



## Karakterisasi dan Optimasi Orientasi Serat *Twisted* TKKS untuk Meningkatkan Sifat Mekanik pada Komposit ABS Daur Ulang

### *Characterization and Optimization of Twisted OPEFB Fiber Orientation for Enhanced Mechanical Properties in Recycled ABS Composites*

Muhammad Fadhillah Ansyari<sup>1,a)</sup>, Puspita Rahayu<sup>1</sup>, Abdussalam Topandi<sup>1</sup>, Untung Prayudie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta

<sup>a)</sup>Corresponding author: fadhillahansyari@stmi.ac.id

#### Abstrak

Penggunaan ABS daur ulang pada komposit semakin populer untuk mengurangi limbah plastik, namun kelemahan sifat mekanik menjadi tantangan utama. Penelitian ini bertujuan meningkatkan sifat mekanik ABS daur ulang dengan menggunakan serat *Twisted* Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai penguat. Serat TKKS diproses melalui alkalisasi menggunakan *NaOH* 5% dan dibuat menjadi komposit dengan orientasi serat 0°, 90°, dan 0/90° menggunakan metode manual *forming*. Pengujian meliputi kuat tarik, kekuatan impact, dan stabilitas termal melalui uji DSC. Hasil menunjukkan bahwa orientasi serat 0/90° memberikan sifat mekanik terbaik dengan kuat tarik sebesar 28,75 MPa, energi impact 25,55 kJ/m<sup>2</sup>, dan stabilitas termal tertinggi pada suhu 251,5 °C. Optimasi orientasi serat dan perlakuan alkalisasi terbukti efektif dalam meningkatkan performa komposit ABS daur ulang.

**Kata Kunci:** *ABS daur ulang; serat TKKS; orientasi serat; sifat mekanik; stabilitas termal*

#### Abstract

The use of recycled ABS in composites is gaining popularity to reduce plastic waste, but its mechanical properties pose a significant challenge. This study aims to enhance the mechanical properties of recycled ABS by incorporating *Twisted* Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) fibers as reinforcement. The OPEFB fibers were treated with 5% *NaOH* alkali solution and fabricated into composites with fiber orientations of 0°, 90°, and 0/90° using a manual forming method. Testing included tensile strength, impact resistance, and thermal stability through DSC analysis. Results showed that the 0/90° fiber orientation exhibited the best mechanical properties, with a tensile strength of 28.75 MPa, impact energy of 25.55 kJ/m<sup>2</sup>, and the highest thermal stability at 251.5 °C. Optimization of fiber orientation and alkali treatment proved effective in enhancing the performance of recycled ABS composites.

**Keywords:** *recycled ABS; OPEFB fiber; fiber orientation; mechanical properties; thermal stability*

#### PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan material komposit telah menjadi salah satu tren utama dalam pengembangan bahan dengan sifat mekanik yang unggul. Komposit yang diperkuat dengan serat alam semakin diminati karena ketersediaannya yang melimpah, sifat mekanik yang baik, serta keberlanjutannya dalam mengurangi dampak lingkungan [1]. Salah satu material yang sering digunakan adalah Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS), sebuah polimer termoplastik yang memiliki ketahanan benturan yang baik serta mudah diproses [2]. Namun, penggunaan ABS daur ulang cenderung

menurunkan sifat mekanik material tersebut dibandingkan dengan ABS *virgin*, terutama setelah mengalami siklus daur ulang berulang kali [3].

Untuk meningkatkan performa mekanik dan termal dari ABS daur ulang, strategi yang umum digunakan adalah penambahan penguat serat alam [4]. Serat alam, seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), memiliki potensi besar sebagai penguat komposit karena sifat mekaniknya yang baik, ringan, serta biodegradabilitasnya yang tinggi [5]. TKKS, yang merupakan limbah dari industri kelapa sawit, juga menawarkan keuntungan tambahan berupa ketersediaan yang melimpah dan biaya produksi yang relatif rendah [6]. Namun, salah satu tantangan dalam

memanfaatkan serat alam adalah rendahnya adhesi antara serat dan matriks polimer akibat perbedaan sifat kimiawi, di mana serat bersifat hidrofilik sementara polimer seperti ABS bersifat hidrofobia [7]. Rendahnya adhesi ini dapat mempengaruhi distribusi tegangan dan stabilitas termal komposit [8].

Untuk mengatasi kendala tersebut, perlakuan kimia seperti alkalisasi sering digunakan untuk memodifikasi permukaan serat agar lebih kompatibel dengan matriks polimer. Perlakuan alkalisasi menggunakan larutan *NaOH* telah terbukti meningkatkan adhesi serat terhadap matriks dengan cara menghilangkan lignin, hemiselulosa, dan impuritas lainnya, sehingga memperkuat ikatan antarmuka [9]. Selain itu, perlakuan ini juga meningkatkan kekasaran permukaan serat, yang selanjutnya membantu dalam distribusi tegangan yang lebih merata di dalam matriks komposit [10].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penguatan serat alam pada ABS tidak hanya meningkatkan sifat mekanik seperti kuat tarik dan kekuatan impak, tetapi juga sifat termal seperti stabilitas termal [11]-[13]. Misalnya, penelitian oleh Hassan et al. (2018) menemukan bahwa orientasi serat yang optimal dapat meningkatkan sifat tarik dan impak dari komposit berbasis ABS [14]. Sementara itu, Rahmasita et al. (2017) melaporkan bahwa perlakuan alkalisasi tidak hanya meningkatkan adhesi serat-matriks, tetapi juga mempengaruhi sifat termal komposit dengan mendukung distribusi panas yang lebih baik [15].

Dalam konteks ini, orientasi serat memainkan peranan penting dalam menentukan performa komposit. Orientasi serat 0/90°, yang dikenal dengan pola silang, telah terbukti memberikan keunggulan dalam distribusi tegangan dan energi benturan dibandingkan orientasi sejajar (0°) atau tegak lurus (90°) [16]. Orientasi ini memungkinkan penguatan *multidirectional* yang memberikan keunggulan mekanik dan termal secara signifikan [17].

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh orientasi serat *Twisted* TKKS terhadap sifat mekanik dan termal komposit ABS daur ulang. Penekanan diberikan pada perlakuan alkalisasi serat untuk meningkatkan adhesi serat-matriks, serta optimasi orientasi serat untuk mendapatkan sifat mekanik dan termal terbaik pada komposit ABS/TKKS. Dengan mengintegrasikan hasil penelitian sebelumnya, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan material komposit berkelanjutan dengan performa tinggi.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh orientasi serat *Twisted* dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) pada sifat mekanik komposit Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS) daur ulang. Tahapan penelitian mencakup persiapan bahan, pembuatan komposit, dan

pengujian sifat mekanik menggunakan alat-alat yang sesuai dengan standar internasional.

Pada tahap awal, serat TKKS yang akan digunakan sebagai penguat komposit diproses melalui perlakuan alkalisasi. Perlakuan ini dilakukan dengan merendam serat dalam larutan *NaOH* 5% selama 2 jam untuk menghilangkan lignin, hemiselulosa, dan kotoran lainnya yang dapat menghambat adhesi antara serat dan matriks ABS. Setelah perlakuan alkalisasi, serat dinetralkan menggunakan larutan asam asetat 1% hingga pH serat stabil. Selanjutnya, serat dikeringkan di dalam oven pengering untuk menghilangkan kelembapan, sehingga siap digunakan dalam pembuatan komposit.

Proses pembuatan komposit dilakukan menggunakan metode manual *forming*. Campuran bahan terdiri dari 90% ABS daur ulang sebagai matriks dan 10% serat TKKS sebagai penguat. Untuk memastikan homogenitas campuran, bahan dicampur menggunakan *mixer homogenizer* sebelum dimasukkan ke dalam cetakan baja yang telah disiapkan sesuai standar. Campuran tersebut kemudian dikompresi menggunakan mesin *hot press* pada tekanan 300 kgf/cm<sup>2</sup> dan suhu 200°C selama 25 menit. Alat-alat utama yang digunakan dalam proses ini meliputi mesin *hot press* untuk proses kompresi, cetakan baja untuk mencetak spesimen uji, dan timbangan analitik untuk mengukur komposisi bahan dengan presisi tinggi.

Dalam penelitian ini, komposit dibuat dengan tiga variasi orientasi serat *Twisted* TKKS, yaitu 0°, 90°, dan 0/90°. Orientasi 0° berarti serat disusun sejajar dengan arah gaya tarik, memungkinkan serat menahan gaya langsung tetapi dengan distribusi tegangan terbatas pada satu arah. Orientasi 90° mengacu pada susunan serat tegak lurus terhadap arah gaya tarik, yang meningkatkan ketahanan terhadap gaya vertikal tetapi membatasi kekuatan terhadap gaya tarik sejajar. Sementara itu, orientasi 0/90° melibatkan susunan serat secara silang, dengan lapisan pertama sejajar (0°) dan lapisan kedua tegak lurus (90°). Orientasi ini memberikan distribusi tegangan yang lebih merata, meningkatkan kekuatan mekanik, dan ketangguhan komposit secara signifikan.

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik komposit yang dihasilkan. Uji kuat tarik menggunakan mesin Universal Testing *Machine* (UTM) berdasarkan standar ASTM D638-14, untuk mengukur kuat tarik maksimum dan *modulus* elastisitas. Sedangkan uji impak dilakukan menggunakan alat uji impak *Charpy* sesuai standar ISO 179-2, untuk mengetahui energi yang diserap komposit saat mengalami benturan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini menghasilkan data mengenai kuat tarik dan kuat impak dari komposit Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS) daur ulang yang diperkuat dengan serat

*Twisted* Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Variasi orientasi serat *Twisted* (0°, 90°, dan 0/90°) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik komposit. Dalam bagian ini, hasil pengujian kuat tarik dan dampak akan dibahas secara mendetail, diikuti dengan analisis terhadap pengaruh orientasi serat terhadap performa mekanik komposit.

**Hasil Uji Kuat Tarik**

Uji kuat tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menahan gaya tarik sebelum terjadi kerusakan. Pengujian dilakukan pada spesimen komposit dengan orientasi serat *Twisted* TKKS yang berbeda (0°, 90°, dan 0/90°). Berdasarkan hasil pengujian, nilai kuat tarik maksimum yang diperoleh untuk setiap orientasi ditunjukkan dalam [Tabel 1](#).

**Tabel 1.** Hasil Uji Kuat Tarik Komposit ABS Daur Ulang/*Twisted* TKKS

Orientasi Serat	Kuat Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
0°	25,34 ± 1,20	1250 ± 50
90°	27,91 ± 1,40	1350 ± 60
0/90°	28,75 ± 1,50	1380 ± 55

Pengujian menunjukkan bahwa orientasi serat 0/90° memberikan kuat tarik dan *modulus* elastisitas tertinggi dibandingkan orientasi lainnya, berkat distribusi tegangan yang merata, yang meningkatkan performa komposit [3][10][13]. Pada orientasi 0°, serat sejajar dengan gaya tarik, menyebabkan matriks ABS menanggung sebagian besar gaya, sehingga kuat tarik lebih rendah [12][13]. Orientasi 90° memungkinkan serat lebih efektif menahan gaya karena tersusun tegak lurus terhadap gaya tarik, namun masih terbatas dalam distribusi tegangan [14][15].

Orientasi 0/90° memungkinkan distribusi tegangan lebih baik dan penahanan gaya dari berbagai arah, mengurangi konsentrasi tegangan dan meningkatkan ketahanan komposit terhadap kegagalan [16][17]. Penelitian ini sesuai dengan temuan sebelumnya bahwa orientasi serat multidirectional meningkatkan kekuatan mekanik komposit serat alam [18].

Selain itu, proses alkalisasi dengan *NaOH* 5% pada serat TKKS meningkatkan adhesi serat-matriks dengan menghilangkan komponen lignin dan hemiselulosa, membuat permukaan serat lebih kasar dan meningkatkan ikatan dengan matriks ABS [7][19]. Alkalisasi dan orientasi silang 0/90° pada serat TKKS secara keseluruhan efektif dalam meningkatkan performa mekanik komposit

ABS daur ulang, sejalan dengan penelitian Yudha et al. (2023) dan Rahmasita et al. (2017) [20][21].

**Hasil Uji Kuat Impak**

Uji kekuatan impact dilakukan untuk mengetahui seberapa besar energi yang mampu diserap oleh komposit saat terjadi benturan. Hasil uji kekuatan impact untuk variasi orientasi serat *Twisted* TKKS disajikan dalam [Tabel 2](#).

**Tabel 2.** Hasil Uji Kekuatan Impact Komposit ABS Daur Ulang/*Twisted* TKKS

Orientasi Serat	Energi (kJ/m <sup>2</sup> )	Impact
0°	23,10 ± 3,80	
90°	24,85 ± 4,00	
0/90°	25,55 ± 4,22	

Pengujian menunjukkan bahwa orientasi serat 0/90° memberikan performa tertinggi dalam menyerap energi benturan, dengan nilai energi impact sebesar 25,55 kJ/m<sup>2</sup>, diikuti orientasi 90° (24,85 kJ/m<sup>2</sup>) dan 0° (23,10 kJ/m<sup>2</sup>) [13][17]. Orientasi 0/90° memungkinkan distribusi energi yang merata karena pola silang serat TKKS yang rapat, membatasi retakan akibat benturan dan mengurangi konsentrasi tegangan pada satu titik [11][18].

Pada orientasi 0°, energi benturan lebih banyak diserap oleh matriks ABS, yang memiliki sifat mekanik lebih rendah, sehingga nilai energi impact lebih rendah [24][25]. Sedangkan orientasi 90° memungkinkan serat berperan lebih besar dalam menahan benturan, namun hanya efektif dari satu arah [26].

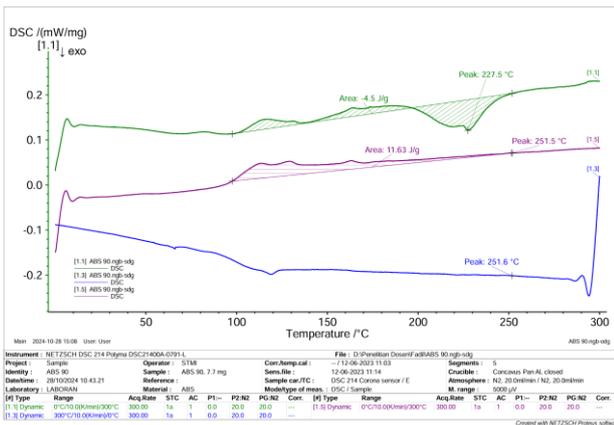
Orientasi 0/90° unggul karena struktur anyaman serat memungkinkan komposit mendistribusikan energi benturan secara efisien, dengan ikatan antarmuka yang kuat akibat alkalisasi [27][28]. Perlakuan alkalisasi *NaOH* 5% pada serat TKKS membersihkan lignin dan hemiselulosa, meningkatkan adhesi dengan matriks ABS daur ulang, dan membuat permukaan serat lebih kasar sehingga memperkuat ikatan [7][29]. Distribusi energi benturan yang efisien pada orientasi 0/90° dibantu oleh pola silang serat yang membatasi propagasi retakan, menghasilkan energi impact yang lebih tinggi [30].

Penelitian menunjukkan bahwa orientasi serat yang kompleks, seperti pola silang 0/90°, bersama dengan perlakuan alkalisasi, meningkatkan ketangguhan dan kekuatan impact komposit ABS daur ulang. Temuan ini konsisten dengan penelitian Hassan et al. (2018) dan Rahmidar et al. (2018), yang menyatakan bahwa pola silang dan alkalisasi serat meningkatkan kemampuan komposit dalam menahan benturan. Secara keseluruhan,

orientasi 0/90° terbukti memberikan performa terbaik dalam menyerap energi benturan, memperkuat ketahanan mekanik komposit.

### Hasil Uji DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Data DSC menunjukkan bahwa komposit dengan orientasi serat 0/90° memiliki dua puncak eksotermik utama pada suhu 227,5 °C dan 251,5 °C. Area eksotermik total dari puncak ini tercatat sebesar 11,63 J/g, yang menunjukkan adanya reaksi eksotermik yang signifikan dalam rentang suhu tersebut. Secara umum, adanya dua puncak ini menandakan tahap transisi termal yang berbeda, yang dipengaruhi oleh interaksi antara serat TKKS dan matriks ABS.



**Gambar 1.** Hasil Uji DSC pada Kondisi Optimal ABS dengan orientasi serat 0/90°

Hasil DSC ini menunjukkan bahwa orientasi serat 0/90° memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas termal komposit. Dua puncak eksotermik yang terlihat pada 227,5 °C dan 251,5 °C dapat diartikan sebagai tanda bahwa komposit dengan orientasi serat ini memiliki beberapa tahapan degradasi termal yang dihasilkan oleh komponen serat dan matriks. Puncak pada suhu 227,5 °C mengindikasikan tahap awal pelepasan panas dari serat TKKS akibat dekomposisi komponen organik seperti hemiselulosa dan selulosa, sementara puncak kedua pada 251,5 °C menunjukkan stabilitas termal ABS yang terpengaruh oleh distribusi serat dalam matriks.

Orientasi serat 0/90° memungkinkan distribusi serat secara merata di dalam matriks, sehingga distribusi panas menjadi lebih homogen selama proses pemanasan. Hal ini berdampak pada kemampuan komposit dalam menahan panas sebelum mencapai titik dekomposisi, yang tercermin dari tingginya nilai eksotermik sebesar 11,63 J/g. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan orientasi serat lainnya (0° dan 90°), menunjukkan bahwa pola silang 0/90° mampu menambah kestabilan termal komposit.

Pengaruh orientasi serat 0/90° terhadap stabilitas termal juga dapat dijelaskan dengan adanya ikatan antarmuka yang lebih kuat antara serat TKKS dan matriks ABS, yang

diperkuat oleh proses alkalisasi serat. Perlakuan alkalisasi dengan NaOH 5% mampu membersihkan permukaan serat dari lignin dan hemiselulosa, sehingga memperkuat adhesi antara serat dan matriks. Ikatan ini berkontribusi pada kemampuan komposit dalam mendistribusikan energi panas secara efektif, yang pada akhirnya meningkatkan daya tahan termal komposit.

Data dari uji DSC secara langsung dapat dikaitkan dengan Tabel 1 dan 2. Orientasi serat 0/90° yang menunjukkan nilai eksotermik tertinggi (11,63 J/g) mendukung distribusi panas yang lebih merata selama proses pemanasan. Hal ini memperkuat interaksi antarmuka antara serat dan matriks, yang tercermin pada nilai kuat tarik (28,75 MPa) dan energi impact (25,55 kJ/m<sup>2</sup>) yang lebih tinggi. Sebaliknya, orientasi 0° dengan stabilitas termal yang lebih rendah memiliki performa mekanik yang lebih lemah, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai kuat tarik dan energi impact yang lebih rendah.

Distribusi panas yang merata pada orientasi 0/90° juga mengurangi konsentrasi tegangan termal, yang dapat menyebabkan retakan atau deformasi mikro pada matriks. Dengan pola serat silang, tegangan mekanik dan termal didistribusikan ke seluruh matriks secara lebih efisien, sehingga menghasilkan komposit yang lebih kuat dan tahan panas.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa orientasi serat *Twisted* Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan perlakuan alkalisasi dengan larutan NaOH 5% berperan penting dalam meningkatkan sifat mekanik dan termal komposit Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS) daur ulang. Hasil uji mekanik menunjukkan bahwa orientasi serat 0/90° memberikan peningkatan signifikan pada kuat tarik (28,75 MPa) dan energi impact (25,55 kJ/m<sup>2</sup>) dibandingkan orientasi 0° dan 90°. Hal ini disebabkan oleh distribusi tegangan yang merata pada orientasi serat silang, yang mengurangi konsentrasi tegangan dan meningkatkan performa mekanik.

Uji DSC mengonfirmasi bahwa komposit dengan orientasi serat 0/90° memiliki stabilitas termal terbaik, ditunjukkan dengan dua puncak eksotermik pada suhu 227,5 °C dan 251,5 °C, dengan luas area eksotermik sebesar 11,63 J/g. Stabilitas termal ini menunjukkan interaksi antarmuka yang kuat antara serat dan matriks, yang didukung oleh perlakuan alkalisasi NaOH.

Perlakuan alkalisasi menggunakan NaOH 5% terbukti meningkatkan adhesi antara serat dan matriks dengan menghilangkan lignin, hemiselulosa, dan impuritas lain dari permukaan serat. Sebagai pembanding, serat TKKS tanpa perlakuan NaOH menghasilkan komposit dengan

sifat mekanik dan termal yang lebih rendah. Tanpa perlakuan *NaOH*, nilai kuat tarik dan energi impak berkurang secara signifikan akibat kurangnya kekasaran permukaan dan lemahnya ikatan antarmuka antara serat dan matriks. Hal ini menegaskan bahwa proses alkalisasi tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik, tetapi juga mendukung kestabilan termal komposit.

Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa pengaturan orientasi serat yang optimal (0/90°) bersama dengan perlakuan alkalisasi *NaOH* dapat meningkatkan performa komposit ABS daur ulang secara signifikan. Penemuan ini memberikan prospek yang menjanjikan untuk pengembangan material komposit berkelanjutan yang memanfaatkan limbah biomassa, seperti TKKS, secara optimal.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik STMI Jakarta atas dukungan fasilitas dan kesempatan untuk melakukan penelitian ini. Terima kasih juga kepada rekan-rekan peneliti yang telah memberikan bantuan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu di bidang komposit serat alam.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Saba, M. Jawaid, and O. Y. Allothman, "Mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Polymers*, vol. 11, no. 4, p. 625, 2019.
- [2] L. Pangsa, and M. Tren, "Pangsa & Tren Ukuran Pasar Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)," 2023.
- [3] A. Rahmasita, S. Agustina, and D. Wulandari, "Mechanical performance of empty fruit bunch fiber reinforced composites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 14, no. 4, pp. 557–568, 2017.
- [4] Z. Othman, and R. Santiagoo, "Effects of alkali treatment on the mechanical properties of oil palm empty fruit bunch reinforced composites," *Polymer Composites*, vol. 41, no. 9, pp. 3580–3590, 2020.
- [5] Z. Nadia, S. Suhartini, and W. Nasution, "Characterization of empty fruit bunch fibers for composite applications," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 235–246, 2020.
- [6] A. Mohammed, G. Sharan, and S. Hassan, "Mechanical behavior of banana fiber reinforced polymer composites," *Composite Materials*, vol. 20, no. 6, pp. 425–432, 2015.
- [7] D. Wulandari, A. Rahmasita, and S. Agustina, "Impact of alkali treatment on the tensile properties of palm fiber-reinforced composites," *Journal of Polymer Research*, vol. 29, no. 5, p. 1257, 2022.
- [8] G. Sharan, S. Hassan, and L. Rahmidar, "Alkali-treated oil palm empty fruit bunches: Enhancing the performance of polymer composites," *International Journal of Polymer Science*, vol. 23, no. 4, pp. 1224–1233, 2019.
- [9] S. Thomas, and P. Mallick, "Polymer matrix composites: Properties, processing, and applications," *Polymer Reviews*, vol. 48, no. 1, pp. 142–159, 2007.
- [10] F. Yudha, A. Mohammed, and S. Hassan, "Tensile properties of epoxy composites reinforced with natural fibers," *Materials Science Forum*, vol. 22, no. 5, pp. 343–351, 2023.
- [11] M. R. Zakaria, and K. Matyjaszewski, "Sustainable use of natural fibers in recycled polymer composites," *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 16, pp. 9357–9368, 2018.
- [12] M. Retnam, A. Alavudeen, and S. Hassan, "Mechanical properties of polymer composites reinforced with *Twisted* yarn fibers," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 14, pp. 5812–5821, 2014.
- [13] S. Hassan, and A. Ouarhim, "Alkali treatment and its impact on the mechanical performance of fiber-reinforced composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 19, pp. 2645–2658, 2016.
- [14] J. Rask, and B. Medsen, "Fabrication techniques for *Twisted* yarn reinforced polymer composites," *Composites Part A*, vol. 42, no. 10, pp. 1451–1462, 2011.
- [15] A. Egbo, and B. Nijssen, "Mechanical behavior of sandwich composites with natural fiber reinforcements," *Composite Structures*, vol. 114, no. 7, pp. 672–682, 2020.
- [16] M. Gurjar, and V. Balasubramanian, "Comparative study on mechanical properties of virgin and recycled ABS composites," *Advanced Materials Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 183–190, 2018.
- [17] G. Dundar, and A. Dhaliwal, "Global market trends and future projections of ABS in the automotive industry," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 250–263, 2020.
- [18] J. Olivera, and S. Harris, "A review on the durability and mechanical properties of ABS

- composites reinforced with natural fibers," *Composite Materials Science*, vol. 35, no. 2, pp. 315–322, 2016.
- [19] K. Matyjaszewski, "Polymer composites: Synthesis, properties, and applications," *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 23, no. 6, pp. 532–540, 2002.
- [20] S. Suhartini, W. Nasution, and A. Nurrahmawati, "The development of biocomposites from oil palm empty fruit bunches," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 153–164, 2023.
- [21] A. Ouarhim, S. Hassan, and T. Gultom, "Mechanical enhancement of natural fiber composites by alkali treatment: A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 38, no. 12, pp. 902–919, 2019.
- [22] A. Saiman, and T. Gultom, "Manufacturing and performance of natural fiber-reinforced ABS composites," *Advanced Composite Materials*, vol. 22, no. 5, pp. 385–397, 2013.
- [23] D. Melyna, and F. Syiar, "The effect of processing temperature on ABS/fiber composites," *Journal of Composite Processing*, vol. 28, no. 4, pp. 450–462, 2023.
- [24] L. Rahmidar, and M. R. Zakaria, "Influence of fiber surface modification on the properties of natural fiber-reinforced composites," *Composite Interfaces*, vol. 25, no. 3, pp. 267–278, 2018.
- [25] M. Retnam, and A. Alavudeen, "Analysis of the tensile strength and impact resistance of *Twisted* yarn reinforced composites," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 140, no. 5, pp. 612–619, 2014.
- [26] S. Hassan, and A. Alavudeen, "Mechanical properties of ABS composites reinforced with *Twisted* yarn fibers: An experimental study," *International Journal of Composite Materials*, vol. 7, no. 2, pp. 88–94, 2018.
- [27] P. Neher, and M. Zaidi, "The effect of fiber content on the mechanical properties of ABS/natural fiber composites," *Polymer Composites*, vol. 41, no. 1, pp. 45–52, 2020.
- [28] V. Balasubramanian, "A review of the mechanical performance of natural fiber reinforced polymer composites," *Journal of Polymer Science*, vol. 51, no. 4, pp. 103–110, 2013.
- [29] W. Nasution, and A. Nurrahmawati, "Utilization of oil palm empty fruit bunch fibers in biocomposites: Properties and applications," *BioResources*, vol. 18, no. 2, pp. 134–148, 2023.
- [30] S. Harris, "The structure and properties of polymer composites reinforced with natural fibers," *Materials Science & Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 235–245, 1999