin adalah kemampuan material untuk menyerap energi akibat tumbukan atau beban dinamis lingkungan. Karakteristik tersebut secara umum direpresentasikan melalui parameter ketangguhan impact (*impact toughness*), yang menjadi indikator penting terhadap ketahanan komposit terhadap beban operasional jangka panjang [9], [19]. Bilah turbin beroperasi dalam kondisi lingkungan terbuka, sehingga rentan terhadap beban impact dari partikel udara, hujan es, maupun benda asing. Walaupun sejumlah penelitian telah mengkaji karakteristik tarik dan lentur dari komposit serat alam, kajian mendalam mengenai perilaku impact, terutama untuk serat daun lokal, masih relatif terbatas [11], [12]. Sebagian besar studi terdahulu juga cenderung berfokus pada satu jenis serat atau kombinasi dengan serat sintesis, tanpa pendekatan komparatif yang sistematis antar berbagai jenis serat daun dengan parameter fabrikasi dan pengujian yang seragam. Oleh sebab itu, terdapat kesenjangan penelitian yang jelas dalam konteks pengembangan material komposit untuk bilah turbin angin. Pertama, data eksperimental mengenai sifat impact komposit serat daun lokal masih minim. Kedua, pendekatan komparatif untuk mengevaluasi kinerja berbagai jenis serat daun dalam kondisi uji seragam jarang dilakukan. Ketiga, kajian tersebut penting untuk mendukung eksplorasi material lokal berkelanjutan dalam mendukung transisi energi bersih. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengukur dan membandingkan sifat ketangguhan impact (*impact toughness*) komposit yang diperkuat dengan serat ijuk, serat daun nanas, dan serat daun jagung. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya basis data mekanik komposit serat daun Indonesia, sekaligus memberikan kontribusi terhadap pengembangan material bilah turbin angin yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis

## METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium untuk mengkarakterisasi sifat ketangguhan impact dari komposit berbasis serat alam. Hipotesis utama dalam penelitian ini adalah bahwa variasi jenis serat alam, yakni serat ijuk (*Arenga pinnata*), serat daun nanas (*Ananas comosus*), dan serat daun jagung (*Zea mays*) akan menghasilkan perbedaan nilai energi serap impact, meskipun digunakan pada fraksi volume serat yang serupa. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung menggunakan mesin uji impact model GT-7045.

### Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit polimer yang diperkuat dengan serat alam, dengan fokus pada tiga jenis serat: serat daun nanas (*Ananas comosus*), serat daun jagung (*Zea mays*), dan serat ijuk (*Arenga pinnata*). Pemilihan ketiga serat ini didasarkan pada kombinasi antara ketersediaan lokal di Indonesia, potensi biaya rendah, dan karakteristik mekanik yang menjanjikan sebagai alternatif material penguat komposit untuk aplikasi struktural seperti bilah turbin angin [1], [4]. Serat alam dipilih karena keunggulannya dibandingkan serat sintesis seperti kaca atau karbon: densitas yang lebih rendah, proses produksi yang seringkali lebih hemat energi, dan potensi daur ulang atau biodegradasi yang lebih tinggi [6], [9]. Namun demikian, untuk mencapai performa mekanik yang memadai, faktor-kunci seperti orientasi serat, fraksi

volume serat, dan metode fabrikasi sangat mempengaruhi sifat akhir komposit [11], [20]. Khusus untuk serat daun nanas, banyak studi melaporkan bahwa kandungan selulosa yang tinggi (hingga sekitar 70 %) dan struktur microfibril yang halus mendukung penguatan komposit melalui impregnasi resin yang baik dan ikatan antarmuka yang baik [20], [21]. Secara empiris, komposit berbasis nanas dilaporkan memiliki kekuatan tarik dan lentur yang cukup kompetitif dibanding beberapa serat alam lain, menjadikannya pilihan yang layak untuk aplikasi ringan hingga menengah [17], [20]. Serat daun jagung juga menjadi pilihan yang menarik karena berasal dari limbah pertanian, memiliki struktur selulosa-hemiselulosa yang relatif stabil dengan densitas rendah, sehingga dari sisi ekonomi dan lingkungan memiliki potensi yang baik [22]. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serat jagung pada matriks polimer dapat meningkatkan ketangguhan dan ketahanan terhadap retak, terutama bila serat diberi perlakuan dan didistribusikan secara homogen [22], [23]. Serat ijuk (*Arenga pinnata*) dipertimbangkan karena karakteristik mekanik dan termalnya yang lebih baik dibanding banyak serat daun tropis lainnya. Kajian menunjukkan bahwa serat ini memiliki ketahanan terhadap kelembaban dan suhu tinggi yang membuatnya cocok untuk lingkungan luar ruangan seperti bilah turbin angin yang terkena paparan lingkungan secara langsung [17], [24], [25]. Dengan demikian, serat ijuk menjadi kandidat potensial untuk aplikasi penguatan komposit struktural. Untuk memastikan kualitas eksperimen, semua serat dikeringkan terlebih dahulu guna menurunkan kadar air, kemudian dipotong dengan panjang seragam sesuai ukuran spesimen uji impact yang akan dibuat. Serat kemudian dicampur ke dalam matriks resin dengan distribusi homogen, dan kemudian dilakukan proses curing hingga kesetabilan mekanik tercapai. Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji impact model GT-7045 dengan nomor seri 8400974, yang berada di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, penggunaan alat ini menjamin data ketangguhan impact yang diperoleh berasal dari instrumen terkalibrasi [23]. Mesin uji ini bekerja dengan prinsip pendulum yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu untuk memberikan tumbukan pada spesimen uji, kemudian energi serapan dihitung berdasarkan perubahan posisi pendulum pascatumbukan. Prinsip ini sesuai dengan pengujian impact Charpy, yang banyak digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan material komposit. Gambar 1 memperlihatkan tampilan mesin uji impact yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1 Mesin uji impact model GT-7045 di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung (dokumentasi penulis).

Dengan demikian, pemilihan ketiga jenis serat ini menggabungkan prinsip keberlanjutan, potensi lokal, dan ekspektasi performa mekanik yang memadai, sehingga mendasari pengembangan material alternatif penguat komposit untuk aplikasi energi terbarukan seperti bilah turbin angin.

#### **Metode**

Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium untuk mengkarakterisasi sifat ketangguhan impact dari komposit berbasis serat alam. Hipotesis utama dalam penelitian ini adalah bahwa variasi jenis serat alam, yakni serat ijuk (*Arenga pinnata*), serat daun nanas (*Ananas comosus*), dan serat daun jagung (*Zea mays*) akan menghasilkan perbedaan nilai energi serap impact, meskipun digunakan pada fraksi volume serat yang serupa. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung menggunakan mesin uji impact model GT-7045. Bahan pengikat komposit menggunakan resin poliester tak jenuh sebagai matriks dan metil etil keton peroksida (MEKP) sebagai katalis. Fraksi volume serat ditetapkan sebesar 5% terhadap total massa komposit, dengan berat serat untuk masing-masing jenis adalah 0,13 gram untuk serat ijuk, 0,12 gram untuk serat daun nanas, dan 0,12 gram untuk serat daun jagung. Sementara itu, berat resin yang digunakan adalah 2,70 gram dan katalis sebanyak 0,03 gram untuk setiap spesimen. Pemilihan komposisi ini didasarkan pada studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa fraksi serat rendah mampu memberikan ikatan matriks-serat yang lebih homogen pada pengujian ketangguhan impact.

Sebelum proses fabrikasi, serat mengalami tahap persiapan yang meliputi pembersihan dari kotoran, pemotongan sesuai panjang cetakan, dan perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH 5% selama dua jam untuk menghilangkan sebagian lignin dan hemiselulosa. Perlakuan ini bertujuan meningkatkan kekasaran permukaan serat serta memperbaiki ikatan antarmuka serat-resin [6]. Selanjutnya serat dibilas hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk menghindari kelembapan berlebih yang dapat mempengaruhi proses impregnasi resin. Proses fabrikasi komposit dilakukan dengan metode hand lay-up. Resin dan katalis dicampur secara merata, kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang telah diisi serat. Cetakan dibiarkan mengeras pada suhu ruang selama 24 jam hingga mencapai kondisi curing awal, lalu dilakukan post-curing selama dua jam untuk memastikan kestabilan mekanik komposit. Setiap jenis serat dibuat tiga spesimen sebagai replikasi untuk memperoleh data yang representatif dan mengurangi bias eksperimen.

Dimensi spesimen uji impact dibuat mengacu pada standar ASTM D256 untuk pengujian impact metode Charpy dengan ukuran panjang 63,5 mm, lebar 12,7 mm, dan tebal 3 mm. Setelah proses pencetakan, setiap spesimen diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat cacat seperti void, retak, atau ketidakteraturan distribusi serat. Pengujian impact dilakukan menggunakan mesin uji impact GT-7045 (No. seri 8400974) di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Mesin ini bekerja dengan prinsip pendulum yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu untuk memberikan tumbukan pada spesimen, sehingga energi serapan dapat dihitung dari perbedaan posisi sudut pendulum sebelum dan sesudah tumbukan. Seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi suhu ruang dengan memperhatikan prosedur standar ASTM D256. Data energi serap impact yang diperoleh kemudian diolah untuk menghitung nilai impact strength (Joule/m<sup>2</sup>) untuk setiap variasi jenis serat. Data ini selanjutnya dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi pengaruh jenis serat terhadap ketangguhan impact komposit.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Rasio Komposisi

Rasio komposisi komposit dalam penelitian ini ditetapkan dengan fraksi volume serat sebesar 5% dan resin poliester tak jenuh sebesar 95%. Penetapan rasio ini dilakukan untuk memastikan konsistensi proporsi material pada setiap variasi jenis serat sehingga hasil pengujian impact dapat dibandingkan secara objektif. Rincian komposisi bahan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rasio Komposisi Komposit Uji Impact

Jenis Serat	Fraksi Volume Serat (%)	Massa Serat (g)	Massa Resin (g)	Massa Katalis (g)
Serat Ijuk	5	0,13	2,70	0,03
Serat Daun Jagung	5	0,12	2,70	0,03
Serat Daun Nanas	5	0,12	2,70	0,03

Perbedaan massa serat antar variasi, terutama serat ijuk yang memiliki massa 0,13 g dibandingkan serat daun jagung dan nanas sebesar 0,12 g, disebabkan oleh perbedaan massa jenis (densitas) serat. Dalam penelitian ini digunakan nilai densitas serat ijuk sebesar 1,136 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan densitas serat daun jagung dan nanas memiliki nilai yang sama, yaitu 1,07 g/cm<sup>3</sup>. Dengan fraksi volume yang sama, serat dengan densitas lebih tinggi memerlukan massa yang lebih besar agar mencakup volume serat yang sama dalam komposit. Fenomena ini konsisten dengan prinsip dasar penentuan komposisi volume dalam material komposit, di mana densitas penguat dan matriks sangat memengaruhi jumlah massa yang dibutuhkan untuk mencapai volume fraksi tertentu [6], [7], [20]. Sebagai ilustrasi, dalam komposit berbasis serat alam secara umum, densitas serat merupakan parameter penting yang menentukan berat total struktur dan distribusi berat komponen [1], [4]. Dalam beberapa tinjauan literatur, salah satu keunggulan utama serat alam dibandingkan serat sintesis seperti serat kaca adalah densitasnya yang lebih rendah, sehingga dapat meningkatkan efisiensi struktural secara keseluruhan [6], [9]. Dengan penyesuaian massa berdasarkan perbedaan densitas ini, setiap variasi serat benar-benar mewakili fraksi volume 5% yang ditetapkan. Oleh karena itu, perbandingan sifat ketangguhan impact antar komposit serat ijuk, serat daun nanas, dan serat daun jagung dapat dilakukan secara lebih objektif dan valid.

### Pengujian Impact

Setelah proses fabrikasi spesimen selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian ketangguhan impact untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menyerap energi tumbukan. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jenis serat alam terhadap energi serap impact komposit pada kondisi perlakuan serat dan fraksi volume yang terstandarisasi. Setiap jenis serat mengalami perlakuan perendaman alkali selama 2 jam, dengan fraksi volume komposit 95:5 (resin:serat). Kondisi ini ditetapkan agar perbandingan sifat mekanik antar jenis serat dapat dilakukan secara objektif dan valid, tanpa adanya variabel bebas lain yang mengganggu hasil pengujian. Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji impact model GT-7045 dengan metode Charpy, di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Setiap variasi serat diuji sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif. Hasil pengujian ketangguhan impact ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Data Hasil Pengujian Impak Komposit

Jenis Serat	Pengujian Impak (kJ/m <sup>2</sup> )			Rata-rata (kJ/m <sup>2</sup> )
	1	2	3	
Serat Ijuk	25,8	25,8	22,9	24,83
Serat Daun Jagung	13,5	13,5	10,5	12,5
Serat Daun Nanas	25,8	22,9	22,9	23,86

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, terlihat bahwa komposit dengan serat ijuk memiliki nilai ketangguhan impact tertinggi, yaitu 24,83 kJ/m<sup>2</sup>, diikuti oleh serat daun nanas dengan 23,86 kJ/m<sup>2</sup>, dan serat daun jagung dengan 12,50 kJ/m<sup>2</sup>. Perbedaan nilai ketangguhan ini menunjukkan bahwa jenis serat alam memberikan pengaruh signifikan terhadap kemampuan komposit dalam menyerap energi tumbukan. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui karakteristik intrinsik serat yang berbeda, seperti kandungan selulosa, lignin, hemiselulosa, serta struktur mikrofibril dan densitas serat. Serat ijuk memiliki struktur yang relatif kaku, ketahanan mekanik tinggi, dan kandungan lignoselulosa yang cukup besar, sehingga mampu menahan dan menyebarkan energi tumbukan dengan lebih baik [12], [17], [19], [23]. Serat daun nanas juga menunjukkan performa yang baik karena memiliki kandungan selulosa tinggi dan permukaan serat yang halus, yang mendukung ikatan antarmuka serat-resin yang kuat [20], [22]. Sebaliknya, serat daun jagung menunjukkan nilai ketangguhan terendah, yang mengindikasikan bahwa serat ini memiliki resistansi lebih rendah terhadap gaya tumbukan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh struktur serat yang lebih rapuh dan ikatan antarmuka yang kurang optimal dibandingkan dua jenis serat lainnya. Walaupun demikian, serat jagung tetap memiliki potensi sebagai penguat komposit non-struktural karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya produksi yang rendah. Adapun proses pengujian impact di Laboratorium Material Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 Dokumentasi pengujian impact menggunakan mesin GT-7045 (dokumentasi penulis)

Secara umum, perbedaan ketangguhan impact yang dihasilkan oleh tiga jenis serat ini sejalan dengan temuan berbagai penelitian terdahulu, yang menyebutkan bahwa sifat mekanik komposit sangat dipengaruhi oleh jenis dan karakteristik serat penguat [6], [9], [19]. Serat dengan kandungan selulosa tinggi dan struktur serat yang padat umumnya memberikan ketangguhan impact yang lebih besar dibandingkan serat dengan struktur rapuh. Temuan ini mengindikasikan bahwa serat ijuk dan nanas berpotensi lebih besar untuk diaplikasikan pada komponen struktural ringan, seperti bilah turbin angin skala kecil dan menengah, sedangkan serat jagung lebih cocok untuk aplikasi non-struktural. Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap perbedaan ketangguhan impact dari ketiga jenis serat alam yang digunakan (ijuk, daun nanas, dan daun jagung), dilakukan uji statistik One-Way ANOVA menggunakan perangkat lunak Minitab. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menguji hipotesis apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata kekuatan impact dari ketiga jenis serat tersebut. Metode ini dipilih karena sesuai untuk membandingkan rata-rata dari lebih dari dua kelompok perlakuan pada satu variabel respon, yaitu ketangguhan impact komposit. Hasil perhitungan One-Way ANOVA menggunakan aplikasi minitab dapat dilihat pada gambar 3.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Serat	2	282,25	141,125	49,19	0,000
Error	6	17,21	2,869		
Total	8	299,46			

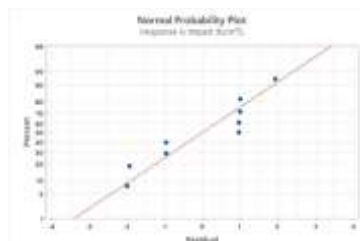
Gambar 3 Hasil uji ANOVA One-Way ketangguhan impact komposit serat alam menggunakan Minitab

Berdasarkan hasil perhitungan statistik (Tabel ANOVA), diperoleh nilai F-value sebesar 49,19 dengan P-value 0,000. Karena nilai P lebih kecil dari tingkat signifikansi yang umum digunakan ( $\alpha = 0,05$ ), maka dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara nilai ketangguhan impact ketiga jenis serat. Hasil ini mendukung hipotesis awal penelitian bahwa perbedaan jenis serat alam memberikan pengaruh nyata terhadap sifat mekanik komposit, khususnya ketangguhan impact. Selain itu untuk memperjelas perbedaan antar kelompok, digunakan grafik Individual Value Plot yang menggambarkan distribusi nilai impact setiap jenis serat. Grafik ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Individual Value Plot ketangguhan impact komposit serat alam.

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa nilai impact tertinggi diperoleh pada komposit dengan serat ijuk (rata-rata 24,83 kJ/m<sup>2</sup>), diikuti oleh serat daun nanas (23,86 kJ/m<sup>2</sup>), sedangkan serat daun jagung menunjukkan nilai paling rendah (12,50 kJ/m<sup>2</sup>). Pola sebaran data menunjukkan jarak yang cukup besar antara serat ijuk dan jagung, yang memperkuat hasil uji ANOVA bahwa perbedaan tersebut signifikan. Nilai tinggi pada serat ijuk dapat dikaitkan dengan densitas dan struktur mikrofibril yang lebih baik dalam menyerap energi tumbukan, sedangkan nilai rendah pada serat jagung kemungkinan akibat ikatan antarmuka yang kurang optimal. Kemudian salah satu asumsi penting dalam ANOVA adalah normalitas data. Oleh karena itu, dilakukan pengecekan menggunakan Normal Probability Plot untuk memastikan bahwa residual menyebar normal. Grafik ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Normal Probability Plot residual uji ANOVA.

Dari Gambar 5, terlihat bahwa titik-titik residual cenderung mengikuti garis diagonal, yang mengindikasikan bahwa data berdistribusi normal. Hal ini berarti asumsi normalitas terpenuhi, sehingga hasil uji ANOVA valid untuk dijadikan dasar pengambilan kesimpulan statistik. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa jenis serat alam berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik komposit, khususnya terhadap ketangguhan impact. Komposit dengan penguat serat ijuk menunjukkan performa paling tinggi dengan rata-rata ketangguhan impact sebesar 24,83 kJ/m<sup>2</sup>, diikuti oleh serat daun nanas dengan nilai 23,86 kJ/m<sup>2</sup>, sedangkan serat daun jagung memberikan nilai terendah sebesar 12,50 kJ/m<sup>2</sup>. Perbedaan ini terutama dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia serat, seperti densitas, kandungan selulosa, dan kemampuan menyerap energi tumbukan.

Analisis statistik menggunakan uji One-Way ANOVA memperkuat temuan ini dengan menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar ketiga kelompok serat ( $P\text{-value} = 0,000 < 0,05$ ). Visualisasi melalui grafik Individual Value Plot memperlihatkan perbedaan rata-rata nilai impact secara jelas, sedangkan uji asumsi normalitas melalui Normal Probability Plot menunjukkan bahwa data memenuhi asumsi distribusi normal. Dengan demikian, serat ijuk dapat dikatakan sebagai material penguat komposit yang paling potensial dibandingkan dua jenis serat lainnya pada fraksi volume 5%. Hasil penelitian ini menunjukkan peluang besar pemanfaatan serat alam lokal sebagai penguat komposit untuk aplikasi struktural, termasuk bilah turbin angin, sehingga mendukung pengembangan material yang lebih berkelanjutan, ringan, dan ramah lingkungan. Temuan ini juga menjadi dasar penting untuk penelitian lanjutan yang dapat mengeksplorasi pengaruh perlakuan serat, fraksi volume yang berbeda, serta metode fabrikasi yang lebih variatif untuk meningkatkan performa mekanik komposit secara optimal.

## PENUTUP

Penelitian ini membuktikan bahwa jenis serat alam memberikan pengaruh signifikan terhadap ketangguhan impact komposit polimer. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan mesin uji impact model GT-7045 dan analisis statistik One-Way ANOVA, diperoleh nilai P-value sebesar 0,000 yang lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan nyata pada ketangguhan impact antar ketiga jenis serat yang diuji. Komposit dengan serat ijuk memiliki nilai ketangguhan impact tertinggi sebesar 24,83 kJ/m<sup>2</sup>, diikuti oleh serat daun nanas sebesar 23,86 kJ/m<sup>2</sup>, sedangkan serat daun jagung menunjukkan nilai terendah sebesar 12,50 kJ/m<sup>2</sup>. Perbedaan ini erat kaitannya dengan sifat fisis dan kimiawi masing-masing serat, termasuk densitas, kandungan selulosa, lignin, serta struktur mikrofibril yang memengaruhi kemampuan serat dalam menyerap energi tumbukan. Hasil ini mengindikasikan bahwa serat ijuk dan serat daun nanas memiliki potensi lebih baik sebagai penguat komposit dibandingkan serat daun jagung pada kondisi fraksi volume serat 5% dan perlakuan alkali selama dua jam.

#### DAFTAR RUJUKAN

- [1] K. Pender, K. Bacharoudis, F. Romoli, P. Greaves, and J. Fuller, "Feasibility of Natural Fibre Usage for Wind Turbine Blade Components: A Structural and Environmental Assessment," *Sustain.*, vol. 16, no. 13, 2024, doi: 10.3390/su16135533.
- [2] R. El Alaoui, H. Mounir, A. El Marjani, and B. El Mostapha, "Investigation and analysis of static and dynamic behaviour of a new natural composite material of a wind turbine blade using the finite element method," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 363–373, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i1.8657.g7617.
- [3] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. Sørensen, "Materials for wind turbine blades: An overview," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, pp. 1–24, 2017, doi: 10.3390/ma10111285.
- [4] B. O. Samuel, M. Sumaila, and B. Dan-Asabe, "Physical and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites With Potentials for Wind Turbine Blade Applications: a Review," *J. Mek.*, vol. 45, no. December, pp. 1–14, 2022, doi: 10.11113/jm.v45.450.
- [5] R. Koundal, R. Khanduja, A. Sharma, and K. Singh, "A Review of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite Chemical, Physical, and Thermo-Mechanical Properties," *J. Fibers Polym. Compos.*, vol. 2, no. 2, pp. 67–80, 2023, doi: 10.55043/jfpc.v2i2.73.
- [6] S. H. Kamarudin et al., "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, pp. 1–36, 2022, doi: 10.3390/polym14173698.
- [7] R. Ramful, "Mechanical performance and durability attributes of biodegradable natural fibre-reinforced composites—a review," *J. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 19, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s40712-024-00198-0.
- [8] M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 86, no. 1, pp. 1–18, 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.04.043.
- [9] A. M. Seid and S. A. Adimass, "Review on the impact behavior of natural fiber epoxy based composites," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, p. e39116, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39116.
- [10] M. Şimşek, "Some closed-form solutions for static, buckling, free and forced vibration of functionally graded (FG) nanobeams using nonlocal strain gradient theory," *Compos. Struct.*, vol. 224, no. April, p. 111041, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111041.
- [11] T. K. Khieng, S. Debnath, E. Ting Chaw Liang, M. Anwar, A. Pramanik, and A. K. Basak, "A review on mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites under various strain rates," *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 5, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/jcs5050130.
- [12] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, "Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00096-4.
- [13] Crodita Bangkit Wiranegara, X. Salahudin, and S. Hastuti, "Pemanfaatan Serat Alam Dan Serat Sintetis Sebagai Material Bilah Horizontal Axis Wind Turbine," *J. Foundry*, vol. 5, no. 2, pp. 30–37, 2022, doi: 10.62944/jf.v5i2.57.
- [14] Z. Wang et al., "Hierarchical cerium oxide anchored multi-walled carbon nanotube hybrid with synergistic effect for microwave attenuation," *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, no. March, pp. 477–486, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.018.

- [15] B. Il Noh and S. C. Yang, “Polymer conformation-dependent piezoelectric properties and self-bias magnetoelectric responses in adhesive-free laminate composites of Ni-foam/PVDF/Ni-foam,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 1266–1274, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.030.
- [16] O. M. Ionescu et al., “New Hyaluronic Acid/Polyethylene Oxide-Based Electrospun Biological Evaluation,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, p. 1291, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym13081291%0AAcademic>
- [17] D. A. Sumarsono et al., “Preliminary study to determine the maximum safe speed of vehicles based on rolling moments and vehicle skid to reduce of driving accidents,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/909/1/012017.
- [18] H. S. Joseph, T. Pachiappan, S. Avudaiappan, and E. I. S. Flores, “A Study on Mechanical and Microstructural Characteristics of Concrete Using Recycled Aggregate,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/ma15217535.
- [19] M. Y. Khalid, A. Al Rashid, Z. U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad, and A. A. Zaidi, “Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications,” *Results Eng.*, vol. 11, no. July, p. 100263, 2021, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100263.
- [20] M. R. M. Huzaifah, S. M. Sapuan, Z. Leman, and M. R. Ishak, “Comparative study on chemical composition, physical, tensile, and thermal properties of sugar palm fiber (*Arenga pinnata*) obtained from different geographical locations,” *BioResources*, vol. 12, no. 4, pp. 9366–9382, 2017, doi: 10.15376/biores.12.4.9366-9382.
- [21] K. L. Edwards, E. Axinte, and L. L. Tabacaru, “A critical study of the emergence of glass and glassy metals as ‘green’ materials,” *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 713–723, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.070.
- [22] Z. Wahid, M. K. A. M. Ariffin, B. T. H. T. Baharudin, M. I. S. Ismail, and F. Mustapha, “ABAQUS Simulation of Different Critical Porosities Cubical Scaffold Model,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 530, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/530/1/012018.
- [23] K. S. Chun, T. Maimunah, C. M. Yeng, T. K. Yeow, and O. T. Kiat, “Properties of Corn Husk Fibre Reinforced Epoxy Composites Fabricated Using Vacuum-assisted Resin Infusion,” *J. Phys. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 17–31, 2020, doi: 10.21315/jps2020.31.3.2.
- [24] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [25] P. Osaimany, A. S. Samuel, Y. Johnbosco, Y. P. Kharwar, and V. Chakravarthy, “A study of synergistic effect on oxygen reduction activity and capacitive performance of NiCo2O4/rGO hybrid catalyst for rechargeable metal-air batteries and supercapacitor applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 176, no. July, p. 107327, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107327.