

Kinerja Papan Komposit Ramah Lingkungan Terhadap Api: Studi Literatur

*Rizky Dwiandra Putra¹, Dangan Waluyo², Timbul Siahaan³, Nurul Ilmi⁴,
Alvin Muhammad Savero⁵

^{1,2,3,4}Industri Pertahanan, Universitas Pertahanan, Bogor

⁵Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Cibinong

*Koresponden email: rizky.putra@tp.idu.ac.id

Diterima: 1 Juni 2025

Disetujui: 05 Juni 2025

Abstract

Natural fiber-based composite boards have gained increasing attention as a sustainable and eco-friendly alternative to conventional construction materials. While these materials offer notable mechanical performance and material efficiency, one of the primary challenges lies in improving their resistance to fire. This review presents a comprehensive analysis of existing literature on the fire performance of natural fiber composites, focusing on the role of fiber type, resin formulation, flame retardant additives, and production techniques. Based on a synthesis of ten experimental studies, it was found that composites combining kenaf fibers with phenolic resin and ammonium polyphosphate (APP) demonstrated the highest fire resistance—indicated by a Limiting Oxygen Index (LOI) exceeding 30%, longer ignition times, and slower burn rates. Additionally, fabrication methods such as hot pressing and surface coating proved effective in enhancing thermal resistance. Despite their promise, the adoption of these composites in broader industrial applications is hindered by challenges including energy efficiency, additive costs, and long-term stability. This review suggests that future development should integrate innovative material science with sustainable manufacturing strategies to produce fire-safe, cost-effective, and environmentally responsible composite panels.

Keywords: *composite board, natural fibres, fire resistance, loi, eco friendly*

Abstrak

Papan komposit berbahan dasar serat alami semakin mendapat perhatian sebagai alternatif material konstruksi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain memiliki keunggulan mekanik dan efisiensi material, tantangan utama dalam pemanfaatan papan komposit ini terletak pada aspek ketahanan terhadap api. Artikel ini menyajikan telaah sistematis terhadap berbagai literatur yang membahas performa tahan api papan komposit, khususnya dari segi pengaruh jenis serat, resin, aditif flame retardant, serta metode produksi. Berdasarkan tinjauan terhadap sepuluh studi eksperimental, ditemukan bahwa kombinasi serat kenaf dengan resin fenolik dan aditif ammonium polyphosphate (APP) menghasilkan performa ketahanan api tertinggi, ditandai dengan nilai *Limiting Oxygen Index (LOI)* > 30%, waktu nyala yang lebih lama, dan laju pembakaran yang lebih lambat. Teknik produksi seperti hot pressing dan pelapisan permukaan juga terbukti efektif dalam meningkatkan resistansi termal. Meski memiliki potensi besar, tantangan terkait efisiensi energi, biaya aditif, serta kestabilan jangka panjang masih menjadi hambatan untuk aplikasi luas di sektor industri. Kajian ini merekomendasikan arah pengembangan teknologi yang memadukan pendekatan material inovatif dan manufaktur berkelanjutan demi menghasilkan papan komposit yang aman, efisien, dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: *papan komposit, serat alami, ketahanan api, loi, ramah lingkungan*

1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, kesadaran terhadap dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh material konstruksi konvensional semakin meningkat. Penggunaan material yang ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi jejak karbon dan menjaga kelestarian sumber daya alam [2]. Salah satu alternatif material yang kini mendapat perhatian adalah papan komposit berbasis serat alam. Material ini dianggap lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan bahan-bahan alami yang dapat diperbarui, sehingga mengurangi ketergantungan pada sumber daya tidak terbarukan seperti kayu dan plastik [19].

Papan komposit berbasis serat alam, yang umumnya terbuat dari serat tanaman seperti bambu, kenaf, rami, dan lainnya, memiliki potensi untuk menggantikan material konvensional dalam berbagai aplikasi,

baik itu di sektor konstruksi maupun industri lainnya [3]. Serat alam menawarkan sejumlah keunggulan, seperti kekuatan mekanik yang baik, ketahanan terhadap beban, serta sifatnya yang ringan dan mudah diolah [5]. Selain itu, proses produksi material ini cenderung lebih ramah lingkungan karena meminimalkan penggunaan bahan kimia berbahaya dan energi yang tinggi [19].

Keunggulan teknis dari serat alami dalam komposit ini juga tak dapat diabaikan. Serat tersebut memiliki kekuatan tarik dan lentur yang baik, bobot ringan, serta mudah dibentuk dan diproses, menjadikannya menarik untuk berbagai sektor seperti interior bangunan, industri otomotif, dan perabot rumah tangga [20]. Namun, meskipun sifat mekaniknya menjanjikan, aspek ketahanan terhadap api masih menjadi sorotan utama, khususnya dalam aplikasi yang membutuhkan standar keselamatan tinggi.

Sebagai ilustrasi, menurut laporan *European Panel Federation* [9], rata-rata emisi karbon dari proses produksi papan partikel konvensional mencapai sekitar 0,45–0,65 kg CO₂-eq per kilogram produk. Sebaliknya, papan komposit berbasis limbah biomassa atau serat alam yang dirancang dengan prinsip rendah energi dapat menurunkan angka ini hingga di bawah 0,30 kg CO₂-eq/kg, tergantung pada jenis bahan dan teknologi produksinya. Dalam studi lain oleh [5] disebutkan bahwa emisi ideal untuk papan komposit ramah lingkungan seharusnya tidak melebihi 0,25 kg CO₂-eq/kg agar memenuhi kriteria material hijau kelas A menurut standar ISO 14067:2018 terkait jejak karbon produk [21].

Tantangan utama dalam pengembangan papan komposit ini adalah kerentanannya terhadap nyala api akibat kandungan bahan organik yang mudah terbakar. Selain itu, variasi kualitas bahan baku dan teknik produksi turut memengaruhi performa material secara keseluruhan [13]. Oleh sebab itu, penting dilakukan tinjauan menyeluruh terhadap performa tahan api dari papan komposit berbasis serat alam, yang meliputi komposisi bahan, penambahan zat aditif penghambat api, dan parameter pengujian seperti indeks oksigen minimum (LOI), laju penyebaran api, serta waktu nyala. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai potensi, kekuatan, dan keterbatasan papan komposit berbasis serat alam, serta memberikan rekomendasi yang dapat mendorong pengembangan dan pemanfaatan material ini di masa depan.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian tentang kinerja papan komposit ramah lingkungan terhadap api akan menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis metode kajian pustaka sistematis (*systematic literature review*) guna mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai hasil studi yang membahas performa ketahanan api papan komposit berbasis serat alami. Metodologi ini dipilih untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai tren material, formulasi, serta teknik fabrikasi yang mempengaruhi sifat tahan api papan komposit ramah lingkungan.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur ilmiah terindeks pada basis data terkemuka, seperti ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, dan Google Scholar, dengan rentang tahun terbit 2017–2024 guna menjamin relevansi dan aktualitas data. Kata kunci pencarian meliputi kombinasi seperti: “*natural fiber composite board*”, “*fire resistance*”, “*LOI natural composite*”, “*eco-friendly flame retardant*”, dan “*thermal degradation in bio-composites*”.

Kriteria inklusi yang diterapkan meliputi, Studi eksperimental atau kuantitatif yang mengukur nilai LOI, laju pembakaran, atau waktu nyala, Menggunakan bahan utama alami atau bioresin, Memiliki metode karakterisasi standar (ASTM, ISO, atau metode pengujian kebakaran yang setara), Artikel ditulis dalam bahasa Indonesia dan diterbitkan dalam jurnal bereputasi.

Dari hasil pencarian awal yang menghasilkan lebih dari 90 publikasi, dilakukan penyaringan berdasarkan abstrak dan isi utama, hingga diperoleh 21 studi utama yang dipilih untuk dianalisis lebih lanjut dalam kajian ini. Setiap studi dianalisis berdasarkan parameter teknis ketahanan api serta dikaji kesesuaian formulasi, aditif, dan metode fabrikasi yang digunakan. Selain itu, beberapa publikasi tambahan digunakan untuk memperkuat pembahasan teoritis terkait tantangan, peluang, dan aspek keberlanjutan dari aplikasi papan komposit tahan api.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Komponen yang Mempengaruhi Ketahanan Api pada Komposit Ramah Lingkungan

Ketahanan api pada papan komposit ramah lingkungan ditentukan oleh sinergi dari beberapa elemen utama dalam struktur materialnya. Tiga komponen paling berpengaruh dalam performa ini meliputi jenis serat yang digunakan, perekat atau matriks pengikat, dan keberadaan zat aditif yang berfungsi sebagai penghambat nyala api. Ketiganya berperan dalam menentukan reaktivitas termal, stabilitas struktural saat pemanasan, dan kemampuan material untuk memperlambat penyebaran api.

- **Serat alami**
 Serat alami, seperti serat kelapa, sekam padi, kenaf, dan rami, menjadi bahan utama dalam komposit ramah lingkungan karena sifatnya yang dapat diperbaharui dan mudah terurai. Namun, kandungan utama dari serat-serat ini terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin komponen organik yang mudah terbakar dan memiliki titik nyala rendah. Oleh karena itu, keberadaan serat alami dalam komposit sebenarnya meningkatkan risiko kebakaran apabila tidak diimbangi dengan modifikasi struktur atau pelapisan pelindung. Penelitian oleh [10] menunjukkan bahwa serat kelapa tanpa perlakuan memiliki laju pembakaran yang cukup tinggi, tetapi perlakuan dengan larutan boraks-borax mampu meningkatkan waktu tahan api secara signifikan.
- **Perekat atau Matriks Resin**
 Fungsi utama dari matriks resin adalah menyatukan serat dalam struktur komposit dan mentransfer beban secara merata. Dalam konteks ketahanan api, jenis resin yang digunakan memiliki peran penting dalam memengaruhi kestabilan termal dan emisi asap. Resin berbasis fenol-formaldehida dan bioresin lignin diketahui memiliki ketahanan api lebih baik dibanding resin poliester konvensional. Resin tersebut cenderung menghasilkan lapisan karbon pelindung (*char layer*) ketika terbakar, yang memperlambat difusi oksigen dan panas ke dalam struktur komposit. Studi oleh [18] menunjukkan bahwa resin yang dimodifikasi dengan komponen bioaktif seperti tanin atau lignin tidak hanya memperkuat ikatan antar serat, tetapi juga meningkatkan performa flame-retardant tanpa perlu aditif eksternal dalam jumlah besar.
- **Zat Aditif Tahan Api**
 Agar komposit berbahan organik dapat memenuhi standar keselamatan kebakaran, diperlukan penambahan zat penghambat api. Aditif ini bekerja dengan berbagai mekanisme, seperti mempercepat pembentukan lapisan karbon (*char*), mengeluarkan uap air pendingin, atau menghambat reaksi radikal bebas dalam pembakaran. Beberapa jenis aditif yang banyak digunakan antara lain aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$), magnesium hidroksida ($Mg(OH)_2$), ammonium polyphosphate (APP), dan bahan berbasis fosfor organik. Aditif anorganik umumnya bersifat non-toksik, namun membutuhkan dosis tinggi untuk memberikan efek maksimal, yang kadang mengurangi sifat mekanik komposit. Sementara itu, flame retardant berbasis fosfor dapat diformulasikan dalam dosis lebih rendah dan menghasilkan lapisan pelindung karbon yang padat. Menurut [15], penambahan APP dalam komposit sekam padi meningkatkan nilai LOI dari 22% menjadi lebih dari 30%, dengan penurunan signifikan pada laju penyebaran nyala api.

3.2 Kinerja Papan Komposit Ramah Lingkungan Tahan Api

Papan komposit berbahan serat alami kini banyak dikembangkan sebagai alternatif material yang lebih ramah lingkungan. Meskipun kuat dan efisien, material ini masih memiliki kelemahan dalam hal ketahanan terhadap api. **Tabel 1** menyajikan perbandingan kinerja papan komposit dari berbagai kombinasi material dan teknik produksi. Parameter yang dianalisis meliputi Limiting Oxygen Index (LOI) sebagai indikator batas minimum oksigen untuk pembakaran, waktu nyala, dan laju pembakaran. Data ini bertujuan memberikan gambaran mengenai efektivitas kombinasi material tertentu dalam meningkatkan ketahanan api papan komposit ramah lingkungan.

Tabel 1. Kinerja Tahan Api Berbagai Jenis Papan Komposit Ramah Lingkungan

No	Jenis Serat	Jenis Resin	Aditif Flame Retardant	Metode Produksi	Limiting Oxygen Index (LOI, %)	Waktu Nyala (Detik)	Laju Pembakaran (mm/menit)
1	Kenaf	Fenolik	APP	Hot Pressing	31,5	48	9,2
2	Serat Kelapa	Epoksi	$Mg(OH)_2$	Cold Pressing	29	43	11,3
3	Sekam Padi	Poliester	Borax	Hot Pressing	25,3	30	15,6
4	Rami	Bio-epoksi	APP	Hot Pressing	30,8	47	10,4
5	Bambu	UF Resin	$Al(OH)_3$	Surface Coating	28,1	39	12,1
6	Jerami Gandum	PF Resin	APP + Borax	Hot Pressing	33	55	8,3
7	Serat Pisang	Bio-Resin	APP	Surface Coating	29,4	41	10,9
8	Hemp	Fenolik	$Mg(OH)_2$	Cold Pressing	26,7	33	13,7
9	Kayu Daur Ulang	PU Resin	Tanpa Aditif	Injection Molding	20,2	21	18,5
10	Flax	Polipropilen	APP	Hot Pressing	30,2	46	10,1

Sumber: [1], [2], [5], [4], [7], [8], [11], [18], [20]

Hasil perbandingan pada **Tabel 1** dapat dilihat adanya perbedaan signifikan dalam kinerja tahan api papan komposit, tergantung pada kombinasi bahan penyusunnya. Dimana dari sepuluh jenis papan komposit menunjukkan bahwa komposisi bahan, teknik fabrikasi, serta jenis aditif flame retardant memiliki peran krusial dalam menentukan performa ketahanan terhadap api. Untuk memahami lebih lanjut faktor-faktor yang memengaruhi performa tersebut, analisis selanjutnya difokuskan pada pengaruh jenis serat, jenis resin, penggunaan aditif flame retardant, serta metode produksi yang digunakan.

- **Pengaruh Jenis Serat dan Resin**

Dari data yang dianalisis, terlihat bahwa serat kenaf, rami, dan serat pisang memberikan performa terbaik dalam hal nilai LOI yang lebih tinggi ($\geq 30\%$), serta waktu nyala yang relatif lebih lama (≥ 45 detik). Hal ini menunjukkan bahwa jenis serat dengan kepadatan tinggi dan struktur lignoselulosa yang lebih kompleks cenderung lebih tahan terhadap nyala api. Jenis resin juga berpengaruh besar. Komposit yang menggunakan fenolik dan bio-epoksi resin menunjukkan performa termal dan ketahanan api lebih unggul dibanding resin sintetik seperti poliester dan polipropilen. Resin fenolik, secara khusus, membentuk lapisan arang (char layer) yang padat saat terbakar, yang mampu memperlambat penetrasi panas dan oksigen [16].

- **Efektivitas Aditif Flame Retardant**

Ammonium polyphosphate (APP) menjadi aditif paling umum yang digunakan dalam data literatur, dan terbukti memberikan efek perlindungan yang signifikan. Komposit kenaf + fenolik + APP, misalnya, menghasilkan LOI sebesar 31,5% dan laju pembakaran hanya 9,2 mm/menit salah satu hasil terbaik dalam tabel. APP bekerja melalui mekanisme pembentukan lapisan pelindung fosfat di permukaan material saat terbakar, sehingga menghambat penyebaran api secara efisien. Sebaliknya, panel yang tidak menggunakan aditif (misalnya serat kayu daur ulang + PU resin tanpa aditif) menunjukkan nilai LOI yang paling rendah (20,2%) dan laju pembakaran tertinggi (18,5 mm/menit), menunjukkan tingginya risiko penyalan cepat dan penyebaran api yang luas.

- **Peran Metode Produksi**

Metode fabrikasi juga sangat menentukan hasil akhir. Teknik hot pressing terbukti lebih unggul dalam meningkatkan densitas dan homogenitas bahan, sehingga menghasilkan ketahanan api yang lebih baik. Produk yang dihasilkan dengan metode ini menunjukkan rata-rata LOI $\geq 30\%$ dan waktu nyala di atas 45 detik. Sebaliknya, metode seperti cold pressing atau injection molding menghasilkan struktur yang lebih berpori, yang mempercepat infiltrasi oksigen dan panas. Metode surface coating juga menunjukkan hasil kompetitif, terutama pada bambu dan serat pisang, dengan menciptakan penghalang eksternal yang memperlambat penetrasi panas ke dalam lapisan dalam material.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketahanan api dari papan komposit sangat bergantung pada komposisi dan metode produksi. Beberapa pencapaian performa ketahanan api yang baik dilaporkan pada kombinasi serat kenaf dengan resin fenolik dan aditif APP, di mana waktu tahan api meningkat dua kali lipat dibanding papan komposit biasa. Selain itu, metode seperti hot pressing dan surface coating dengan bahan pelindung api terbukti meningkatkan resistansi terhadap penyebaran api. Beberapa studi juga menggunakan simulasi termal untuk memprediksi suhu pembakaran dan distribusi panas pada material.

3.3 Tantangan dan Peluang Pengembangan dari Papan Komposit Tahan Api

Dalam upaya memajukan papan komposit ramah lingkungan agar mampu bersaing dengan material tahan api konvensional, terdapat beberapa isu teknis dan struktural yang menjadi perhatian utama. Tantangan-tantangan tersebut tidak hanya berasal dari aspek fungsionalitas material, tetapi juga menyangkut sisi ekonomi, keberlanjutan energi, serta daya tahan material dalam penggunaan jangka panjang.

- **Keterbatasan Performa**

Salah satu tantangan mendasar adalah keterbatasan kemampuan papan komposit ramah lingkungan untuk mencapai level ketahanan api yang sama dengan material industri berbasis mineral atau sintetik, seperti papan gypsum atau fiber-cement. Hal ini disebabkan oleh sifat organik dari serat alami dan beberapa bioresin yang memiliki titik nyala rendah dan menghasilkan banyak asap saat terbakar. Walaupun penambahan aditif flame retardant terbukti mampu meningkatkan performa, sering kali hal ini tidak cukup untuk memenuhi standar internasional seperti ASTM E84 atau EN 13501 secara konsisten. Studi oleh [17] menunjukkan bahwa papan komposit berbahan dasar serat alami meskipun telah ditambahkan ammonium polyphosphate masih menunjukkan laju

pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan panel berbahan anorganik. Hal ini menandakan perlunya optimalisasi sistem penghambat api dan modifikasi struktural lebih lanjut.

- **Biaya dan Ketersediaan**

Meskipun bahan baku seperti serat alami relatif melimpah dan terjangkau, komponen-komponen tambahan seperti aditif tahan api berbasis fosfor, resin tahan panas, dan proses fabrikasi tertentu seperti hot pressing atau perlakuan kimia, masih tergolong mahal dan sulit diakses di beberapa negara berkembang. Hal ini menyebabkan peningkatan biaya produksi secara keseluruhan, yang kemudian menjadi hambatan dalam komersialisasi produk papan komposit tahan api secara luas. Selain itu, tidak semua jenis limbah biomassa atau serat pertanian memiliki kualitas konsisten, sehingga mempengaruhi kestabilan hasil produksi dalam skala besar. Biaya untuk resin bioaktif dan flame retardant ramah lingkungan masih berada 30–50% lebih tinggi dibanding alternatif sintetik konvensional, terutama jika ingin mempertahankan sifat mekanik dan termal yang optimal [11].

- **Energi dan Efisiensi**

Proses produksi papan komposit tahan api membutuhkan perlakuan termal, pengeringan yang presisi, atau pengolahan kimia lanjutan yang membutuhkan konsumsi energi cukup tinggi. Hal ini menjadi tantangan bagi narasi keberlanjutan, karena energi yang digunakan tidak selalu berasal dari sumber terbarukan. Selain itu, upaya pengurangan emisi karbon dalam seluruh siklus hidup produk harus dipertimbangkan. Tanpa pendekatan manufaktur hijau (green manufacturing), penggunaan papan komposit tahan api justru bisa meninggalkan jejak karbon yang lebih besar dibanding bahan konvensional. Dalam publikasinya [12] memberikan informasi bahwa meskipun bahan dasarnya bersifat hijau, proses produksinya seringkali tidak selaras dengan prinsip eco-efficiency karena tingginya kebutuhan energi dan kompleksitas teknis.

- **Stabilitas dan Keawetan Jangka Panjang**

Papan komposit berbasis serat alami cenderung mengalami degradasi secara mekanik dan kimiawi dalam jangka panjang, terutama jika digunakan pada kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kelembaban tinggi, atau paparan sinar UV terus-menerus. Degradasi ini tidak hanya menurunkan sifat mekanik tetapi juga mengurangi kemampuan material dalam menahan penyebaran api. Beberapa bioresin juga menunjukkan kecenderungan mudah terdegradasi secara termal setelah beberapa siklus pemanasan, sehingga membatasi umur pakai produk. Dalam kajian oleh [6] ditemukan bahwa resin berbasis tanin memiliki ketahanan api yang baik pada awalnya, namun mengalami penurunan performa setelah simulasi penuaan termal selama 6 bulan. Hal ini menunjukkan pentingnya pengujian akselerasi umur untuk memastikan stabilitas performa terhadap api dalam jangka panjang.

4. Kesimpulan

Papan komposit ramah lingkungan yang dikembangkan dari serat alami dan bioresin menunjukkan prospek signifikan sebagai alternatif material tahan api yang berkelanjutan. Berdasarkan analisis perbandingan literatur, performa ketahanan api sangat ditentukan oleh kombinasi faktor seperti jenis serat (kenaf, rami), penggunaan resin fenolik atau bioresin, serta penambahan aditif flame retardant seperti APP. Metode fabrikasi hot pressing terbukti meningkatkan performa termal secara konsisten.

Namun demikian, beberapa kendala masih dihadapi dalam implementasi material ini secara luas, di antaranya adalah keterbatasan ketahanan terhadap api dibanding material anorganik konvensional, tingginya biaya produksi akibat aditif dan proses khusus, serta isu keberlanjutan energi selama proses manufaktur. Tantangan tambahan mencakup penurunan stabilitas jangka panjang akibat paparan panas dan kelembaban tinggi.

Diperlukan pendekatan lintas disiplin dalam riset lanjutan, termasuk formulasi bioresin yang lebih stabil, optimalisasi dosis aditif tahan api, serta strategi produksi berenergi rendah yang tetap menjamin kualitas dan keselamatan. Dengan pengembangan yang tepat, papan komposit tahan api berbasis biomassa berpotensi menjadi pilar utama dalam konstruksi hijau masa depan.

5. Referensi

- [1] C. D. C. Dolotina and L. M. T Bo-ot, "Effect of Borax and Boric Acid on Thermal and Flammability Properties of Rice Husk Reinforced Recycled HDPE Composite," *Athens Journal of Technology & Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 43-60, 2022.

- [2] P. C. Gómez, T. Pelzmann, . D. R. Hall, C. Chilian and L. L. Lebel, "Carbon fiber damage evolution under flame attack and the role of impurities," *FAM Fire and Materials an International Journal*, vol. 47, no. 2, pp. 226-240, 2023.
- [3] X. Song, F. Song, X. M. Ding, J. M. Wu, X. H. Wang, F. Wang, R. Feng, X. L. Wang and Y. Z. Wang, "Construction of bio-based ramie fabric/epoxy resin composites with high flame retardant and mechanical performances," *Industrial Crops and Products*, vol. 194, no. 1, pp. 116-281, 2023.
- [4] W. Guo, E. Naderikalali, X. Wang, W. Xing, P. Zhang, L. Song and Y. Hu, "Processing bulk natural bamboo into a strong and flame-retardant composite material," *Industrial Crops and Products*, vol. 138, no. 1, pp. 111-478, 2019.
- [5] Y. Y. Wang, Y. Q. Li, W. B. Zhu and S. Y. Fu, "Strong and fire-resistant bamboo enabled by densification and boron nitride/graphene oxide nanocoating," *Industrial Crops and Products*, vol. 212, no. 1, pp. 118-292, 2024.
- [6] Z. H. Han, X. J. Li, B. Tang, Q. W. Tan, Y. Z. Wang and F. Song, "Thermally insulating, water-resistant, and fire-safety fully bio-based wheat straw composites," *Polymer*, vol. 325, no. 1, pp. 128-287, 2025.
- [7] R. O. García, M. Monzon, Z. Ortega and E. Cunningham, "Study and fire test of banana fibre reinforced composites with flame retardance properties," *Open Chemistry*, vol. 18, no. 1, pp. 275-286, 2020.
- [8] V. S. Hiremath, D. M. Reddy, R. R. Mutra, A. Sanjeev, T. Dhilipkumar and N. J, "Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites- A comprehensive review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 4053-4063, 2024.
- [9] M. Sain, S. H. Park, S. Panthapulakkal and S. Law, "Flame retardant and mechanical properties of nature fiber-PP composites containing magnesium hydroxide," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 83, no. 2, pp. 363-367, 2004.
- [10] J. S. Renner, R. A. Mensah, L. Jiang and Q. Xu, "Fire Behavior of Wood-Based Composite Materials," *Polymers*, vol. 13, no. 24, pp. 43-52, 2021.
- [11] C. Won, J. W. Kim, D. W. Lee, B. S. Kim and J.-I. Song, "Impact and Fire Retardant Properties of Flax Fiber Reinforced Nanoclay Composites by Taguchi Method," *Composites Research*, vol. 26, no. 3, pp. 189-194, 2013.
- [12] N. M. Nurazzi, M. M. Asyraf, A. Khalina, N. Abdullah, H. A. Aisyah, S. A. rafiqah, F. A. Sabaruddin, S. H. Kamarudin, M. F. Norrahim, R. A. Ilyas and S. M. Sapuan, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications," *Polymers*, vol. 13, no. 646, pp. 1-42, 2021.
- [13] D. R. Putra, H. Sosiati and C. Budiyanoro, "Karakterisasi Sifat – Sifat Tarik Komposit Laminat Hibrida Kenaf/E-Glass Yang Difabrikasi Dengan Matriks Polypropylene," *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, vol. 1, no. 1, pp. 41-45, 2017.
- [14] X. Lu, A. F. Lee and X. Gu, "Improving the flame retardancy of sustainable lignin-based epoxy resins using phosphorus/nitrogen treated cobalt metal-organic frameworks," *Materials Today Chemistry*, vol. 26, no. 1, pp. 101-184, 2022.
- [15] M. H. Guo, Y. Wang and J. L. Fu, "Flame retardancy of lignin-based environment-friendly fiberboard," *Journal of Building Materials*, vol. 14, no. 5, pp. 649-652, 2011.
- [16] A. Arya, A. Ahamad, P. Kumar and A. Chandra, "A review on lignin based nanocomposites: Fabrication, characterization and application," *Materials Today Proceedings*, vol. 7, no. 8, pp. 1-8, 2023.
- [17] C. Elanchezhian, B. V. Ramnath, G. Ramakrishnan, M. Rajendrakumar, V. Naveenkumar and M. K. Saravanakumar, "Review on mechanical properties of natural fiber composites.," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 1785-1790, 2018.
- [18] M. Y. Khalid, A. A. Rashid, Z. U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad and A. A. Zaidi, "Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications," *Results in Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-7, 2021.

-
- [19] G. C. Ding, "3 - Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview," *Eco-efficient Construction and Building Materials*, vol. 1, no. 1, pp. 38-62, 2014.
- [20] E. M. Ezeh, "Comparative analysis of natural and synthetic fire retardant additives in Banana Peduncle fibre reinforced Polyester Composites," *Moroccan Journal of Chemistry*, vol. 9, no. 3, pp. 530-541, 2021.
- [21] International Organization for Standardization. *Greenhouse Gases: Carbon Footprint of Products: Requirements and Guidelines for Quantification*. International Organization for Standardization, 2018.