

Karakterisasi Termal Dan Fisik Komposit Geopolimer Semen Berpenguat Serat Ijuk Untuk Konstruksi Ramah Lingkungan

Rani Idris^{1*}, Mohamada Jahja¹, Icha Untari Meidji¹, A Indra Wulan Sari Ramadani¹,
Irsan Rahman¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri
Gorontalo, Indonesia

Email Corresponding Author : raniidris183@gmail.com

ABSTRAK

Upaya pengurangan emisi pada sektor konstruksi mendorong pengembangan komposit geopolimer berpenguat serat alam. Berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh serat alam terhadap sifat mekanik dan durabilitas komposit semen, namun data mengenai keterkaitan densitas, porositas, dan konduktivitas termal pada komposit geopolimer semen berpenguat serat ijuk (*Arenga pinnata*) masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sifat fisik dan termal komposit geopolimer semen berbasis serat ijuk dengan variasi rasio serat terhadap matriks. Serat ijuk diberi perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH 5% dan dipotong sepanjang ± 1 cm, kemudian dicampurkan ke dalam matriks semen-pasir dengan rasio volume serat:matriks 1:1, 1:2, dan 1:3. Sampel dicetak dan dikeringkan, lalu diuji densitasnya melalui pengukuran massa dan volume, porositasnya menggunakan metode perendaman air, serta konduktivitas termalnya dengan pengukuran laju aliran panas dan beda suhu antarpermukaan. Hasil menunjukkan bahwa rasio 1:1 menghasilkan densitas tertinggi sebesar 1,832 g/ml dan porositas terendah sebesar 26,28%, yang mencerminkan struktur komposit paling padat dan homogen. Porositas tertinggi diperoleh pada rasio 1:2 dengan nilai 33,16%, sedangkan rasio 1:3 menunjukkan nilai menengah. Nilai konduktivitas termal tertinggi terdapat pada rasio 1:2 sebesar ± 220 W/m·K, sementara rasio 1:3 memberikan konduktivitas termal terendah sekitar 85 W/m·K sehingga lebih berpotensi sebagai material isolatif. Temuan ini memberikan gambaran awal mengenai pengaruh rasio serat ijuk terhadap hubungan densitas, porositas, konduktivitas termal pada komposit geopolimer semen dan menunjukkan potensi material ini sebagai bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan sifat fisik dan termal yang dapat direkayasa.

Kata-kata kunci: *serat ijuk; komposit semen; densitas; porositas; konduktivitas termal*

PENDAHULUAN

Pengembangan material konstruksi alternatif menjadi salah satu topik penting dalam bidang teknik sipil dan rekayasa material, terutama karena tantangan lingkungan dan kebutuhan efisiensi energi pada bangunan modern semakin meningkat. Beton sebagai material konstruksi utama telah menunjukkan keandalan struktural selama lebih dari satu abad, namun memiliki keterbatasan terkait berat jenis yang tinggi, sifat getas, serta dampak lingkungan yang besar

akibat penggunaan semen Portland (Neville, 2011). Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk memodifikasi sifat beton melalui pendekatan teknologi material, termasuk penggunaan bahan aditif, substitusi binder, dan penguatan serat alam.

Secara teoritis, penambahan serat ke dalam material berbasis semen telah dikenal mampu meningkatkan ketangguhan, daktilitas, dan ketahanan retak komposit melalui mekanisme bridging effect serta transfer tegangan antar mikrostruktur material (Mindess et al., 2014). Serat berperan sebagai elemen penguat yang bekerja pada level mikro untuk menahan propagasi retak dan meningkatkan deformasi sebelum keruntuhan terjadi. Dengan demikian, pendekatan fiber-reinforced cementitious composites bukan hanya bertujuan memperkuat struktur, tetapi juga mengubah perilaku mekanik material agar lebih lentur dan berperforma fungsional.

Di Indonesia, potensi pemanfaatan serat alam sebagai bahan penguat komposit berbasis semen semakin mendapat perhatian karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang rendah, serta karakteristik fisik yang kompetitif. Studi awal menunjukkan bahwa serat ijuk memiliki keunggulan dalam ketahanan kelembaban, sifat hidrofobik, serta kestabilan termal yang relatif baik dibandingkan jenis serat alam lainnya (Rusdi, 2020). Selain itu, densitas serat ijuk yang rendah membuka kemungkinan untuk mengembangkan material komposit berstruktur ringan (*lightweight composite*), yang ideal untuk aplikasi bangunan modern maupun rumah tahan iklim tropis. Namun, variasi karakteristik mikrostruktur dan interaksi serat–matriks masih menjadi tantangan yang memerlukan penelitian lanjutan.

Kebutuhan penelitian lebih lanjut juga ditegaskan oleh temuan awal dalam kajian eksperimental serat alam pada sistem komposit berbasis semen, di mana performa material sangat dipengaruhi oleh panjang serat, fraksi volume, perlakuan permukaan, dan metode pencampuran (Sofiah, 2019). Beberapa hasil penelitian menunjukkan peningkatan sifat mekanik yang signifikan, namun belum banyak studi yang menghubungkan secara simultan peran serat terhadap perubahan densitas, porositas, dan konduktivitas termal material. Celah inilah yang menjadi alasan utama pentingnya penelitian material komposit berbasis serat ijuk dalam konteks desain material konstruksi berkelanjutan.

Sektor konstruksi masih menjadi salah satu kontributor utama emisi karbon di berbagai negara, terutama karena penggunaan semen Portland yang membutuhkan energi tinggi dalam proses produksinya serta memakai material berbasis mineral dalam skala besar. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material geopolimer, yang dapat dibuat dari abu terbang, slag, dan bahan aluminosilikat lainnya, mampu menekan emisi CO₂ sekaligus memberikan ketahanan lebih baik terhadap lingkungan korosif dibandingkan semen konvensional (Sarkar, M. et al., 2022). Dalam kerangka tersebut, penggunaan serat alam sebagai penguat dalam sistem geopolimer mulai dipandang potensial karena dapat menurunkan ketergantungan terhadap semen sekaligus meningkatkan sifat mekanik serta fungsi struktural komposit melalui mekanisme perkuatan serat.

Perkembangan teknologi material ramah lingkungan juga mendorong pemanfaatan berbagai jenis serat alami dalam komposit, baik berbasis semen maupun geopolimer. Sejumlah

studi telah menjelaskan bahwa serat seperti kenaf, sisal, bambu, dan sabut kelapa mampu meningkatkan daktilitas, ketahanan retak, dan penyerapan energi pada struktur komposit, meskipun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh panjang serat, persentase fraksi, orientasi penyusunan, dan kualitas ikatan dengan matriks. Namun demikian, temuan lain juga melaporkan bahwa peningkatan jumlah serat dalam komposit dapat berkonsekuensi pada penurunan kuat tekan dan peningkatan porositas apabila distribusi dan parameter mikrostrukturnya tidak terkontrol dengan tepat.

Kajian ilmiah mengenai komposit geopolimer berbasis serat menunjukkan bahwa fokus penelitian sebelumnya lebih banyak diarahkan pada performa mekanik dibandingkan sifat fisik maupun termal. Sementara itu, isu mengenai densitas, porositas, konduktivitas panas, ketahanan termal, serta stabilitas mikrostruktur belum banyak dieksplorasi secara mendalam dalam penelitian sebelumnya (Benaimeche, O., et al. 2021).

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan selama periode satu tahun di Laboratorium Material Fisika, Kampus 4 Universitas Negeri Gorontalo, Suwawa, Kabupaten Bone Bolango, Gorontalo. Seluruh rangkaian kegiatan mulai dari preparasi serat, pembuatan sampel, curing, hingga pengujian dilakukan di fasilitas laboratorium yang sama untuk menjaga konsistensi suhu, kelembapan, serta kondisi lingkungan pengujian.

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium karena fokus penelitian adalah menguji pengaruh variasi rasio serat ijuk terhadap sifat fisik dan termal komposit berbasis semen geopolimer. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengontrol variabel, meminimalkan bias lingkungan, dan memungkinkan karakterisasi kuantitatif berdasarkan respon parameter hasil uji.

Subjek

Subjek penelitian berupa komposit geopolimer semen yang diperkuat serat ijuk dengan tiga variasi rasio volume serat terhadap matriks, yaitu:

Tabel 1. Komposisi Sampel Berdasarkan Variasi Rasio Serat Ijuk

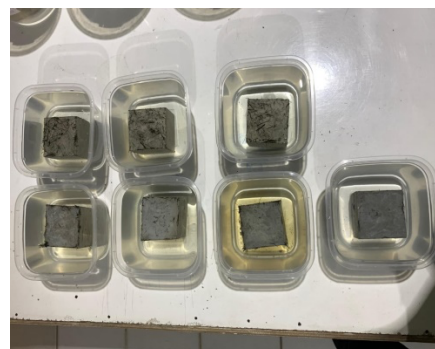
Kode Sampel	Rasio Serat:Matriks	Jumlah Sampel
1:1	50 ml semen + 50 ml pasir + 100 ml serat ijuk	1
1:2	50 ml semen + 50 ml pasir + 200 ml serat ijuk	2
1:3	50 ml semen + 50 ml pasir + 300 ml serat ijuk	3

Total sampel yang digunakan adalah tujuh unit untuk pengujian densitas–porositas dan tiga unit sampel representatif untuk pengujian konduktivitas termal.

Berikut dokumentasi sampel penelitian:



Gambar 1. Sampel komposit geopolimer dengan tiga variasi rasio serat ijuk



Gambar 2. Sampel dalam proses pengujian densitas melalui metode perendaman air.

Instrumen

Instrumen yang digunakan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Deskripsi Instrumen

Instrumen
a. Timbangan Digital berfungsi mengukur massa sampel pada ketelitian 0,01 g
b. Gelas Ukur berfungsi untuk mengukur volume bahan
c. Cetakan Kubus berfungsi untuk pembentukan sampel komposit dengan ketelitian 5x5x5 cm
d. Jangka Sorong dan Mistar berfungsi untuk mengukur dimensi sampel dengan ketelitian 0,05 mm
e. Alat uji termal steady-state berfungsi untuk mengukur konduktivitas termal

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan tahap preparasi serat ijuk, di mana serat dibersihkan, dicuci, dikeringkan pada suhu ruang, kemudian dipotong sepanjang ± 1 cm agar distribusinya lebih seragam dalam matriks komposit. Selanjutnya dilakukan proses perlakuan alkali dengan merendam serat dalam larutan NaOH 5% selama beberapa jam untuk meningkatkan adhesi antara serat dan matriks, kemudian serat dibilas hingga pH mendekati netral dan dikeringkan kembali. Tahap berikutnya adalah pembuatan komposit, di mana semen dan pasir dicampur hingga homogen sebelum penambahan serat alkali yang dilakukan secara bertahap sambil diaduk. Air RO ditambahkan perlahan hingga campuran mencapai tekstur plastis, lalu campuran dimasukkan ke dalam cetakan dan dipadatkan menggunakan teknik pengetukan serta penusukan ringan untuk meminimalkan rongga udara. Sampel dibiarkan curing selama ± 24 jam sebelum dilepas dari cetakan dan dikeringkan hingga massa stabil. Pengumpulan data dilakukan pada tiga parameter utama, yaitu densitas yang dihitung berdasarkan massa dan volume geometris sampel, porositas yang diukur menggunakan metode perendaman air terkontrol, serta konduktivitas termal yang diuji menggunakan perangkat steady-state thermal analyzer. Seluruh sampel diuji setelah berada dalam kondisi massa konstan untuk memastikan konsistensi dan validitas data yang diperoleh.

Analisis Data

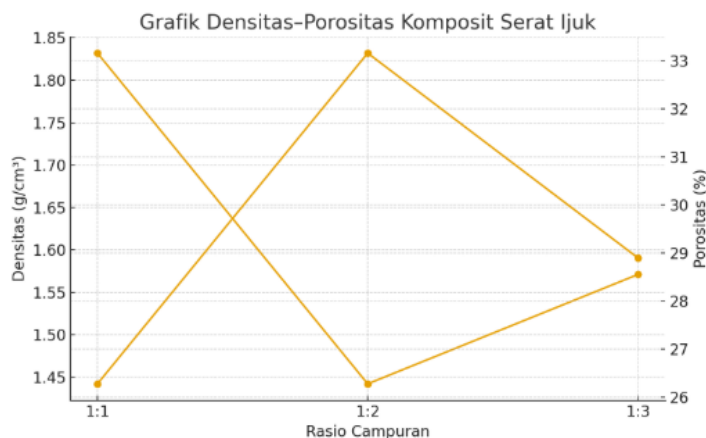
Data dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui perhitungan rata-rata, deviasi, dan interpretasi tren hubungan antara rasio serat dengan perubahan densitas, porositas, dan konduktivitas termal. Hasil dianalisis untuk mengidentifikasi pola hubungan linear atau non-linear antar variabel dan dibandingkan dengan temuan penelitian terdahulu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

hasil pengujian densitas, porositas, dan konduktivitas termal pada komposit semen-serat ijuk dengan tiga variasi rasio serat terhadap matriks (1:1, 1:2, dan 1:3). Hasil ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, dan uraian deskriptif untuk menunjukkan pola perubahan sifat fisik dan termal material berdasarkan variasi komposisi serat.

1. Hasil Pengujian Densitas-Porositas



Gambar 3. Grafik Perbandingan Nilai Densitas-Porositas

Gambar 3 menunjukkan keterkaitan antara variasi rasio campuran serat ijuk–semen (1:1, 1:2, dan 1:3) terhadap dua parameter penting, yaitu densitas dan porositas komposit. Grafik ini menyajikan kedua parameter dalam satu tampilan menggunakan dua sumbu-Y agar perbedaan skala nilai dapat terlihat dengan jelas tanpa saling menutupi. Titik-titik pada grafik mewakili nilai rata-rata hasil pengujian, sedangkan garis kurva berfungsi sebagai penanda untuk memudahkan mengikuti arah perubahan data pada setiap rasio campuran. Secara keseluruhan, perubahan rasio campuran tidak menghasilkan pola linear, melainkan menunjukkan variasi nilai densitas dan porositas yang dipengaruhi oleh distribusi serat dan kemampuan ikatan antara semen dan serat ijuk. Penyajian dalam bentuk titik dan kurva ini membantu memvisualisasikan hubungan kedua parameter secara bersamaan sehingga lebih mudah dipahami.

Tabel 2. Data Hasil Pengukurann Densitas Komposit Serat Ijuk:Semen

Kode Sampel (Serat Ijuk semen)	Sampel Ke :	Massa (g)	Volume (ml)	Densitas (g/ml)	Rata-Rata Densitas
Sampel (1:1)	1	216	117,9	1,832	1,832
	2	179	116,5	1,536	
Sampel (1:2)	3	176	130,0	1,354	1,442
	4	170	118,5	1,434	
Sampel (1:3)	5	194	130,0	1,492	1,571
	6	193	118,9	1,623	
	7	206	128,9	1,598	

Tabel 2 menunjukkan hasil densitas komposit rasio 1:1, dengan serat dan semen dalam proporsi seimbang, menghasilkan material paling padat. Penurunan densitas pada rasio 1:2 dan 1:3 disebabkan oleh terbentuknya rongga udara yang lebih banyak, berpengaruh negatif terhadap densitas dan homogenitas. Sebaliknya, meningkatnya porositas pada rasio 1:2 menunjukkan bahwa penambahan serat mengurangi kemampuan semen untuk mengikat serat secara merata. Hasil ini sejalan dengan teori bahwa kombinasi material yang seimbang antara matriks dan penguat penting untuk mencapai kekuatan mekanik optimal (Sood, M., & Dwivedi, G. 2018). Teori ini menegaskan bahwa proporsi yang berlebihan dari satu bahan, dalam hal ini serat, dapat menghasilkan rongga yang merugikan struktur komposit. Adapun temuan serupa (Abdullah, et al., 2021), di mana peningkatan fraksi serat menyebabkan peningkatan porositas pada beton, sementara penelitian lain menunjukkan hubungan negatif antara densitas dan porositas bahan komposit (Shobha, et al. 2018). Penelitian ini memperkuat data yang ada, menggarisbawahi pentingnya proporsi rasio dalam produksi material.

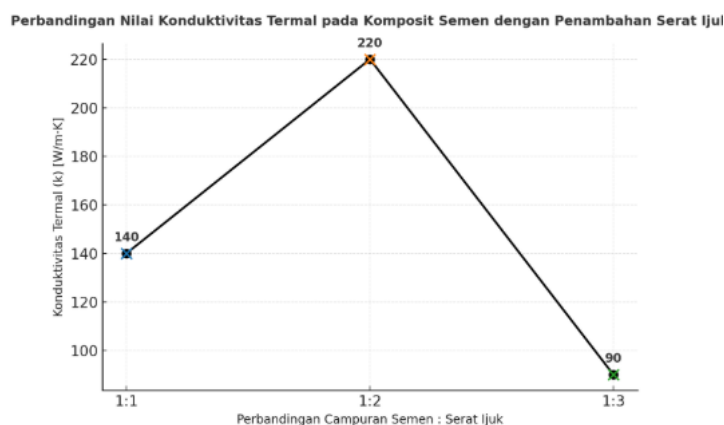
Tabel 3. Data Hasil Pengukuran Porositas Komposit Serat Ijuk:Semen

Kode Sampel (Serat Ijuk : Semen)	Sampel Ke :	Mp-Mk (g)	Volume (ml)	Porositas (%)	Rata Rata Porositas
Sampel (1:1)	1	31	117,9	26,28	26,28
	2	36	116,5	30,90	
Sampel (1:2)	3	42	130,0	32,30	33,16
	4	43	118,5	36,28	
Sampel (1:3)	5	38	130,0	29,23	28,90
	6	37	118,9	31,11	
	7	34	128,9	26,37	

Tabel 3 menunjukkan Hasil rata-rata porositas menunjukkan bahwa komposit dengan rasio 1:1 memiliki porositas paling rendah (26,28%), menandakan struktur yang paling padat karena keseimbangan antara serat dan semen memungkinkan matriks menyelimuti serat secara merata (Rocha, D. 2022). Pada rasio 1:2, porositas meningkat signifikan menjadi 33,16%, yang menunjukkan bahwa jumlah serat yang lebih tinggi mulai mengganggu kemampuan semen menutup rongga, sehingga lebih banyak pori terbentuk; kondisi ini sejalan dengan laporan

bahwa kenaikan fraksi serat cenderung meningkatkan porositas dan menurunkan homogenitas matriks (Asyraf, M. R. M. et al. 2022). Rasio 1:3 menghasilkan porositas rata-rata 28,90%, lebih rendah dibandingkan 1:2 namun tetap lebih tinggi dari 1:1, mencerminkan adanya hubungan negatif antara densitas dan porositas sebagaimana dikemukakan pada studi komposit serat alam (Habibi, M. et al. 2018). Pola ini sejalan dengan temuan bahwa proporsi komposit yang terlalu banyak serat akan menciptakan rongga internal dan menurunkan kualitas ikatan serat–matriks, sehingga komposisi seimbang seperti rasio 1:1 cenderung menghasilkan komposit yang lebih padat dan stabil (Nanda, M. Putra Pramana. 2022).

2. Hasil Pengujian Konduktivitas Termal



Gambar 4. Grafik Nilai Konduktivitas Nilai Termal

Gambar 4 memperlihatkan perbandingan nilai konduktivitas termal komposit semen–serat ijuk pada variasi perbandingan 1:1, 1:2, dan 1:3. Nilai konduktivitas termal ini dipengaruhi oleh kerapatan struktur internal, distribusi serat, serta proporsi semen dalam campuran, sehingga setiap variasi menunjukkan kemampuan penghantaran panas yang berbeda. Dari grafik terlihat bahwa rasio 1:2 memiliki nilai tertinggi, yaitu 220 W/m·K, menandakan bahwa komposisi ini membentuk jalur perpindahan panas yang paling efektif dan cocok digunakan apabila material difungsikan sebagai penghantar panas. Rasio 1:1 menunjukkan nilai sedang, yakni 140 W/m·K, sementara rasio 1:3 memiliki nilai terendah, yaitu 90 W/m·K, sehingga lebih berpotensi digunakan sebagai isolator panas. Dengan demikian, hasil pengujian termal ini membantu menentukan bahwa rasio 1:2 merupakan komposisi paling efisien sebagai penghantar panas, sedangkan rasio 1:3 lebih efektif sebagai material isolatif.

Tabel 4. Hasil Nilai Konduktivitas termal

Nama Sampel	Konduktivitas Termal (W.m/K)
Semen 1:1	131.506
Semen 1:2	219.963
Semen 1:3	84.896

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal komposit pada rasio 1:1 mencapai 131,506 W/m·K, yang mencerminkan kemampuan penghantaran panas yang masih cukup baik karena proporsi semen dan serat berada dalam kondisi relatif seimbang. Peningkatan

nilai konduktivitas secara signifikan pada rasio 1:2, yaitu 219,963 W/m·K, menunjukkan bahwa komposisi ini membentuk struktur internal yang lebih homogen sehingga panas dapat mengalir dengan lebih efisien. Sebaliknya, penurunan drastis pada rasio 1:3 hingga 84,896 W/m·K disebabkan oleh bertambahnya fraksi serat yang menghasilkan lebih banyak rongga udara, sehingga menghambat aliran panas dan membuat komposit lebih bersifat isolatif. Temuan ini sejalan dengan teori bahwa kapasitas hantaran panas bergantung pada kontinuitas jalur termal dalam material, dan peningkatan serat berlebih dapat merusak jalur tersebut (Wang, Z., et al. 2018). Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan rasio campuran yang tepat sangat penting dalam menentukan performa termal komposit, baik untuk aplikasi penghantar panas maupun sebagai isolator panas.

Pembahasan

Penurunan densitas pada rasio campuran 1:1 menuju 1:2 sesuai dengan tren umum bahwa penambahan serat alami menurunkan densitas komposit karena serat memiliki massa jenis lebih rendah dibandingkan matriks semen. Fenomena ini sejalan dengan temuan Camargo et al. yang menjelaskan bahwa penambahan serat alami seperti sisal, kelapa, dan rami cenderung meningkatkan volume rongga internal sehingga menurunkan densitas material komposit. Namun, kenaikan kembali densitas pada rasio 1:3 dapat dijelaskan oleh efek pemadatan dan interlocking serat yang mengisi ruang antarmuka, sebagaimana diamati pada beberapa penelitian komposit berpenguat serat alami yang menunjukkan peningkatan densitas pada fraksi serat tertentu ketika distribusi serat menjadi lebih merata (Camargo, M., et al. 2020).

Porositas yang mencapai titik tertinggi pada rasio 1:2 mengindikasikan terbentuknya void yang lebih besar dan saling terhubung akibat pencampuran serat yang tidak sepenuhnya terlapisi oleh matriks. Studi Sarkar et al. menunjukkan bahwa peningkatan fraksi serat alami memang meningkatkan total porositas, terutama pada komposit berbasis semen dan geopolimer, akibat meningkatnya kesulitan penetrasi pasta ke celah antarserat.² Penurunan porositas pada rasio 1:3 terjadi karena jaringan serat yang lebih rapat menciptakan pori-pori tertutup atau terperangkap, sehingga volume pori total tampak menurun, sebuah perilaku yang juga ditemukan pada beberapa komposit serat alami dalam literatur (Ranjbar, et al. 2020).

Nilai konduktivitas termal yang sangat tinggi pada rasio 1:2 menunjukkan bahwa meskipun porositas besar, struktur mikro pori lebih bersifat terbuka sehingga membentuk jalur panas yang kontinu. Hal ini konsisten dengan hasil penelitian Daza-Badilla et al. yang melaporkan bahwa konduktivitas termal tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah pori, tetapi juga oleh konektivitas pori serta apakah pori bersifat terbuka atau tertutup (Daza-Badilla, J. et al. 2024). Pada rasio 1:3, nilai konduktivitas yang rendah mengindikasikan bahwa pori lebih banyak berisi udara atau bersifat tertutup udara adalah isolator panas sehingga kemampuan hantaran panas material menurun, sebagaimana dilaporkan pada penelitian foamed concrete berpenguat serat alami (Jegatheeswaran, J., et al. 2023).

Penelitian ini memberikan kontribusi penting karena secara bersamaan menganalisis hubungan densitas, porositas, dan konduktivitas termal pada komposit geopolimer berbasis serat ijuk, sebuah serat lokal yang jarang dieksplorasi dalam kajian material komposit tropis. Sementara penelitian sebelumnya lebih berfokus pada aspek mekanik, data Anda menghadirkan pemahaman baru mengenai trade-off antara ringan, struktur mikro, dan performa termal. Hal ini memperkuat peluang pemanfaatan komposit berbasis serat ijuk untuk aplikasi konstruksi ramah lingkungan, baik sebagai material struktural (rasio 1:1–1:2) maupun material insulasi termal (rasio 1:3). Temuan ini mengisi kesenjangan penelitian sebagaimana disebut dalam beberapa review terbaru mengenai komposit geopolimer berserat alami.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap bahwa perbedaan rasio serat ijuk dalam komposit geopolimer memberikan pengaruh yang jelas terhadap sifat fisik maupun kemampuan penghantaran panas dari material tersebut. Variasi komposisi tertentu mampu menghasilkan struktur komposit yang lebih padat, sementara rasio lain memberikan performa termal yang lebih baik. Hasil ini memperlihatkan bahwa serat ijuk berpotensi besar dimanfaatkan sebagai penguat alami dalam pengembangan bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Namun, kajian ini masih terbatas pada skenario uji di laboratorium dan belum mengevaluasi perilaku material pada kondisi penggunaan sebenarnya. Karena itu, penelitian lanjutan diperlukan, terutama yang berfokus pada uji mekanik tambahan dan ketahanan jangka panjang, agar pemanfaatan komposit berbasis serat ijuk dapat dioptimalkan dan diterapkan secara lebih luas.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada seluruh tim di Laboratorium Fisika Fakultas MIPA UNG atas bantuannya sehingga penelitian ini dapat terlaksanakan dengan baik.

REFERENSI

- Abdullah, Ahmed; Al-Waeli, Ali Hussein Ali; Al-Baghdadi, Jabbar Mahmood; Mahdi, Jawad Mahmood; Kazem, Hussein Ali; Chaichan, Majid Tahseen. (2021). Mechanical and Microstructural Characteristics of Natural Fiber-Reinforced Cement Composites. *Construction and Building Materials*, 301, 124328.
- Asyraf, M. R. M.; Syamsir, A.; Supian, A. B. M.; Roslan, M. A. H.; Ilyas, R. A.; Razali, N.; Sapuan, S. M. (2022). Sugar Palm Fibre-Reinforced Polymer Composites: Influence of Chemical Treatments on Mechanical Properties. *Materials*, 15(11), 3852.
- Camargo, Marfa Molano; Taye, Eyerusalem Adefrs; Roether, Judith A.; Redda, Daniel Tilahun; Boccaccini, Aldo R. (2020). A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites. *Materials*, 13(20), 4603. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106156>

- Daza-Badilla, Lucas; Gómez, René; Díaz-Noriega, Ramón; Avudaiappan, Siva; Skrzypkowski, Krzysztof; Saavedra-Flores, Erick I.; Korzeniowski, Waldemar (2024). Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers. *Materials*, 17(4), 0817. <https://doi.org/10.3390/ma17010123>
- Habibi, M., Ruiz, É., Lebrun, G., & Laperrière, L. (2018). Effect of surface density and fiber length on the porosity and permeability of nonwoven flax reinforcement. *Textile Research Journal*, 88(15), 1659–1671.
- Jegatheeswaran, J. (2023). Thermal conductivity, microstructure and hardened characteristics of foamed concrete composite reinforced with raffia fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 850–864. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.123>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2014). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Nanda, M. Putra Pramana. (2022). Experimental Study of The Addition of Palm Fiber (Arenga Pinnata) as Fiber Against The Compressive Strength of Pozzolan Bricks. *Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan*, 24(2), 118–124
- O. Benaimeche; A. Benazzouk; S. Kenai; P. Scharfer (2021). Influence of fiber content and alkali treatment on mechanical and thermal properties of natural fiber-reinforced cement composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(10), 1284–1298. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1706827>
- Ranjbar, Navid; Zhang, Mingzhong (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498.
- Rusdi, A. (2020). Pemanfaatan serat ijuk pada beton ringan untuk aplikasi bangunan tahan panas. (Tesis tidak dipublikasikan). Universitas Negeri Makassar.
- Sarkar, M., Mahato, B., & Adhikari, B. (2022). Thermal, physical, and mechanical performance of fiber-reinforced sustainable building materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 50, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104153>
- Shobha, Basavaraju G.; Ranganathaiah, C.; Pavithra, B. (2018). Thermal and Mechanical Behavior of Natural Fiber-Reinforced Cement Composites. *Journal of Natural Fiber Composites*, 12(3), 155–165.
- Sofiah, I. (2019). Analisis kinerja serat alam sebagai penguat material komposit berbasis semen. (Disertasi tidak dipublikasikan). Universitas Gadjah Mada.
- Sood, M., & Dwivedi, G. (2018). Effect of fiber content on mechanical properties and microstructure of natural fiber-reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 28449–28454.
- Wang, Z., Tian, Z., & Li, Y. (2018). Effect of fiber distribution and pore structure on the thermal conductivity of fiber-reinforced composites. *Composite Structures*, 203, 229–238.