

## Pengaruh Kandungan Partikel Cangkang Telur Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Lentur Komposit Epoksi Setelah Paparan Panas

Anugrah Surya Arya Pranata<sup>1</sup>, Shofiatul Ula<sup>1</sup>, Iman Saefuloh<sup>1</sup>, Agung Sudrajad, A. Ali Alhamidi<sup>1</sup>, Sunardi Sunardi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon

\*E-mail : sunardi@untirta.ac.id

Received 23 Desember 2025; Received in revised form 6 Januari 2026; Accepted 11 Februari 2026

### Abstract

Heat exposure can influence the changes in hardness and flexural strength of composites made from eggshell particles and bamboo fibers. The composite samples were prepared through cold compaction at 5 MPa for 2 hours. The materials were combined based on the following volume fractions: 50% epoxy resin, 10% alumina, 10% graphite, 5% zinc oxide (ZnO), and a 25% mixture of eggshell particles and bamboo fibers. The composite samples were then heated to 200°C for 1 hour. The final step involved curing, which required heating the samples in an electric oven at 150°C for 1 hour. Using a weighting method, the composite containing 25% eggshell particles achieved the optimal result, with a multi response performance index (MRPI) of 42.43. This composite exhibited hardness, modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), and strain values of 70.24 Shore D, 37.65 MPa, 8.58 MPa, and 0.78%, respectively. Conversely, the sample with 25% bamboo fiber and no eggshell particles demonstrated the highest flexural strength at 12.06 MPa, while the sample containing 25% eggshell particles recorded the highest hardness of 70.24 Shore D.

**Keywords:** Bamboo fiber; Eggshell; Mechanical properties; Thermal exposure.

### Abstrak

Paparan panas dapat berpengaruh terhadap perubahan kekerasan dan kekuatan lentur komposit berbahan dasar partikel cangkang telur dan serat bambu. Pembuatan sampel komposit dilakukan dengan kompaksi dingin pada tekanan 5 MPa selama 2 jam. Bahan yang digunakan dihitung berdasarkan fraksi volume: 50% resin epoksi, 10% alumina, 10% grafit, 5% ZnO, dan 25% rasio partikel cangkang telur dan serat bambu. Sampel komposit kemudian diberikan paparan panas pada suhu 200°C selama 1 jam. langkah terakhir adalah curing, yaitu memanaskan sampel di dalam oven listrik pada suhu 150C selama 1 jam. Dengan menggunakan teknik pembobotan, maka komposit yang terdiri dari 25% partikel cangkang menghasilkan nilai yang paling optimum, yakni dengan MRPI 42.43, dimana nilai kekerasan, MOE, MOR, regangan masing-masing adalah 70.24 SD, 37.65 MPa, 8.58 Mpa, 0.78%. Sampel dengan kandungan 25% serat bambu dan tanpa partikel cangkang telur memiliki kekuatan lentur tertinggi sebesar 12.06 MPa. Sedangkan sampel dengan komposisi 25% partikel cangkang telur memiliki kekerasan tertinggi sebesar 70.24 SD.

**Kata kunci:** Serat bambu; Cangkang telur; Sifat mekanik; Paparan panas.

### 1. PENDAHULUAN

Kampas rem merupakan salah satu komponen vital dalam sistem pengereman kendaraan bermotor. Efektivitas kampas rem dalam menghentikan atau memperlambat laju kendaraan sangat bergantung pada material penyusunnya. Saat pengereman

berlangsung, energi kinetik diubah menjadi energi panas, sehingga panas yang dibangkitkan dapat mempengaruhi kinerja komposit kampas rem [1].

Penggunaan asbes sebagai bahan utama kampas rem selama beberapa dekade telah memberikan performa mekanis yang baik. Akan tetapi, asbes bersifat karsinogenik

dan berbahaya bagi kesehatan serta lingkungan [2]. Oleh karena itu, upaya untuk mengganti bahan asbes dengan material yang lebih aman dan ramah lingkungan menjadi fokus utama dalam pengembangan kampas rem modern.

Cangkang telur, yang merupakan limbah rumah tangga dengan kandungan utama kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) sekitar 95% telah banyak diteliti sebagai bahan pengisi komposit. Kandungan ini mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan panas material, serta mudah didaur ulang [3]. Di sisi lain, serat bambu memiliki kekuatan tarik tinggi dan modulus elastisitas yang besar, mencapai 800 MPa dan 33 GPa, sehingga sangat cocok digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit [4].

Tantangan utama dalam penggunaan material alami adalah ketahanannya terhadap paparan higrotermal. Cangkang telur dapat terurai pada suhu tinggi, sedangkan serat bambu dapat kehilangan sifat mekanisnya jika terkena suhu tinggi [1, 5]. Selain sifat mekanik, desain kampas rem juga harus memperhatikan karakteristik tribologi dan sifat termalnya [6]. Komposit berbasis polimer,

khususnya resin epoksi, banyak digunakan karena kemudahan dalam pembuatan dan dapat dipadukan dengan berbagai bahan penguat.

Dalam konteks keberlanjutan, pemanfaatan limbah cangkang telur dan bambu memberikan nilai tambah dalam pengembangan material. Limbah cangkang telur yang tidak terpakai dapat dimanfaatkan sebagai bahan fungsional, mengurangi pencemaran dan meningkatkan efisiensi biaya produksi kampas rem [7]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh paparan panas terhadap kekuatan lentur dan kekerasan komposit kampas rem berbasis cangkang telur dan serat bambu.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Material

Material yang digunakan dalam pembuatan komposit kampas rem terdiri dari resin epoksi, grafit, alumina, ZnO, partikel cangkang telur, dan serat bambu. Material dan fungsinya ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Material dan fungsinya

Material	Fungsi	Fraksi volume
Resin epoksi	Matriks	50%
Grafit	Pelumas padat	10%
Alumina	Pemodifikasi gesek	10%
ZnO	Filler	5%
Serat bambu	Penguat	0, 12.5, 25
Partikel cangkang telur	Filler	25, 12.5, 0

### 2.2 Perlakuan awal serat

Sebelum digunakan, serat bambu diberikan perlakuan alkali 5% selama 2 jam. Perlakuan alkali ini dimaksudkan untuk membentuk morfologi permukaan serat, menghilangkan lapisan lilin dan pengotor lainnya. Perlakuan alkali dapat meningkatkan kekuatan ikatan antarmuka permukaan serat

bambu dan matriks resin epoksi. Serat bambu ditunjukkan oleh Gambar 1.

Penelitian ini bersifat eksperimental dan dilakukan dalam skala laboratorium. Komposit kampas rem tersusun dari 6 material dengan fraksi volume, yaitu: matriks (50%), grafit (10%), alumina (10%), ZnO (5%), dan rasio partikel cangkang telur dan serat bambu, seperti ditunjukkan oleh Tabel 1.



Gambar 1. Serat bambu

Ukuran partikel cangkang telur disaring dengan menggunakan *mesh* 80, lalu dicampur homogen dan dikompaksi menggunakan *cold press* dengan tekanan 5 MPa selama 2 jam. Setelah kompaksi, komposit melalui proses

*curing* di oven suhu 150°C selama 1 jam, lalu diberi perlakuan panas (*heat exposure*) pada suhu 200 °C selama 1 jam untuk mensimulasikan suhu pengereman kendaraan bermotor.

Tabel 1. Komposisi rasio partikel cangkang telur dan serat bambu

Material	CT0	CT12.5	CT25
Partikel cangkang telur	0	12.5	25
Serat bambu	25	12.5	0

### 2.3 Karakterisasi material

Performa material komposit dalam studi ini ditunjukkan oleh kekerasan, kekuatan lentur, modulus lentur, dan regangan lentur pada komposit polimer berbasis bambu dan cangkang telur.

#### Pengujian Kekuatan Lentur

Pengujian kekuatan lentur dilakukan dengan menggunakan metode *three-point bending* dengan merujuk standar ASTM D790. Dari uji bending diperoleh data modulus elastisitas, kekuatan lentur, dan regangan komposit.

#### Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan komposit diuji dengan menggunakan durometer shore D dengan merujuk standar ASTM D2240.

#### Analisis FTIR

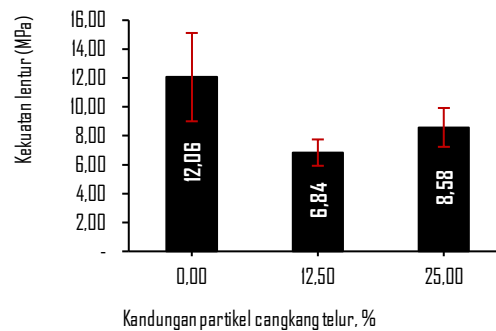
Analisis FTIR digunakan untuk mengetahui perbedaan gugus fungsi kimia antar sampel

yang terdiri dari fraksi volum cangkang telur yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan menggunakan spectrometer inframerah dengan panjang gelombang antara 4000 – 400 cm<sup>-1</sup>.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Kekuatan Lentur

Gambar 2 menunjukkan bahwa kekuatan lentur komposit semakin tinggi jika kandungan partikel cangkang telur semakin besar. Peningkatan secara signifikan terjadi pada kandungan partikel cangkang telur 12.50%, di mana terjadi peningkatan sebesar 65.61%, sedangkan dari kandungan 12.50% menjadi 25% hanya meningkat sebesar 8.12%. Hasil studi ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Iloabachie dkk. [8], di mana kekuatan lentur mencapai nilai maksimum pada kandungan 25% dan kekerasan maksimum pada 20% kandungan partikel cangkang telur terkalsinasi.

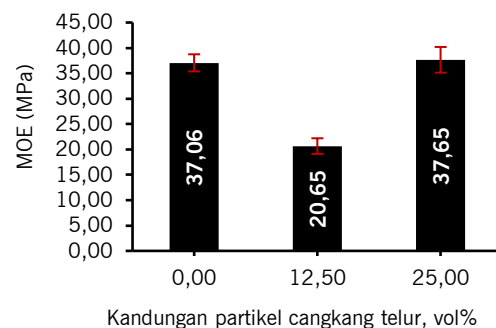


Gambar 2. Korelasi kandungan partikel cangkang telur terhadap kekuatan lentur

Muhammad dkk. [9] menunjukkan fenomena yang sedikit berbeda, di mana kekuatan lentur mencapai nilai optimum pada penambahan kandungan 10%wt partikel cangkang telur. Studi lain menunjukkan bahwa kekuatan lentur komposit mencapai nilai maksimum ketika terdapat penambahan 4wt% partikel cangkang telur, dan mulai mengalami penurunan pada penambahan 6wt%.

Sifat mekanik lain yang diamati adalah modulus elastisitas komposit. Modulus

elastitas menunjukkan kekakuan material komposit. Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan partikel cangkang telur cenderung menurunkan modulus elastisitasnya. Studi yang dilakukan oleh Ahmed dkk. [10] menunjukkan bahwa penambahan partikel cangkang telur terkalsinasi hingga 0.50% menghasilkan kekuatan lentur, modulus lentur, dan ketangguhan masing-masing meningkat hingga 31.84%, 28.56%, dan 81.36%.



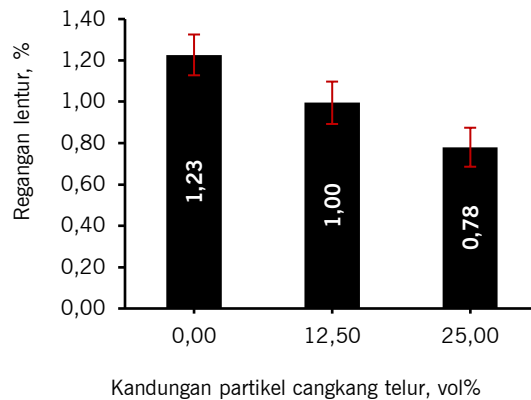
Gambar 3. Korelasi antara kandungan partikel cangkang telur dan modulus lentur

Pemakaian partikel cangkang telur dengan dan tanpa perlakuan kalsinasi memiliki pengaruh yang berbeda. Partikel cangkang telur tanpa perlakuan dapat meningkatkan karakteristik lentur, modulus tarik, dan kekerasannya, sedangkan partikel cangkang telur dengan kalsinasi dapat memperbaiki ketahanan impak dan ketahanan keausan. Kandungan partikel cangkang telur dalam kedua fasa mencapai nilai maksimum pada 2% [3].

Gambar 4 menunjukkan bahwa regangan lentur komposit mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kandungan partikel cangkang telur. Partikel

cangkang telur dapat menghambat pergerakan rantai polimer, sehingga mengurangi kemampuan deformasi komposit. Secara keseluruhan, penambahan partikel cangkang telur baik yang dikalsinasi maupun tidak menyebabkan penurunan regangan lentur pada penambahan 5% hingga 20%. Akan tetapi jika dibandingkan dengan komposit bio-epoksi murni, maka modulus tarik dan modulus lentur mengalami peningkatan [11].

Venaktegowda dkk. [12] menunjukkan bahwa regangan mencapai nilai maksimum pada penambahan 12wt% partikel cangkang telur dengan nilai elongasi sebesar 10.02%, untuk kemudian mengalami penurunan.



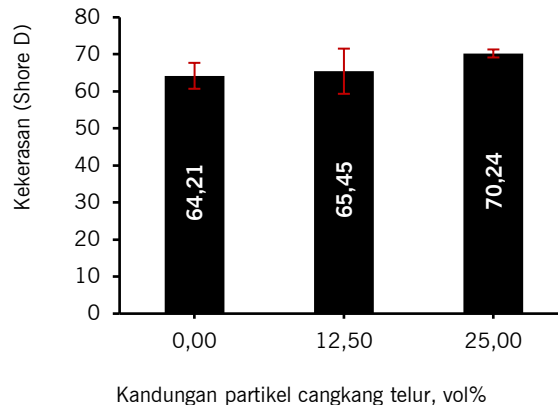
Gambar 4. Korelasi antara kandungan partikel cangkang telur dan regangan lentur

### Kekerasan Permukaan

Kekerasan permukaan komposit berkorelasi dengan modulus dan regangan lenturnya. Gambar 5 menunjukkan bahwa kekerasan meningkat seiring dengan penambahan partikel cangkang telur. Penambahan partikel cangkang telur hingga cenderung meningkatkan kekerasan komposit, meskipun tidak terlalu signifikan. Hasil studi ini memiliki fenomena yang hamper serupa dengan dengan yang dilakukan oleh

Yirijor [13], di mana kekerasan komposit mencapai nilai tertinggi ketika ada penambahan 15% partikel cangkang telur.

Nilai kekerasan komposit dalam studi ini menunjukkan nilai yang lebih baik jika dibandingkan dengan yang dilakukan oleh Babu dkk. [3], di mana kekerasan tertinggi adalah 63.91 HSD pada penambahan 6wt% partikel cangkang telur. Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa kekerasan komposit tertinggi dimiliki oleh sampel dengan penambahan 25% partikel cangkang telur.

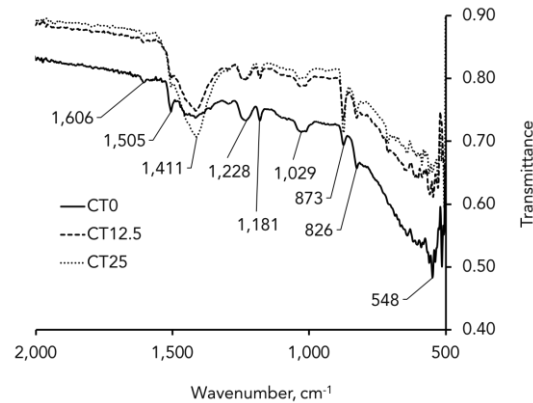


Gambar 5. Korelasi antara kandungan partikel cangkang telur dan regangan lentur

### Analisis FTIR

Analisis FTIR pada komposit yang memperoleh penambahan filler partikel cangkang telur ditunjukkan oleh Gambar 6. Pada sampel komposit bambu tanpa penambahan partikel cangkang telur menampilkan puncak serapan kuat pada

wavenumber  $873\text{ cm}^{-1}$  yang mengindikasikan terjadinya peregangan ikatan atom -OH. Pada sampel yang memiliki kandungan partikel cangkang telur menunjukkan puncak gelombang yang lebih sempit dan dalam. Hal ini dapat menjadi indikator bahwa terjadi peregangan oleh karbonat di dalam  $\text{CaCO}_3$ .



Gambar 6. FTIR komposit epoksi

Puncak 1023-1030  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan peregangan C-O-C mengindikasikan pengaruh penguatan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada jaringan polimer sehingga dapat meningkatkan stabilitas struktur komposit [14]. Pada puncak gelombang 1411-1416  $\text{cm}^{-1}$ , menunjukkan terjadinya peregangan atom C-O dan kelenturan  $\text{CaCO}_3$  [15]. Puncak 1454  $\text{cm}^{-1}$  adalah group methyl (-CH3) di dalam lignin [16]. Puncak antara 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$  berkaitan dengan peregangan carbonyl (C=O) yang disebabkan oleh lignin dalam serat atau partikel bambu atau matriks epoksi dan kemungkinan bertumpang tindih dengan peragangan C=C dari aromatic resin [14]. Pada puncak ini juga mengindikasikan ikatan

kimia atau interaksi antara  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan matriks epoksi.

**Analisa Statistik**

Analisis MRPI dengan menggunakan teknik pembobotan dilakukan untuk menentukan specimen terbaik berdasarkan kombinasi nilai kekuatan lentur, modulus lentur, regangan lentur, dan kekerasan komposit. Metode ini menggabungkan beberapa respons menjadi satu indeks performa, sehingga memudahkan dalam membandingkan kualitas antar specimen secara keseluruhan. Rangkuman sifat mekanis ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Rata-rata Respon

Nilai rerata	Sampel		
	CT0	CT12.5	CT25
MOR (MPa)	12.06	6.84	8.58
MOE (MPa)	37.06	20.65	37.65
Regangan (%)	1.23	1.00	0.78
Kekerasan (Shore D)	64.20	65.44	70.24

Parameter penilaian yang digunakan pada MRPI ini adalah specimen dengan nilai

performa tertinggi dianggap paling optimal. Bobot dari masing-masing respon ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Weight Spesimen*

Bobot	Sampel		
	CT0	CT12.5	CT25
MOR (MPa)	0.44	0.25	0.31
MOE (MPa)	0.39	0.22	0.39
Regangan (%)	0.41	0.33	0.26
Kekerasan (Shore D)	0.32	0.33	0.35

Dari Tabel 2 dan 3 akan diperoleh nilai MRPI berdasarkan teknik pembobotan. MRPI untuk komposit dengan fraksi volume 25% sebesar 42.43. Hal ini memberikan indikasi bahwa komposit dengan kandungan 25%

partikel cangkang telur menghasilkan performa yang paling optimum. Sedangkan pada komposit yang menggunakan filler hybrid antara serat bambu dan partikel cangkang telur menghasilkan nilai yang paling rendah.

$$\text{MRPI}_{(\text{CT}0)} = 0.44(12.06) + 0.39(37.06) + 0.41(1.23) + 0.32(64.20) = 40.82$$

$$\text{MRPI}_{\text{CT}12.5} = 0.25(6.84) + 0.22(20.65) + 0.33(1.00) + 0.33(65.44) = 27.93$$

$$\text{MRPI}_{\text{CT}25} = 0.31(8.58) + 0.39(37.65) + 0.026(0.78) + 0.35(70.24) = 42.43$$

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian mekanik dan analisis FTIR, dapat disimpulkan bahwa kandungan partikel cangkang telur sangat berpengaruh terhadap kekuatan lentur, modulus lentur, regangan lentur, dan kekerasan komposit kampas rem berbasis cangkang telur dan serat bambu.

1. Nilai MRPI tertinggi dimiliki oleh sampel komposit yang mengandung 25% partikel cangkang telur.
2. Pemberian paparan panas pada suhu 200°C tidak berpengaruh signifikan terhadap komposit, bahkan paparan tersebut bersifat sebagai post-curing yang justru meningkatkan sifat mekanik komposit.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sunardi, D. Ariawan, E. Surojo, A. R. Prabowo, T. Ghanbari-Ghazijahani, C. H. Wibowo and H. I. Akbar, "Performa Tribologi Kampas Rem Organik dengan Filler Cangkang Kelapa," *Emerging Science Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1280-1292, 2024.  
<http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-04-03>.
- [2] C. A. Poland and R. Duffin, "The toxicology of chrysotile-containing brake debris: implications for mesothelioma," *Critical Reviews in Toxicology*, vol. 49, no. 1, pp. 11-35, 2019.  
<https://doi.org/10.1080/10408444.2019.1568385>.
- [3] B. Babu, P. Muruganandhan, R. Girimurugan, S. Sakthi, S. Nanthakumar and S. Vignesh, "Influence of powdered chick eggshell (PECS) on mechanical and wear properties of kenaf fiber (KF) reinforced composites," *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-6, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.009>.
- [4] M. Martijanti, S. Sutarno and A. L. Juwono, "Polymer Composite Fabrication Reinforced with Bamboo Fiber for Particle Board Product Raw Material Application," *Polymers*, vol. 13, no. 4377, pp. 1-21, 2021.  
<https://doi.org/10.3390/polym13244377>.
- [5] S. Sunardi, I. Saefuloh, S. Ula, D. Ariawan, E. Surojo, A. R. Prabowo and D. Purnomo, "Engine oil exposure and performance degradation of composite brake pad based on natural materials," *Tribology and Materials*, vol. x, no. x, pp. xx-xx, 202X.  
<https://doi.org/10.46793/tribomat.2025.019>.
- [6] S. Sunardi, D. Ariawan, E. Surojo, A. R. Prabowo, H. I. Akbar and C. H. Wibowo, Pengembangan Kampas Rem Organik Non-Asbestos dan Tantangan Lingkungan, Yogyakarta: K-Media, 2024.
- [7] J. Rattanawut, O. Pimpa, K. Venkatachalam and K. E. Yamauchi, "Effect of Bamboo Charcoal Powder, Bamboo Vinegar, and Their Combination in Laying Hens on Performance, Egg Quality, Relative Organ Weights, and Intestinal Bacterial Populations," *Natioal Library of Medicine: National Center of Biotechnology Information*, vol. 53, no. 1, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s11250-020-02527-9>.
- [8] I. C. C. Iloabachie, O. T. Ajina and A. Chime, "Effect of Egg Shell Composition on the Flexural and Hardness Properties of Epoxy Resin/ Egg Shell Particles Composite," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 20, no. 11, pp. 1-7, 2021.  
<https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v20i117398>.

- [9] A. Muhammad, M. S. Z. Abidin, M. H. Hassan, Z. Mustafa and A. Anjang, "Effect of eggshell fillers on the tensile and flexural properties of glass fiber reinforced polymer composites," *Materials Today Proceedings*, vol. 66, no. 22, pp. 1-5, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.562>.
- [10] M. T. Ahmed, R. Ahammad, A. Roy, M. Arufuzzaman and M. S. Islam, "Effect of Eggshell Powder Content on The Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Fiber Metal Laminate," in *The 7th International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*, Chattogram, Bangladesh, 2023.
- [11] A. Sivakumar, S. Srividhya, R. Prakash and S. Padma, "Properties of biocomposites from waste eggshell as fillers," *Global NEST Journal*, vol. 28, no. 5, pp. 109-115, 2023. <https://doi.org/10.30955/gnj.005095>.
- [12] T. Venaktegowda, S. Premkumar and P. R. Anilkumar, "Mechanical Properties of Duck Eggshell Powder Reinforced Epoxy Composites - A Study on Effect of Reinforcement," *Engineering and Technology*, vol. 10, no. 05, pp. 5205-5210, 2025.
- [13] J. Yirijor, "Physico-mechanical properties of eggshell powdered-reinforced laterite composites for sustainable construction," *Discover Civil Engineering*, vol. 2, no. 152, pp. 1-15, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00314-9>.
- [14] A. R. Tavadi, D. Basheer, K. G. Melese, K. Kumaresan, N. Mohan, M. R. H. Kerur and L. C. Shashidhara, "Experimental analysis of mechanical properties and FTIR analysis of areca fiber-reinforced epoxy composites incorporating Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 55, pp. 1-23, 2025. doi: <https://doi.org/10.1177/15280837241313217>.
- [15] M. I. Najah, A. Razak, N. A. C. S. Nekmat, S. Adzila, R. Othman and N. Nordin, "Characterization of Calcium Carbonate Extracted from Eggshell Waste at Various Calcination Temperature," *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8, no. 10, pp. 6725-6731, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/16810202>.
- [16] M. M. Adil, M. M. H. Parvez, S. M. N. Rupom, T. Tasnim, M. S. Islam, M. A. Gafur, M. B. Mesbah and I. Ahmed, "Physical and thermal properties analysis of bamboo and rattan fiber reinforced polymer composite," *Results in Engineering*, vol. 22, pp. 1-9, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102084>.