

Pengaruh Panjang Serat Pelepah Kelapa Sawit dan Persentase Serbuk Cangkang Telur terhadap Kekuatan Impak Komposit Bermatriks Polyester

Aidil Pratama¹, Juanda¹, Ilham Ary Wahyudie¹, Sukanto¹, Amril Reza¹

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail: aidilsmc25@gmail.com

Received: 4 Agustus 2026; Received in revised form: 6 Agustus 2026; Accepted: 6 Agustus 2026

Abstract

Utilising oil palm frond fibre and eggshell powder provides an opportunity to convert plantation and food waste into functional composite constituents. This study examined the effects of fibre length and eggshell-powder content on the Charpy impact strength of a polyester-matrix composite. A 3×3 full-factorial design was applied using fibre lengths of 60, 70, and 80 mm and eggshell-powder contents of 3, 6, and 9 wt.%. Three specimens were prepared for each combination by hand lay-up, giving 27 specimens, and were tested with reference to ISO 179-1. The highest mean impact strength was 50.72 kJ/m² for the 80 mm–9% combination, whereas the lowest was 15.52 kJ/m² for the 80 mm–6% combination. Two-way ANOVA indicated significant effects of fibre length, eggshell-powder content, and their interaction ($p < 0.001$). The interaction confirms that a longer fibre does not automatically improve impact strength unless it is accompanied by an appropriate filler content. The investigated composite is therefore positioned as an initial candidate for car bumper components.

Keywords: car bumper; eggshell powder; factorial design; impact strength; polyester composite

Abstrak

Pemanfaatan serat pelepah kelapa sawit dan serbuk cangkang telur membuka peluang untuk mengolah limbah perkebunan dan pangan menjadi unsur penyusun komposit yang bernilai guna. Penelitian ini mengkaji pengaruh panjang serat dan persentase serbuk cangkang telur terhadap kekuatan impak komposit bermatriks poliester. Rancangan faktorial penuh 3×3 diterapkan dengan panjang serat 60, 70, dan 80 mm serta persentase serbuk cangkang telur 3%, 6%, dan 9%. Setiap kombinasi dibuat tiga spesimen menggunakan metode hand lay-up sehingga diperoleh 27 spesimen, kemudian diuji impak Charpy dengan mengacu pada ISO 179-1. Nilai rata-rata tertinggi sebesar 50,72 kJ/m² diperoleh pada kombinasi serat 80 mm dan serbuk cangkang telur 9%, sedangkan nilai terendah 15,52 kJ/m² terdapat pada kombinasi serat 80 mm dan filler 6%. ANOVA dua arah menunjukkan bahwa panjang serat, persentase filler, dan interaksi keduanya berpengaruh signifikan ($p < 0,001$). Interaksi tersebut menegaskan bahwa penambahan panjang serat tidak selalu meningkatkan ketahanan impak tanpa kadar filler yang sesuai. Komposit ini lebih tepat diposisikan sebagai kandidat awal material komponen otomotif bumper mobil.

Kata kunci: bumper mobil; desain faktorial; kekuatan impak; komposit poliester; serbuk cangkang.

1. PENDAHULUAN

Pengembangan komposit berbasis sumber daya terbarukan semakin diarahkan pada pemanfaatan residu yang mudah diperoleh dan belum bernilai tinggi. Dalam konteks ini, limbah cangkang telur dapat berperan sebagai campuran penguat,

sedangkan serat tanaman dapat dimanfaatkan sebagai penguat. Pendekatan tersebut tidak serta-merta menjadikan komposit lebih kuat, karena kinerja akhir tetap ditentukan oleh kecocokan matriks, bentuk penguat, kadar campuran penguat, dan mutu ikatan antarmuka. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa serbuk cangkang telur

mampu memodifikasi sifat mekanik komposit [3]. Peningkatan tersebut cenderung muncul pada kadar tertentu dan dapat menurun ketika partikel menggumpal atau ikatan dengan matriks kurang baik [1].

Cangkang telur didominasi senyawa berbasis kalsium karbonat [6]. Dalam matriks polimer, partikel tersebut dapat mengisi sebagian ruang kosong dan mengubah jalur perambatan retak. Akan tetapi, campuran penguat yang tidak terdispersi merata juga dapat membentuk titik konsentrasi tegangan. Sivakumar dkk. memperoleh peningkatan sifat dampak pada kadar serbuk cangkang telur optimum [1]. Studi lain menekankan bahwa keberhasilan ini dipengaruhi oleh distribusi partikel, kondisi curing, dan kualitas ikatan matriks–filler [2]. Dengan demikian, persentase campuran penguat perlu ditentukan melalui pengujian, bukan diasumsikan meningkat secara linier.

Di sisi lain, pelepah kelapa sawit tersedia sebagai biomassa perkebunan dan mengandung serat lignoselulosa yang dapat digunakan sebagai penguat. Penelitian Perdana dkk. memperlihatkan bahwa perubahan panjang serat pelepah sawit berkaitan dengan perubahan ketangguhan dampak dan kekuatan tarik komposit [4]. Hasil Fynnisa dkk. juga menunjukkan bahwa panjang serat memengaruhi sifat fisik serta mekanik biokomposit berbasis *polyester* [5].

Secara mekanis, serat yang cukup panjang memberi area kontak lebih besar untuk meneruskan beban, menahan pembukaan retak, dan memerlukan energi lebih besar untuk terlepas dari matriks. Namun, keuntungan tersebut dapat hilang ketika pembasahan tidak sempurna, serat saling bertumpuk, atau terbentuk rongga.

Penelitian bertujuan menentukan pengaruh panjang serat pelepah kelapa sawit dan persentase serbuk cangkang telur terhadap kekuatan dampak komposit poliester, mengidentifikasi kombinasi dengan respons tertinggi, serta menilai apakah pengaruh panjang serat bergantung pada kadar serbuk.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Rancangan eksperimen

Penelitian menggunakan rancangan faktorial penuh dua faktor. Faktor A adalah panjang serat pelepah kelapa sawit pada tiga level, yaitu 60 mm (A1), 70 mm (A2), dan 80 mm (A3). Faktor B adalah persentase serbuk cangkang telur pada level 3% (B1), 6% (B2), dan 9% (B3). Seluruh kombinasi faktor dibuat sebanyak tiga pengulangan sehingga jumlah spesimen mencapai 27. Rancangan seimbang ini memungkinkan pengujian pengaruh utama dan interaksi antarfaktor melalui ANOVA dua arah [9].

Tabel 1. Rancangan Faktorial Penelitian

Perlakuan	Panjang serat	SCT	Spesimen
A1B1	60 mm	3%	3
A1B2	60 mm	6%	3
A1B3	60 mm	9%	3
A2B1	70 mm	3%	3
A2B2	70 mm	6%	3
A2B3	70 mm	9%	3
A3B1	80 mm	3%	3
A3B2	80 mm	6%	3
A3B3	80 mm	9%	3

2.2. Bahan dan peralatan

Matriks yang digunakan adalah resin poliester dengan katalis sebagai pengeras. Serat diperoleh dari pelepah kelapa sawit yang masih hijau, kemudian dipisahkan, dibersihkan, dan dikeringkan. Cangkang telur

ayam broiler dibersihkan, dikeringkan, serta dihaluskan menjadi serbuk. Larutan NaOH 5% digunakan untuk perlakuan awal serat. Peralatan utama terdiri atas cetakan spesimen, timbangan digital, wadah dan pengaduk pencampur, alat pemotong serat, jangka sorong, serta mesin uji dampak Charpy.



Gambar 1. Serat Pelepah Kelapa Sawit Setelah Pemisahan Dan Pengeringan



Gambar 2. Serbuk Cangkang Telur Sebagai Bahan Pengisi

2.3. Pembuatan spesimen

Serat yang telah kering dipotong sesuai level 60, 70, dan 80 mm. Selanjutnya, serat direndam dalam larutan NaOH 5% selama satu jam, dicuci hingga bersih, lalu dikeringkan kembali. Tahap ini dimaksudkan untuk membersihkan pengotor pada permukaan serat dan membantu proses pembasahan oleh matriks. Cangkang telur yang telah menjadi serbuk ditimbang sesuai persentase 3%, 6%, atau 9%, kemudian dicampurkan ke dalam resin sebelum katalis ditambahkan.

Komposit dibuat dengan metode *hand lay-up*. Serat ditempatkan dalam cetakan sesuai kelompok perlakuan, kemudian campuran resin, serbuk cangkang telur, dan katalis dituangkan serta diratakan. Setelah curing, komposit dilepaskan dari cetakan, dipotong menjadi spesimen uji, diperiksa secara visual, dan diberi kode A1B1 sampai A3B3. Tiga spesimen disiapkan untuk setiap kombinasi agar variasi hasil antarulangan dapat diamati.



Gambar 3. Spesimen komposit yang digunakan pada pengujian impak

2.4. Pengujian impak dan analisis data

Pengujian dilakukan menggunakan metode Charpy dengan mengacu pada ISO 179-1 [8]. Spesimen diletakkan secara horizontal pada dua tumpuan, kemudian pendulum dilepaskan untuk menumbuk bagian tengah spesimen. Energi yang terserap diperoleh dari perbedaan energi potensial pendulum sebelum dan setelah tumbukan. Nilai kekuatan impak dihitung dengan membagi energi serap terhadap luas penampang pada daerah tumbukan.

$$E = m g (h_1 - h_2) \dots \dots \dots (1)$$

$$H_i = E / A \dots \dots \dots (2)$$

Pada Persamaan (1), E adalah energi yang diserap spesimen (J), m adalah massa pendulum (kg), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), sedangkan h_1 dan h_2 menyatakan ketinggian pendulum sebelum dan setelah tumbukan (m). Pada Persamaan (2), H_i merupakan kekuatan impak (kJ/m^2) dan A adalah luas penampang spesimen pada daerah tumbukan (m^2).



Gambar 4. Penempatan Spesimen Pada Mesin Uji Impak Charpy

Data dianalisis menggunakan ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5%. Hipotesis nol menyatakan bahwa faktor atau interaksi tidak memberikan perubahan respons, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh. Faktor dinilai signifikan apabila p-value lebih kecil dari 0,05. Karena rancangan eksperimen seimbang, perbandingan besarnya F hitung juga digunakan untuk melihat faktor yang paling dominan terhadap variasi data [9].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil pengujian impak

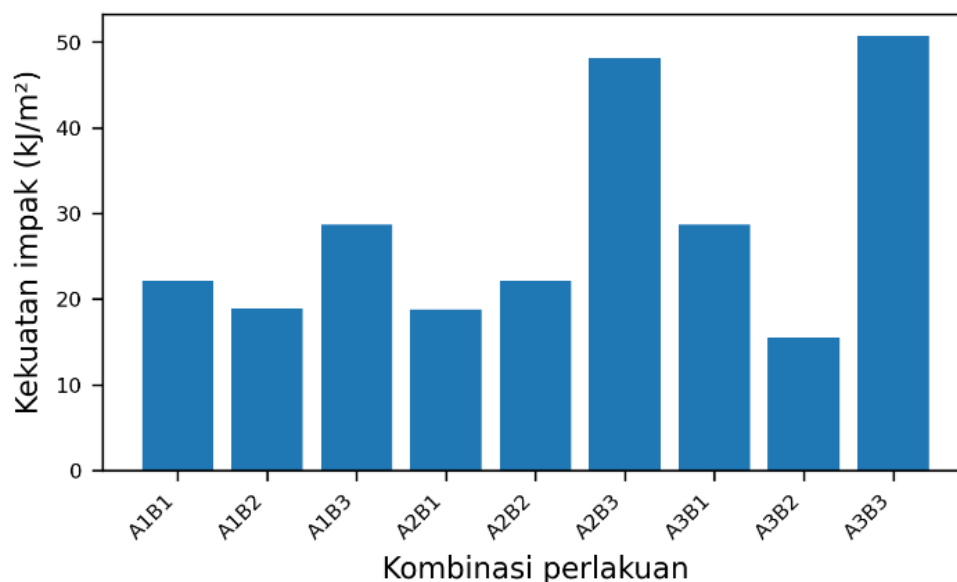
Hasil pengujian 27 spesimen disajikan pada Tabel 2. Rentang rata-rata yang diperoleh cukup lebar, yaitu 15,52–50,72 kJ/m^2 . Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons impak tidak hanya berubah karena satu faktor, tetapi juga karena pasangan panjang serat dan persentase serbuk yang digunakan.

Tabel 2. Kekuatan Impak Setiap Kombinasi Perlakuan (kJ/m^2)

Perlakuan	U1	U2	U3	Rerata
A1B1	20,93	24,37	20,93	22,08
A1B2	17,81	17,81	20,93	18,85
A1B3	27,50	30,93	27,50	28,64
A2B1	20,93	14,37	20,93	18,74
A2B2	24,37	20,93	20,93	22,08
A2B3	45,62	49,37	49,37	48,12
A3B1	30,93	27,50	27,50	28,64
A3B2	17,81	14,37	14,37	15,52
A3B3	49,37	53,43	49,37	50,72

Kombinasi A3B3 menghasilkan rata-rata tertinggi, yaitu $50,72 \text{ kJ/m}^2$, diikuti A2B3 sebesar $48,12 \text{ kJ/m}^2$. Kedua kombinasi tersebut sama-sama menggunakan serbuk cangkang telur 9%, tetapi memiliki panjang serat 80 dan 70 mm. Sebaliknya, A3B2 menghasilkan rata-rata terendah sebesar

$15,52 \text{ kJ/m}^2$. Pola ini memperlihatkan bahwa serat 80 mm dapat memberikan respons tertinggi sekaligus terendah, bergantung pada persentase serbuk. Oleh sebab itu, kesimpulan bahwa serat yang lebih panjang selalu menghasilkan kekuatan impact lebih tinggi tidak didukung oleh seluruh data.



Gambar 5. Rata-rata kekuatan impact pada sembilan kombinasi perlakuan

3.2. Pengaruh panjang serat

Jika dirata-ratakan terhadap seluruh level campuran penguat, kekuatan impact meningkat dari $23,19 \text{ kJ/m}^2$ pada serat 60 mm menjadi $29,65 \text{ kJ/m}^2$ pada serat 70 mm dan $31,63 \text{ kJ/m}^2$ pada serat 80 mm. Hal ini terjadi karena serat berfungsi untuk menahan beban sekaligus menghambat jalurnya retakan. Semakin panjang serat yang digunakan, area kontakannya jadi lebih luas, sehingga butuh energi yang lebih besar untuk menarik serat tersebut keluar dari matriksnya [7]. Temuan pada komposit pelepah sawit sebelumnya

juga menunjukkan bahwa panjang serat dapat meningkatkan respons impact sampai kondisi tertentu [5].

Walaupun nilai dari grafik tersebut cenderung naik, hasil pada spesimen dengan kode A3B2 menunjukkan bahwa panjang serat tidak bekerja sendirian. Serat yang terlalu panjang menyebabkan kondisi rentan bertumpuk sehingga membuat resin sulit meresap secara merata keseluruh permukaan. Dalam proses *hand lay-up*, kondisi ini sering terjadi sehingga menyisahkan *void* (rongga). Akibatnya Ketika spesimen menerima beban impact, cacat pada

area tersebut akan menjadi faktor awal munculnya retakan yang menghambat performa optimal serat.

3.3. Pengaruh serbuk cangkang telur

Rata-rata faktor serbuk cangkang telur menunjukkan nilai 23,15 kJ/m² pada 3%, turun menjadi 18,81 kJ/m² pada 6%, lalu meningkat tajam menjadi 42,50 kJ/m² pada 9%. Kadar 9% menghasilkan respons tertinggi pada seluruh level panjang serat, yaitu 28,64; 48,12; dan 50,72 kJ/m². Pada kondisi ini, partikel diduga membantu mengisi celah dalam matriks dan mengubah jalur retak sehingga energi tumbukan yang diperlukan untuk merusak spesimen bertambah.

Namun, penurunan pada kadar 6% memperlihatkan bahwa mekanisme campuran penguat tidak selalu membentuk tren linier. Beberapa penelitian terdahulu juga

melaporkan mengenai adanya titik kadar optimum tertentu [1]. Beberapa riset mengenai serbuk cangkang telur menunjukkan kalau kunci utamanya ada pada tingkat dispersi partikel dan seberapa kuat ikatan antarmukanya [6]. Penelitian pada komposit bermatriks *polyester* dan serbuk cangkang telur juga mencatat hal yang serupa. Komposisi campuran harus benar-benar dijaga, karena kalau partikelnya sampai menggumpal (*aglomerasi*), performa komposit justru bakal menurun. [10]. *Aglomerasi*, udara terperangkap, atau pencampuran yang tidak seragam dapat menghasilkan konsentrasi tegangan. Penjelasan ini masih bersifat mekanistik berdasarkan pola data dan pengamatan visual; konfirmasi langsung memerlukan karakterisasi permukaan patahan.

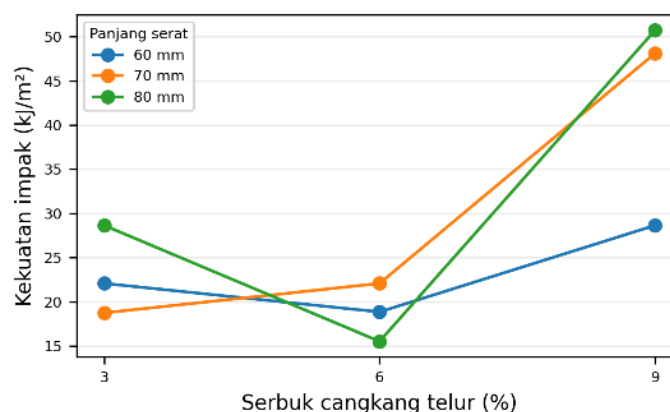
Tabel 3. Rata-rata Kekuatan Impak Berdasarkan Faktor

Faktor	Rata-rata (kJ/m ²)
Panjang serat 60 mm	23,19
Panjang serat 70 mm	29,65
Panjang serat 80 mm	31,63
Serbuk cangkang telur 3%	23,15
Serbuk cangkang telur 6%	18,81
Serbuk cangkang telur 9%	42,50

3.4. Interaksi faktor dan hasil ANOVA

Gambar 6 memperlihatkan garis respons yang tidak sejajar dan saling berubah arah. Pada filler 3%, serat 80 mm memberikan nilai tertinggi. Ketika filler dinaikkan menjadi 6%, kombinasi yang sama justru turun

menjadi nilai terendah. Pada 9%, respons serat 70 dan 80 mm meningkat jauh di atas serat 60 mm. Bentuk tersebut menunjukkan interaksi yang kuat: pengaruh panjang serat berubah mengikuti kadar serbuk cangkang telur.



Gambar 6. Plot Interaksi Panjang Serat Dan Persentase Serbuk Cangkang Telur

Tabel 4. Ringkasan ANOVA dua arah

Sumber variasi	db	F hitung	p-value
Panjang serat	2	64,215	<0,001
Serbuk cangkang telur	2	263,467	<0,001
Interaksi A × B	4	29,5	<0,001
Galat	18	–	–

ANOVA menunjukkan bahwa panjang serat, persentase serbuk cangkang telur, dan interaksi kedua faktor berpengaruh signifikan terhadap kekuatan impact. Faktor serbuk cangkang telur memiliki F hitung terbesar, sehingga menjadi sumber perubahan respons yang paling dominan dalam rentang eksperimen. Berdasarkan jumlah kuadrat data, kontribusi variasi serbuk cangkang telur mencapai sekitar 66,60%, interaksi 14,91%, panjang serat 16,23%, dan galat 2,28%. Nilai interaksi yang signifikan menguatkan bahwa pemilihan panjang serat harus dilakukan bersamaan dengan penetapan kadar campuran penguat.

3.5. Pengamatan visual dan implikasi untuk komponen otomotif

Meskipun kerusakan spesimen berpusat pada area tumbukan, bentuk patahan yang dihasilkan cukup bervariasi. Pada beberapa titik, serat masih tampak menjembatani bidang patah, sementara di titik lain terjadi pelepasan serat (*debonding/pull-out*) dari matriks. Ketidakteraturan ini mengindikasikan adanya variasi dalam pembasahan resin, sebaran serat, serta kemunculan cacat berupa *void* (rongga). Pada komposit serat alam, energi impact dapat diserap melalui retak matriks, *debonding* antarmuka, penarikan serat, dan putusannya serat [7]. Respons mekanik komposit serat alam terhadap pembebanan dinamis juga dipengaruhi oleh laju regangan dan efisiensi transfer tegangan antara serat dan matriks [11].

Nilai tertinggi A3B3 menunjukkan bahwa kombinasi serat 80 mm dan serbuk cangkang telur 9% merupakan komposisi terbaik di antara variasi yang diuji. Temuan tersebut relevan sebagai tahap penyaringan awal material yang membutuhkan kemampuan menyerap beban kejut. Kajian *crashworthiness* menunjukkan bahwa komposit serat alam berpotensi digunakan sebagai material penyerap energi pada kendaraan, tetapi kinerjanya tetap dipengaruhi oleh pemilihan material dan desain geometri struktur [12]. Meskipun demikian, hasil uji spesimen laboratorium

tidak dapat langsung disetarakan dengan kinerja bumper kendaraan. Bumper memiliki geometri, ketebalan, sambungan, kondisi temperatur, laju tumbukan, dan pola pembebanan yang lebih kompleks. Karena penelitian hanya mengevaluasi kekuatan impact, komposit ini lebih tepat disebut kandidat material alternatif untuk pengembangan komponen otomotif, bukan material bumper yang telah dinyatakan layak.

Supaya hasil eksperimen lebih konsisten di masa depan, kontrol pada proses pembuatan komposit harus diperketat. Hal ini mencakup perataan serat, pengadukan bahan penguat, pembuangan gelembung udara, hingga durasi *curing*. Penerapan pencetakan berbasis tekanan atau vakum dapat menjadi solusi untuk memperbesar area pembasahan, meski efektivitasnya wajib divalidasi kembali lewat uji mekanis dan analisis morfologi.

4. SIMPULAN

Panjang serat pelepah kelapa sawit, persentase serbuk cangkang telur, dan interaksi keduanya memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan impact komposit *polyester* ($p < 0,001$). Kombinasi terbaik pada rentang penelitian adalah serat 80 mm dan serbuk cangkang telur 9% dengan rata-rata 50,72 kJ/m², sedangkan kombinasi serat 80 mm dan serbuk cangkang telur 6% menghasilkan nilai terendah 15,52 kJ/m². Rata-rata faktor menunjukkan bahwa serat 80 mm dan serbuk cangkang telur 9% memberikan respons tertinggi, tetapi pola A3B2 membuktikan bahwa peningkatan panjang serat tidak otomatis memperbaiki ketahanan impact. Faktor serbuk cangkang telur menjadi sumber variasi paling dominan, sementara interaksi yang signifikan mengharuskan kedua faktor ditentukan secara bersamaan. Berdasarkan ruang lingkup pengujian, material ini dapat diposisikan sebagai kandidat awal komposit tahan kejut untuk pengembangan komponen otomotif, tetapi belum cukup untuk menyatakan kelayakannya sebagai bumper kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Sivakumar, S. Sankarapandian, S. Avudaiappan, and E. I. Saavedra Flores, "Mechanical behaviour and impact of various fibres embedded with eggshell powder epoxy resin biocomposite," *Materials*, vol. 15, no. 24, p. 9044, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15249044>.
- [2] S. Kowshik, S. Sharma, S. Rao, M. Shettar, and P. Hiremath, "Mechanical properties of post-cured eggshell-filled glass-fibre-reinforced polymer composites," *Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 2, p. 49, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7020049>.
- [3] B. Ashok Kumar, R. Saminathan, M. Tharwan, M. Vigneshwaran, P. Sekhar Babu, S. Ram, and P. Manoj Kumar, "Study on the mechanical properties of a hybrid polymer composite using eggshell powder based bio-filler," *Materials Today: Proceedings*, vol. 69, pp. 679–683, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.114>.
- [4] S. U. Perdana, S. Hastuti, and I. Taufik, "Sifat mekanik komposit serat pelepah kelapa sawit sebagai penguat komposit terhadap kekuatan tarik dan impak," *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 4, pp. 68–75, 2024, doi: <https://doi.org/10.55606/jtmei.v3i4.4329>.
- [5] F. Z. M. Hasanah, Rahmadsyah, T. J. Saktisahdan, A. H. Pane, and M. H. Tiannur, "Effect of palm frond fibre length on mechanical properties of bio composite with polyester resin," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 3, pp. 1494–1507, 2024, doi: <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i3.4369>.
- [6] S. S. Kamath and R. K. Chandrappa, "The eggshell as a filler in composite materials—A review," *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 335–340, 2020.
- [7] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- [8] International Organization for Standardization, *ISO 179-1: Plastics—Determination of Charpy Impact Properties—Part 1: Non-instrumented Impact Test*. Geneva, Switzerland: ISO, 2010.
- [9] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] O. Bani, A. Agarwal, Richard, and Heinrich, "Banana stem and chicken eggshells as a filler of polyester composites for particleboard application," *Discover Materials*, vol. 5, art. no. 110, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00297-5>.
- [11] T. K. Khieng, S. Debnath, E. T. C. Liang, M. Anwar, A. Pramanik, and A. K. Basak, "A review on mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites under various strain rates," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 5, art. no. 130, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs5050130>.
- [12] M. Capretti, G. Del Bianco, V. Giammaria, and S. Boria, "Natural fibre and hybrid composite thin-walled structures for automotive crashworthiness: A review," *Materials*, vol. 17, no. 10, art. no. 2246, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17102246>.