

SINTESIS PAPAN KOMPOSIT INOVATIF BERBASIS ABU INSINERATOR DAN SERBUK KAYU SEBAGAI SOLUSI PENGELOLAAN LIMBAH PADAT

Ayu Kartika, Sefrilita Risqi Adikaning Rani*, Fitriyanti

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Jl. H. M. Yasin Limpo No. 36 Kel. Romang Polong, Gowa, Sulawesi Selatan, 92118, Indonesia.

*email: sefrilita.rani@uin-alauddin.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah padat, khususnya abu insinerator dan limbah serbuk kayu, mendorong pengembangan material alternatif yang ramah lingkungan dan bernilai guna. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis papan komposit inovatif berbasis abu insinerator dan serbuk kayu dengan matriks poliester serta mengevaluasi sifat fisis dan mekaniknya. Papan komposit dibuat menggunakan metode hot press pada suhu 120 °C dengan tekanan 25 kg/cm² selama 10 menit. Pengujian dilakukan terhadap densitas, Modulus of Elasticity (MOE), dan Modulus of Rupture (MOR). Seluruh data mekanik dikonversi ke satuan SI (MPa) untuk memastikan konsistensi dengan standar internasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu insinerator hingga 60% meningkatkan densitas hingga 0,9764 g/cm³ dan menghasilkan nilai MOE maksimum sebesar 192,77 MPa, yang menunjukkan kekakuan lentur yang tinggi. Nilai MOR tertinggi sebesar 21,57 MPa masih sedikit di bawah standar 25,5 MPa yang ditetapkan oleh Japanese Industrial Standards JIS A 5905 untuk MDF tipe 25. Hasil ini menunjukkan adanya kompromi antara peningkatan kekakuan dan penurunan kekuatan patah akibat sifat rapuh partikel abu. Secara keseluruhan, papan komposit ini berpotensi digunakan untuk aplikasi non-struktural yang memerlukan kekakuan tinggi.

Kata Kunci: Abu Insinerator; Papan Komposit; Serbuk Kayu; Poliester; Sifat Fisis; Sifat Mekanik.

ABSTRACT

[Title: Synthesis of an Innovative Composite Board Based on Incinerator Ash and Wood Sawdust as a Solution for Solid Waste Management] The increasing volume of solid waste, particularly incinerator ash and wood residues, has intensified the need for environmentally sustainable and value-added materials. This study aims to synthesize an innovative composite board based on incinerator ash and wood sawdust using polyester resin as the matrix and to evaluate its physical and mechanical properties. The composite boards were fabricated using a hot-press method at 120 °C under a pressure of 25 kg/cm² for 10 minutes. The samples were characterized in terms of density, Modulus of Elasticity (MOE), and Modulus of Rupture (MOR). All mechanical properties were converted into SI units (MPa) to ensure consistency with international standards. The results show that increasing the incinerator ash content up to 60% improves the density to 0.9764 g/cm³ and produces a maximum MOE of 192.77 MPa, indicating high flexural stiffness. Meanwhile, the highest MOR obtained was 21.57 MPa, which is slightly below the minimum requirement of 25.5 MPa specified by Japanese Industrial Standards JIS A 5905 for MDF type 25. These findings suggest a trade-off between stiffness and strength due to the brittle nature of mineral ash particles. Overall, the developed composite board is suitable for non-structural applications requiring high stiffness.

Keywords: Incinerator Ash; Composite Board; Wood Sawdust; Polyester; Physical Properties; Mechanical Properties.

PENDAHULUAN

Peningkatan volume sampah perkotaan menimbulkan tantangan besar bagi pengelolaan limbah padat di banyak negara termasuk Indonesia. Salah satu teknologi yang banyak digunakan untuk mengurangi volume dan risiko patogen pada sampah adalah insinerasi. Proses pembakaran sampah pada suhu tinggi yang menghasilkan energi, gas buang, dan residu padat berupa abu. Namun, abu hasil insinerasi umumnya masih banyak dibuang atau ditimbun. Padahal abu hasil insenerasi itu mengandung partikel

mineral yang berpotensi dimanfaatkan kembali dalam material konstruksi. Pemanfaatan abu insinerator sebagai bahan baku substitusi dapat menurunkan beban *landfill* sekaligus menghemat bahan baku primer (Chen et al., 2023). Banyak studi memanfaatkan abu untuk beton atau bahan bangunan berat, namun penelitian tentang apakah abu insinerator yang diaplikasikan dalam papan poliester menimbulkan risiko pelindian logam berat pada kondisi yang lain seperti untuk papan komposit masih terbatas (Poranek et al., 2023).

Limbah serbuk kayu (*sawdust*) dari industri pengolahan kayu adalah sumber biomassa berskala besar yang sering diperlakukan sebagai limbah. Serbuk kayu telah banyak dieksplorasi sebagai filler atau pengisi pada papan komposit karena ketersediaannya, sifat lignoselulosa, dan biaya bahan bakunya murah (Novizal et al., 2025). Kombinasi serbuk kayu dengan matriks polimer telah menunjukkan potensi untuk menghasilkan panel dengan sifat fisis dan mekanik yang memadai untuk aplikasi non-struktural (Jan et al., 2025).

Penggabungan abu insinerator sebagai filler anorganik dengan serbuk kayu sebagai filler organik di dalam matriks poliester membuka peluang pengembangan papan komposit bernilai guna tinggi sekaligus solusi ekonomis bagi pengelolaan limbah padat (Patsidis & Souliotis, 2023). Studi-studi pada fly ash dan abu lain telah menunjukkan bahwa partikel abu dapat berperan sebagai filler efektif dalam matriks polimer. Partikel abu dapat memperbaiki kekerasan permukaan seperti yang diungkapkan dalam penelitian Tambrallimath et al., (2022). Pada penelitiannya menunjukkan peningkatan kekerasan dan beberapa sifat mekanik pada komposit polimer yang diberi fly ash, dengan optimasi fraksi partikel (Tambrallimath et al., 2022). Menurut penelitian Meena et al., (2023) yaitu terkait konsentrasi fly ash terhadap sifat termo-mekanik polimer menunjukkan ada titik optimum (mis. ~2 wt% pada beberapa studi) di mana kekuatan kompresi termal membaik, tetapi kelebihan filler dapat menurunkan sifat lentur karena peningkatan kerapatan void atau poor dispersion (Meena et al., 2023). Selain itu penggunaan limbah dapat mengurangi biaya fabrikasi material (Mort et al., 2022). Umumnya dalam pembuatan papan komposit diperlukan mengurangi biaya material, dan mengubah sifat termal dan mekanik. Hal ini bergantung pada sifat fisiko-kimia abu (ukuran partikel, komposisi mineral, adanya kontaminan) dan cara perlakuan sebelum pencampuran.

Untuk produk papan, standar kualitas seperti JIS A 5908 (Particleboards) memberikan acuan batas kerapatan (density), nilai *Modulus of Elasticity* (MOE) dan *Modulus of Rupture* (MOR) minimal, serta aspek inspeksi lain yang harus dipertimbangkan ketika mengusulkan bahan alternatif. Kerapatan panel berhubungan erat dengan sifat mekanik. Jika semakin padat, umumnya semakin tinggi MOE/MOR. Namun pemenuhan standar juga dipengaruhi oleh kualitas ikatan filler-matrix dan distribusi partikel. JIS mencantumkan bahwa untuk produk particleboard yang memenuhi kualitas standar umumnya density $\geq 0,40 \text{ g/cm}^3$ dan pada beberapa klasifikasi atas hingga $0,90 \text{ g/cm}^3$. JIS mendefinisikan beberapa kelas

bending strength minimal ($\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$) untuk berbagai tipe board seperti Type 8 : $\geq 8.0 \text{ N/mm}^2$ (MPa), Type 13 : $\geq 13.0 \text{ N/mm}^2$ (MPa), Type 18 : $\geq 18.0 \text{ N/mm}^2$ (MPa), Type 24-10 (OSB-type): lengthwise $\geq 24.0 \text{ N/mm}^2$ and widthwise $\geq 10.0 \text{ N/mm}^2$. Standar JIS A 5905 (2003) untuk MDF tipe 25 adalah $\geq 250,5 \text{ kgf/cm}^2$ (. JIS menyatakan nilai minimal Young's modulus JIS A 5908, EN 312, dan ANSI A208.1, yang hanya berada pada kisaran 138–208 kgf/cm^2 (setara 1,36–2,04 GPa) (JIS A 5908: Particleboards, n.d.).

Sebagian besar studi mengenai limbah abu dalam polimer memfokuskan pada satu jenis filler. Masih sedikit penelitian membahas kombinasi abu anorganik dengan filler lignoselulosa dan bagaimana rasio kedua filler memengaruhi penyebaran, adhesi antar-fase, dan sifat akhir papan. Optimalisasi rasio abu:serbuk kayu dan pengaruhnya pada MOE, MOR, dan kerapatan masih sedikit kajian. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada pembuatan dan karakterisasi papan komposit inovatif yang memanfaatkan abu hasil pembakaran sampah dan limbah serbuk kayu dengan penambahan poliester sebagai bahan pengikat. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan material alternatif untuk aplikasi konstruksi ringan serta solusi efektif dalam pengelolaan limbah padat perkotaan.

METODE

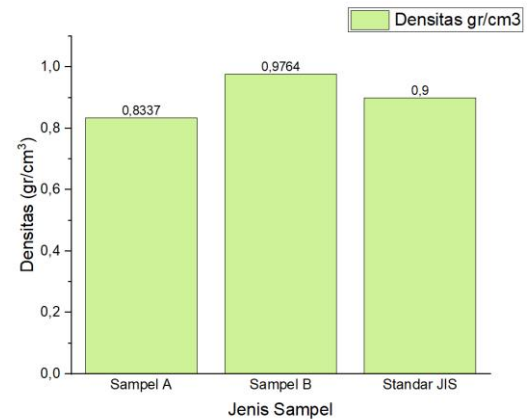
Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan beberapa tahapan utama, yaitu persiapan bahan, sintesis papan komposit, serta pengujian sifat fisis dan mekanik. Bahan dasar yang digunakan terdiri atas abu hasil pembakaran sampah dari insinerator, serbuk kayu halus, dan resin poliester tak jenuh sebagai matriks pengikat dengan penambahan katalis *Methyl Ethyl Ketone Peroxide* sebagai inisiator proses polimerisasi. Abu insinerator terlebih dahulu dikeringkan dan diayak hingga lolos ayakan 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam, sedangkan serbuk kayu dikeringkan pada suhu $105 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam guna mengurangi kadar air. Campuran bahan kemudian ditimbang sesuai perbandingan komposisi yang telah ditentukan dan dihomogenkan menggunakan metode pencampuran (mixing method). Setelah tercampur merata, campuran dimasukkan ke dalam cetakan baja berukuran $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, kemudian dipress menggunakan mesin hot press pada suhu $120 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan tekanan 25 kg/cm^2 selama 10 menit. Papan komposit yang dihasilkan dikeluarkan dari cetakan dan didinginkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilakukan

pemotongan sampel uji. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat fisis berupa kerapatan (densitas) dan sifat mekanik yang meliputi *Modulus of Elasticity* (MOE) serta *Modulus of Rupture* (MOR). Uji mekanik dilakukan dengan metode lentur tiga titik (three-point bending test) sesuai dengan standar JIS A 5908:2003. Nilai MOE dan MOR dihitung berdasarkan kurva beban dan defleksi menggunakan persamaan baku, dan setiap pengujian diulang minimal tiga kali untuk memperoleh data rata-rata yang representatif. Selanjutnya, hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai densitas, MOE, dan MOR antarvariasi komposisi serta dievaluasi kesesuaiannya terhadap batas mutu yang ditetapkan dalam standar JIS A 5908:2003. Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan komposisi optimum papan komposit dan menilai potensi pemanfaatan abu insinerator sebagai bahan alternatif ramah lingkungan dalam pembuatan material bangunan berbasis polimer. Variasi komposisi bahan pada penelitian ini terdiri atas dua jenis sampel yang dibedakan berdasarkan perbandingan antara resin poliester dan abu insinerator, dengan jumlah serbuk kayu yang dibuat konstan. Sampel A dibuat dengan komposisi 45% poliester, 45% abu insinerator, dan 10% serbuk kayu, sedangkan sampel B menggunakan komposisi 30% poliester, 60% abu insinerator, dan 10% serbuk kayu. Variasi ini dirancang untuk mengetahui pengaruh peningkatan kadar abu insinerator terhadap sifat fisis dan mekanik papan komposit yang dihasilkan. Komposisi serbuk kayu dijaga tetap pada 10% agar kontribusi bahan organik sebagai filler lignoselulosa tetap konsisten pada setiap sampel, sementara variasi rasio antara abu dan poliester diharapkan dapat memperlihatkan perbedaan karakteristik kerapatan, kekakuan (MOE), serta kekuatan lentur (MOR) dari papan komposit. Untuk meningkatkan kevalidan data, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali (triplo) dan dilaporkan dalam bentuk nilai rata-rata. Seluruh nilai MOE dan MOR yang semula dinyatakan dalam satuan kgf/cm² dikonversi ke satuan MPa (1 kgf/cm² = 0,098 MPa) agar sesuai dengan standar internasional seperti JIS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data densitas (gambar 1) yang telah diukur menunjukkan bahwa Sampel B ($\approx 0,976 \text{ gr/cm}^3$) memiliki densitas lebih tinggi dari standar JIS ($\approx 0,90 \text{ gr/cm}^3$), sedangkan Sampel A ($\approx 0,834 \text{ gr/cm}^3$) berada di bawah standar. Nilai densitas merupakan indikator primer mengenai derajat kompaksi matriks partikel dengan perekatnya yang dapat mempengaruhi sifat mekanik bahan. Pernyataan ini konsisten dengan literatur yang menempatkan

densitas sebagai variabel dominan yang mempengaruhi MOE, MOR, dan stabilitas dimensi pada papan komposit dari limbah kayu(Amarasinghe et al., 2024).



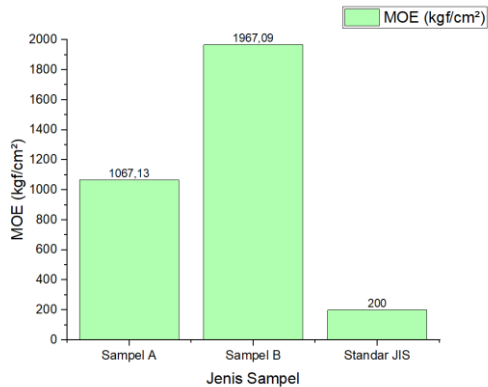
Gambar 1. Data pengukuran densitas

Nilai densitas menunjukkan bahwa Sampel B ($0,976 \text{ g/cm}^3$) telah melampaui standar JIS ($\sim 0,90 \text{ g/cm}^3$), yang mengindikasikan struktur komposit yang lebih padat dan homogen. Densitas yang tinggi meningkatkan kontak antar partikel sehingga mekanisme transfer tegangan menjadi lebih efektif. Nilai densitas pada Sampel B ($\approx 0,976 \text{ g/cm}^3$) mengindikasikan bahwa perancangan campuran ditinjau dari proporsi abu incinerator, serbuk kayu dan perekat polyester berhasil menghasilkan papan komposit yang rapat dan homogen. Kerapan itunjuga dipengaruhi oleh parameter pemadatan atau pressing seperti suhu waktu dan tekanannya. Densitas ini umumnya menjadi informasi awal terhadap kontak antar partikel sehingga adhesi mekanis dan mekanisme transfer tegangan menjadi lebih efektif. Lebih-lebih menurut penelitian terbaru, ada banyak potensi yang bisa dilakukan dengan memanfaatkan abu biomassa dan abu industri pembuatan papan komposit. Pemanfaatan abu biomassa ini dapat meningkatkan nilai guna dari abu tersebut. Namun proporsi komposisi penggunaan abu harus terjaga agar densitas dan strukturnya tetap terjaga. Hal ini bisa dikontrol dengan proses fabrikasi dan mengatur ukuran partikel yang harus dioptimalkan (Pedreño-Rojas et al., 2024).

Tabel 1. Konversi hasil pengukuran rata-rata nilai MOE dan MOR

Parameter	kgf/cm ²	MPa
MOE A	1067,13	104,58
MOE B	1967,09	192,77
Standar JIS (MOE)	138 – 208	13,5 – 20,4
MOR A	180,36	17,67
MOR B	220,01	21,57

Standar JIS (MOR)	260	25,5
--------------------------	-----	------



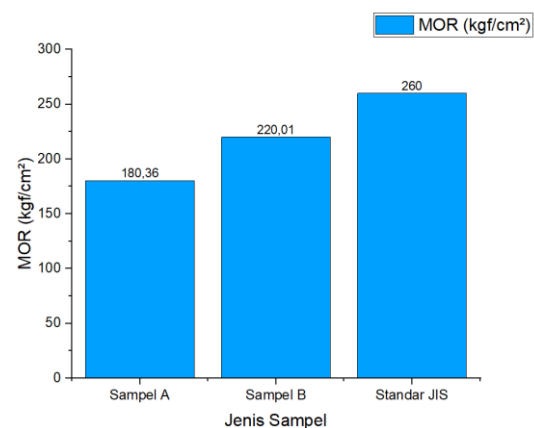
Gambar 2. Data Pengukuran Modulus of Elastic (MoE)

Hasil pengukuran Modulus of Elasticity (MOE) pada Gambar 2 menunjukkan bahwa komposit Sampel A memiliki MOE sebesar 1067,13 kgf/cm² ($\approx 104,58$ MPa), sedangkan Sampel B mencapai 1967,09 kgf/cm² ($\approx 192,77$ MPa). Kedua nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan standar papan partikel konvensional yang umum digunakan, seperti JIS A 5908, EN 312, dan ANSI A208.1, yang hanya berada pada kisaran 138–208 kgf/cm² (setara 13,5 – 20,4MPa). Dengan demikian, komposit berbahan limbah yang disintesis dalam penelitian ini menunjukkan kekakuan lentur 5–10 kali lebih tinggi dari papan komersial standar. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar abu insinerator dalam komposit memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekakuan material. Nilai MOE yang lebih tinggi pada Sampel B menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan deformasi elastis ketika diberikan beban lentur.

Peningkatan MOE pada kedua sampel, terutama Sampel B, mengindikasikan bahwa keberadaan abu insinerator berperan sebagai mineral filler yang memperbaiki struktur internal komposit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa abu padat dapat meningkatkan MOE karena partikel mineral meningkatkan densitas, mengurangi deformasi, dan meningkatkan load-bearing capacity papan komposit. Tian et al. (2021) melaporkan bahwa abu insinerator dengan kandungan silika tinggi dapat meningkatkan modulus elastisitas hingga 150–300% pada komposit matriks lignoselulosa (Tian et al., 2021). He et al. (2022) menemukan bahwa fly ash meningkatkan micro-interlocking antar partikel, sehingga

meningkatkan MOE komposit bio-based dari 1–2 GPa menjadi 2–4 GPa (He et al., 2022). Dengan demikian, pada penelitian ini nilai MOE papan komposit meningkat hingga 1967 kgf/cm² ($\approx 19,3$ MPa) sangat mungkin disebabkan oleh reinforcement mineral dari abu insinerator, yang menambah kekakuan dan stabilitas mekanik. Fenomena ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penambahan filler mineral dapat meningkatkan nilai modulus elastisitas karena sifatnya yang lebih kaku dibandingkan matriks polimer. Namun demikian, peningkatan kekakuan ini umumnya diikuti dengan penurunan fleksibilitas material, sehingga diperlukan keseimbangan komposisi untuk memperoleh sifat mekanik yang optimal.

Data densitas (gambar 1) sebelumnya (0,8337 g/cm³ untuk Sampel A dan 0,9764 g/cm³ untuk Sampel B) juga mendukung nilai MOE. Hal ini dikarenakan nilai MOE sangat dipengaruhi oleh densitas papan. Semakin tinggi densitas, semakin tinggi MOE akibat ikatan antar partikel yang lebih kompak. Penelitian oleh Kairyte et al., (2019) menunjukkan korelasi kuat antara densitas dan peningkatan MOE pada papan partikel berbahan limbah biomassa (Kairyte et al., 2019). Desiasni et al. (2023) melaporkan bahwa MOE mencapai 2–3 kali lipat pada komposit limbah berdensitas $>0,9$ g/cm³ (Desiasni et al., 2023).



Gambar 3. Data Pengukuran Modulus of Recapture

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai Modulus of Rupture (MOR) papan komposit hasil sintesis berbasis abu insinerator dan serbuk kayu berada pada kisaran 180,36 kgf/cm² ($\approx 17,67$ MPa) untuk Sampel A dan 220,01 kgf/cm² ($\approx 21,57$ MPa) untuk Sampel B, sedangkan nilai acuan Standar JIS A 5905 (2003) untuk MDF tipe 25 adalah $\geq 250,5$ kgf/cm² ($\geq 25,5$ MPa). Hasil ini menunjukkan bahwa kedua sampel belum sepenuhnya mencapai standar JIS, meskipun

Sampel B mendekati nilai minimum. Nilai MOR merupakan indikator daya tahan papan terhadap gaya patah saat uji bending tiga titik. Nilai MOR dipengaruhi oleh densitas, ikatan antar partikel, distribusi serbuk kayu, dan kehadiran abu insinerator sebagai bahan pengisi. Literature terbaru menunjukkan bahwa peningkatan fraksi abu umumnya menurunkan MOR. Hal ini dikarenakan sifat kerapuhan mineral yang dapat mengganggu pembentukan ikatan matriks dan serat secara optimal (Martijanti et al., 2023).

Studi oleh Wronka dkk. (2023) menunjukkan bahwa penambahan abu padat (bottom ash) pada komposit berbasis lignoselulosa menurunkan kekuatan patah karena abu memiliki struktur granular yang rapuh dan tidak mampu mentransfer tegangan saat pembebanan bending secara efektif (Wronka & Kowaluk, 2023). Sahin dkk. (2024) juga meneliti pengaruh rasio partikel yakni termasuk residu biomassa seperti sekam padi terhadap MOR dan MOE dari papan partikel. Hasilnya mengonfirmasi tren bahwa bertambahnya konten residu non-kayu sering menurunkan MOR (Şahin & Kaymakçı, 2024). Pada penelitian Mamatha et al (2023) menunjukkan bahwa peningkatan proporsi abu (fly-ash) sering berakibat pada penurunan MOR, tetapi densitas yang lebih tinggi bisa membantu meningkatkan mekanik secara keseluruhan (Mamatha et al., 2023). Penelitian ini berhasil mensintesis papan komposit inovatif berbasis abu insinerator dan serbuk kayu sebagai upaya pemanfaatan limbah padat bernilai tambah. Hasil pengujian sifat mekanik menunjukkan bahwa papan komposit yang dihasilkan memiliki nilai densitas, Modulus of Elasticity (MOE), dan Modulus of Rupture (MOR) yang bervariasi tergantung komposisi material. Sampel dengan proporsi serbuk kayu yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan sifat mekanik yaitu terlihat pada nilai MOE dan MOR apabila dibandingkan sampel dengan kandungan abu insinerator yang lebih besar.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan adanya hubungan trade-off antara kekakuan (MOE) dan kekuatan patah (MOR) pada papan komposit berbasis abu insinerator. Peningkatan kandungan abu mampu meningkatkan kekakuan secara signifikan, namun di sisi lain dapat menurunkan kemampuan material dalam menahan beban hingga patah. Meskipun demikian, kombinasi sifat mekanik yang diperoleh masih menunjukkan performa yang kompetitif dibandingkan material komposit berbasis limbah lainnya. Dengan mempertimbangkan hasil tersebut, papan komposit yang dikembangkan dalam penelitian ini lebih sesuai

untuk aplikasi non-struktural yang memerlukan kekakuan tinggi, seperti panel interior, papan partisi, dan material insulasi. Selain itu, pemanfaatan abu insinerator sebagai bahan baku juga memberikan nilai tambah dari aspek keberlanjutan lingkungan, sehingga material ini memiliki potensi yang kuat untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif ramah lingkungan dalam industri bahan bangunan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa papan komposit berbasis abu insinerator dan serbuk kayu dengan matriks poliester berpotensi dikembangkan sebagai material alternatif ramah lingkungan untuk pengelolaan limbah padat. Variasi komposisi abu insinerator berpengaruh signifikan terhadap sifat fisis dan mekanik papan komposit, di mana peningkatan fraksi abu hingga 60% mampu meningkatkan densitas hingga $0,9764 \text{ g/cm}^3$ dan menghasilkan nilai Modulus of Elasticity (MOE) yang tinggi sebesar $1967,09 \text{ kgf/cm}^2$ ($\approx 192,77 \text{ MPa}$), melampaui persyaratan standar JIS dan menunjukkan kekakuan lentur yang sangat baik. Namun demikian, nilai Modulus of Rupture (MOR) yang diperoleh, meskipun meningkat hingga $220,01 \text{ kgf/cm}^2$ ($\approx 21,57 \text{ MPa}$), masih sedikit di bawah standar JIS A 5905 untuk MDF tipe 25. Secara keseluruhan, papan komposit yang dihasilkan layak untuk aplikasi non-struktural yang memerlukan kekakuan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amarasinghe, I. T., Qian, Y., Gunawardena, T., Mendis, P., & Belleville, B. (2024). Composite Panels from Wood Waste: A Detailed Review of Processes, Standards, and Applications. *Journal of Composites Science*, *8*(10), 417. <https://doi.org/10.3390/jcs8100417>
- Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., & Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *Journal of Building Engineering*, *71*, 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106386>
- Desiasni, R., Azman, N., & Widyawati, F. (2023). Sifat Fisik Dan Mekanik Komposit Papan Partikel Berdasarkan Variasi Ukuran Serbuk Kayu Mahoni (*Swietenia Macrophylla*) Sebagai Material Alternatif: Papan Komposit. *Jurnal Tambora*, *7*(2), 78–83.
- He, Z., Shen, A., Wu, H., Wang, W., Wang, L., & Guo, Y. (2022). Properties and mechanisms of brick-concrete recycled aggregate

- strengthened by compound modification treatment. *Construction and Building Materials*, 315, 125678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125678>
- Jan, M., Singh, A. K., Dugala, N. S., & Shakir, M. H. (2025). Mechanical properties of sawdust filler-reinforced composites: A comprehensive review. *AIP Conference Proceedings*, 3218(1), 040006. <https://doi.org/10.1063/5.0269303>
- JIS A 5908: Particleboards. (n.d.).
- Kairyte, A., Vaitkus, S., & Kremensas, A. (2019). Synthesis of Biocomposite with Different Ratios of Rapeseed Oil Binder/Wood Bark: Mechanical and Hygrothermal Properties. *Key Engineering Materials*, 799, 142–147. *Modern Materials and Manufacturing 2019*. Materials. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.799.142>
- Mamatha, B. S., Sujatha, D., Uday, D. N., & Kiran, M. C. (2023). Properties of flyash based wood geopolymer composite. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, 1(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s44242-023-00030-6>
- Martijanti, M., Sutarno, S., Sukwadi, R., & Wahyu, M. B. (2023). Komparasi sifat mekanik antara komposit epoksi berpenguat abu dan sekam padi. *Dinamika Teknik Mesin*, 13(2), 145–156. <https://doi.org/10.29303/dtm.v13i2.649>
- Meena, R., Hashmi, A. W., Ahmad, S., Iqbal, F., Soni, H., Meena, A., Al-Kahtani, A. A., Pandit, B., Kamyab, H., Payal, H., & Yusuf, M. (2023). Influence of fly ash on thermo-mechanical and mechanical behavior of injection molded polypropylene matrix composites. *Chemosphere*, 343, 140225. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140225>
- Mort, R., Cecon, V. S., Mort, P., McInturff, K., Jiang, S., Vorst, K., & Curtzwiler, G. (2022). Sustainable Composites Using Landfill Bound Materials. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.849955>
- Novizal, N., Yuliyanto, Y., & Rollastin, B. (2025). Pemanfaatan Serbuk Batang Kayu Pusa Sebagai Pembuatan Papan Partikel Terhadap Pengujian Impak. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 17(01), 62–67.
- Patsidis, A. C., & Souliotis, M. (2023). End-Of-Use Fly Ash as an Effective Reinforcing Filler in Green Polymer Composites. *Polymers*, 15(16), 3418. <https://doi.org/10.3390/polym15163418>
- Pedreño-Rojas, M. A., Porrás-Amores, C., Villoria-Sáez, P., Morales-Conde, M. J., & Flores-Colen, I. (2024). Characterization and performance of building composites made from gypsum and woody-biomass ash waste: A product development and application study. *Construction and Building Materials*, 419, 135435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135435>
- Poranek, N., Pizoń, J., Łaźniewska-Piekarczyk, B., Czajkowski, A., & Lagashkin, R. (2023). Recycle Option for Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash (MSWIFA) as a Partial Replacement for Cement in Mortars Containing Calcium Sulfoaluminate Cement (CSA) and Portland Cement to Save the Environment and Natural Resources. *Materials*, 17(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ma17010039>
- Şahin, F., & Kaymakçı, A. (2024). Evaluation of the mechanical and physical properties of particleboards manufactured from rice husk. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 25(1), 81–85. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.1356256>
- Tambrallimath, V., Keshavamurthy, R., Davim, P., Pradeep Kumar, G. S., Pignatta, G., Badari, A., Yunus Khan, T. M., & Badruddin, I. A. (2022). Synthesis and characterization of flyash reinforced polymer composites developed by Fused Filament Fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 810–826. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.059>
- Tian, J., Wang, Y., & Chen, Z. (2021). An improved single particle model for lithium-ion batteries based on main stress factor compensation. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>
- Wronka, A., & Kowaluk, G. (2023). Upcycling of Wood Dust from Particleboard Recycling as a Filler in Lignocellulosic Layered Composite Technology. *Materials (Basel, Switzerland)*, 16(23), 7352. <https://doi.org/10.3390/ma16237352>