

# EKSPLORASI KARAKTERISTIK TARIK, *THERMAL* DAN MORFOLOGI KOMPOSIT EPOXY DIPERKUAT SERAT TIMOHO – MIKRO SERBUK $Al_2O_3$

## *EXPLORING THE MECHANICAL, THERMAL, AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH TIMOHO FIBERS AND $Al_2O_3$ MICRO-POWDER*

Suteja\*, Syarif Hidayatullah

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jalan Majapahit no. 62 Mataram.  
No. Hp/WA.: 081916007255

\*Corresponding author

E-mail addresses: [suteja@unram.ac.id](mailto:suteja@unram.ac.id)

<https://doi.org/10.29303/empd.v5n1.376-382>

Received 9 April 2026; Received in revised form 22 May 2026; Accepted 24 May 2026

### ABSTRACT

Epoxy composites reinforced with natural fibers can be added with a second filler in the form of powder to enhance their performance. This method affects the thermal resistance properties of the composites. This study investigates the development of epoxy composites reinforced with timoho fibers to which an aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) powder filler has been added. The composites were fabricated using the hand lay-up method, and the tensile properties, thermal conductivity, and fracture morphology of the epoxy composites were analyzed to determine the effect of varying the volume fraction of  $Al_2O_3$  filler on epoxy composites containing 20% (wt) timoho fibers. The results of the investigation showed that the highest tensile strength of 70.41 MPa was obtained by the SA composite, then decreased to 51.15 MPa in the SC composite. The highest thermal conductivity and linear thermal expansion coefficient values for the composites were each found in the SC sample, at 1.1793 W/m·K and 104.525 °C, respectively. SEM morphology revealed that the timoho fibers experienced fiber pull-out and cracks in the epoxy matrix. Overall, the SEM images support the tensile strength values.

**Keywords:** Epoxy composites, Timoho fiber,  $Al_2O_3$ , Tensile strength

## 1. Pendahuluan

Epoxy memainkan peran penting dalam aplikasi industri konstruksi, *adhesive*, otomotif bahkan kerajinan tangan yang dalam bentuk material komposit ramah lingkungan, hal ini dikarenakan oleh performa, ketahanan kimia dan anti penyusutan tinggi [1]. Komposit epoxy diperkuat serat alam akan memberikan karakteristik material yang ringan, kuat dan kaku, mengurangi penggunaan polimer sintesis serta ramah lingkungan [2]. Sebagai komposit yang berkelanjutan, komposit epoxy berpenguat serat timoho terus dikembangkan untuk mendapatkan performanya dalam lingkungan basah dan temperatur tinggi. Komposit epoxy – serat alam seperti serat timoho memiliki kelemahan pada ukuran tidak seragam dan kemampuan ikatan lemah yang berdampak sebagai celah masuknya kelembaban sehingga memperlemah performa mekanik dan ketahanan pakai dalam temperatur tinggi. Selain perlakuan kimia seperti alkali, merserisasi, delignifikasi dan hidrolisis serat alam, penambahan *filler* berupa serbuk juga telah ditawarkan untuk memperbaiki performa komposit epoxy – serat alam.

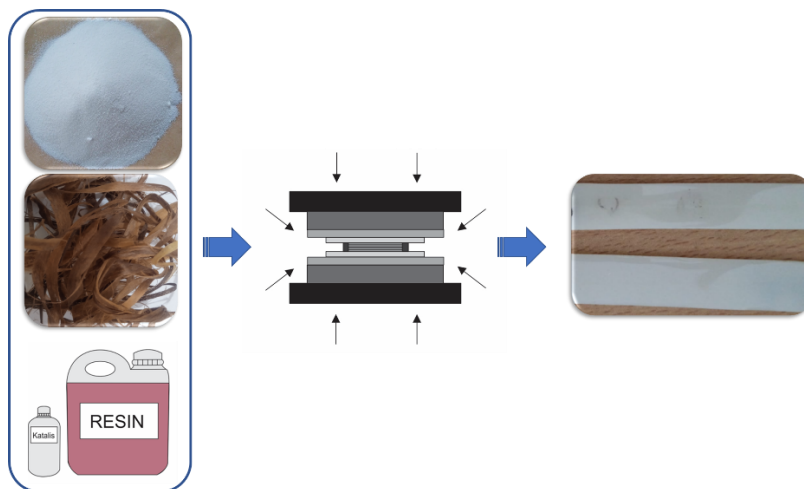
Perlakuan permukaan serat dengan alkali NaOH pada serat timoho sangat familiar dan dibutuhkan sebagai cara efektif untuk meningkatkan stabilitas dan *long-term* performa komposit epoxy. Cara ini melarutkan senyawa tidak penting seperti hemiselulosa, lignin dan senyawa pengotor pada serat alam (dalam penelitian serat timoho) sehingga meningkatkan ikatan mekanik dengan matrik epoxy [3]. Konsentrasi larutan NaOH menjadi salah satu faktor yang sangat menentukan hasil sifat fisik, mekanik dan termal serat. Konsentrasi NaOH sekitar 5 – 10 % sangat ideal untuk perlakuan serat alam [4,5]. Penambahan *filler* organik dan anorganik seperti serbuk grafena, serbuk aluminium, aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $\text{CaCO}_3$ , cangkang telur, serbuk besi [6–9] merupakan metode lanjutan, murah dan mudah dalam menghasilkan peningkatan performa komposit epoxy – serat timoho. *Filler-filler* tersebut ditambahkan ke dalam komposit serat alam memiliki aspek rasio rendah dan luasan permukaan yang besar sehingga menghasilkan ikatan dan interaksi permukaan dengan epoxy – serat alam yang kuat [10]. Metode ini juga terbukti mampu memperbaiki performa mekanik dan termal komposit dengan tetap mempertahankan sifat aslinya dengan biaya murah [6]. Fraksi volume *filler* yang ditambahkan ke dalam komposit polimer – serat alam optimalnya berada sekitar 3 - 5 % [10] lebih dari 5% fraksi volume *filler* serbuk kekuatan mekanik komposit polimer – serat alam menurun akibat viskositas yang terlalu tinggi dan penggumpalan serbuk [11].

Dalam pengembangan komposit epoxy – timoho terbaru ini, penambahan serbuk alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) menjadi sistem penguat hibrida. Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  memiliki sifat yang keras dan ketahanan termal yang tinggi, ketika digabungkan dengan epoxy perpaduan yang tepat dengan kekuatan mekanik serat timoho dan performa rekatan matrik epoxy. Perannya sebagai *rheology modifier* dan *micro-filler* yang mampu meningkatkan homogenitas matriks epoxy melalui pengaturan viskositas selama proses impregnasi dan kualitas ikatan antarmuka epoxy – serat timoho melalui interaksi ikatan hidrogen dalam grup hidroksil. Komposit berkelanjutan terbaru ini tersusun dari matrik epoxy – serat timoho. Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai *filler* dalam epoxy dan timoho sumber serat selulosa dan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya. Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam jumlah optimal diharapkan mampu memperbaiki sifat mekanik seperti karakteristik tarik dan konduktivitas termalnya. Terakhir sifat fisik komposit epoxy – timoho diamati morfologi patahan dengan SEM.

## 2. Bahan dan Metode

Komposit baru yang dikembangkan ini berbahan dasar epoxy diperkuat serat timoho dan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Proses ekstraksi serat timoho mengikuti berdasarkan metode yang telah dilaporkan oleh [12]. Serat timoho selanjutnya dibuat menjadi serbuk makro dengan blender dan diikuti perlakuan permukaan kimia dengan larutan NaOH 9% [12]. Serat timoho diketahui memiliki densitas sebesar  $0,81 \text{ g/cm}^3$  dan indeks kekeristalan 127,57%. Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan densitas  $0,35 \text{ g/cm}^3$ , diameter  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $30 \mu\text{m}$  dan luas permukaan spesifik  $8 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Resin epoxy dengan viskositas dan densitas masing-masing sebesar 13.000 MPa.s dan  $1,15 \text{ g/cm}^3$  digunakan sebagai matrik komposit. Selanjutnya, resin epoksi, pengeras (*polyaminoamide*) dan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dicampur sesuai dengan komposisi pada tabel 1 menggunakan *mixer* selama 10 menit berkecepatan 1000 rpm selama 10 menit. Adonan selanjutnya di *degassing* dengan vakum selama 5 menit pada suhu kamar untuk menghilangkan gelembung udara. Adonan yang dihasilkan selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan yang sebelumnya telah diisi serat timoho searah dengan panjang 165 mm. Serat timoho, resin epoxy dan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam cetakan kemudian ditutup dengan tekanan 50 MPa pada suhu kamar  $\pm 27^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Sampel komposit yang dihasilkan disesuaikan dengan standar pengujian untuk dikarakterisasi. Rincian fraksi volume penguat serat timoho dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  serta matriks epoksi dan nomenklatur material komposit yang dipertimbangkan disajikan pada Tabel 1. Fabrikasi komposit dilakukan seperti yang diilustrasikan pada gambar 1. Kekuatan tarik, elongasi dan modulus elastisitas komposit diukur mengikuti standar ASTM D638-03. Pengujian dilakukan pada *Universal Testing Machine* (UTM) model RTG 1310 INSTRON yang disuplai oleh M/S Microtech Pune. Mesin dengan kapasitas 5 ton dan laju pembebanan terkontrol dijalankan sebesar 1 mm/menit, pada kondisi laboratorium standar temperatur  $27^\circ\text{C}$ , dan kelembaban relatif 50%. Konduktivitas termal diukur menggunakan alat model LZT-800 ZT Meter pengukur aliran panas dalam kondisi kondisi tunak sesuai ASTM E1530 (ASME B31.1 SA-335). Pengujian ini menentukan kemampuan material untuk menghantarkan panas, yang sangat penting untuk manajemen termal dalam berbagai aplikasi. Selanjutnya, mesin Phenom Pharos Desktop SEM digunakan untuk mengamati

patahan uji tarik komposit. Sampel komposit dilapisi dengan tembaga tipis (~30 nm) sebelum difoto pada arus 8 mA dan tegangan 5 kV.



Gambar 1 Fabrikasi komposit.

Tabel 1 Kode dan komposisi bahan penyusun komposit

| Kode | Fraksi volume (%) |              |                                       |
|------|-------------------|--------------|---------------------------------------|
|      | Epoxy + Hardener  | Serat timoho | Serbuk Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| SA   | 70                |              | 10                                    |
| SB   | 65                | 20           | 15                                    |
| SC   | 60                |              | 20                                    |

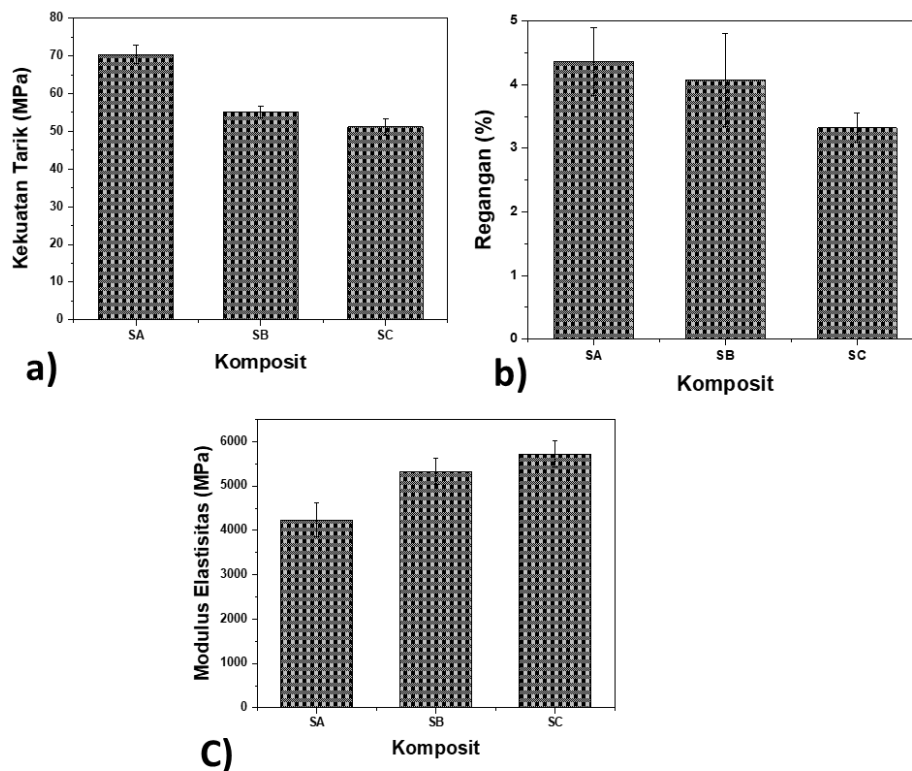
### 3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 2a menunjukkan rata-rata kekuatan tarik komposit epoxy diperkuat serat timoho dengan *filler* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kekuatan tarik komposit epoxy – serat timoho *filler* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tertinggi diperoleh pada sampel SA dengan kekuatan tarik sebesar 70,41 ± 2,46 MPa. Hal ini akibat dari kombinasi pengisi antara serat timoho dengan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, serta interaksi antara serat, serbuk, dan matriks. selain itu, distribusi material pengisi (serat timoho dan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) di dalam komposit juga menjadi faktor utama penentu tingginya kekuatan tarik komposit. Namun, ketika konsentrasi serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terlalu tinggi dapat menghasilkan efek negatif yaitu mengurangi kekuatan tarik komposit [13]. Seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 pada komposit SB dan SC.

Gambar 2b menampilkan nilai elongasi komposit epoxy diperkuat serat timoho/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang cenderung mengalami penurunan ketika kandungan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bertambah dari 10% - 20% (%wt). Penurunan elongasi komposit epoxy + serat timoho saat kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bertambah besar kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk karakteristik material komposit dan interaksi antara serat timoho, serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan kandungan void. Penambahan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ke dalam komposit dapat meningkatkan kekakuan material secara keseluruhan melalui peningkatan aspek rasio komposit. Interaksi antara serat timoho dan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, proses pencampuran dan void pada matriks juga dapat mempengaruhi elongasi komposit. Elongasi tertinggi dihasilkan oleh komposit SA dengan 10% (wt) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yaitu sebesar 4,36%, Hal ini dimungkinkan oleh adanya pergeseran serat timoho dengan epoxy sebelum mengalami kegagalan. Kemudian terdegradasi dengan semakin bertambahnya penambahan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Elongasi terkecil dimiliki oleh komposit SC serat timoho dengan 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yaitu sebesar 3,32%. Dalam konsentrasi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tinggi dapat mengganggu dan mengurangi kemampuan komposit untuk meregang dan menahan beban sebelum patah [14].

Nilai modulus elastistas komposit epoxy disajikan pada Gambar 2c yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan ketika kandungan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mencapai 20% (wt). Komposit SA memiliki modulus elastisitas terendah yaitu hanya sebesar 4237,26 MPa kemudian meningkat menjadi 5328,75

MPa dan 5724,48 MPa setelah ditambahkan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  masing-masing 15% dan 20% (wt). Peningkatan nilai modulus elastisitas komposit besar kemungkinan disebabkan oleh kombinasi penguatan material, interaksi yang lebih baik antara serat-serat, serbuk, dan matriks, distribusi material yang lebih merata, serta kompatibilitas yang baik antara serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan matriks. Luas permukaan yang tinggi dari serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  merupakan hal yang paling menarik untuk mengembangkan antarmuka yang besar pada komposit epoxy.

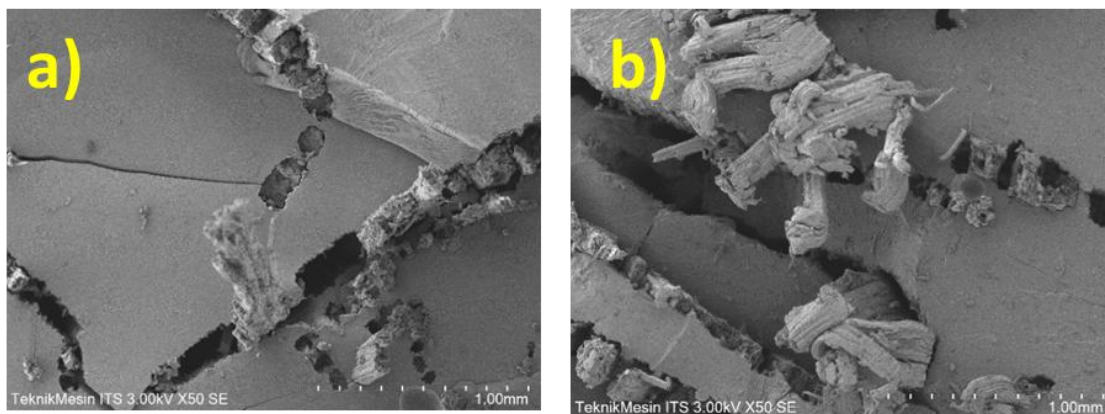


Gambar 2 Parameter sifat tarik, a) kekuatan tarik, b) elongasi dan c) modulus elastisitas komposit

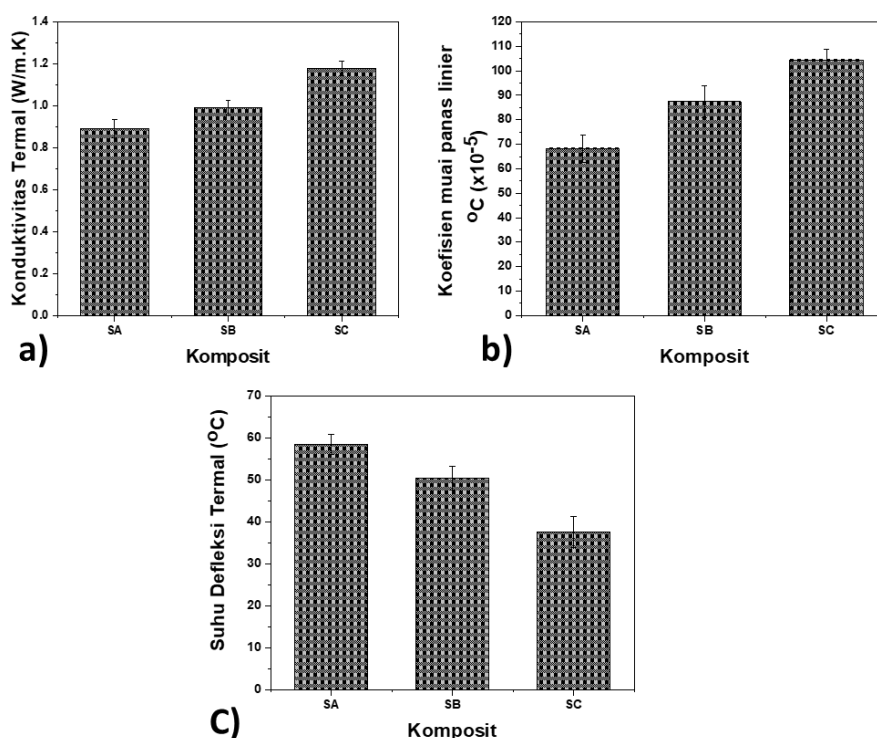
Tabel 2 Parameter sifat tarik komposit

| Sampel | Parameter Kekuatan Tarik |              |                           |
|--------|--------------------------|--------------|---------------------------|
|        | Kekuatan tarik (MPa)     | Regangan (%) | Modulus elastisitas (MPa) |
| SA     | 70,41 ± 2,46             | 4,36 ± 0,54  | 4237,26 ± 389,66          |
| SB     | 55,14 ± 1,62             | 4,07 ± 0,73  | 5328,75 ± 301,32          |
| SC     | 51,15 ± 2,07             | 3,32 ± 0,23  | 5724,48 ± 300,12          |

Permukaan patahan spesimen uji tarik komposit epoxy – serat timoho dengan variasi *filler* serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dipindai dengan mikroskop elektron dan foto hasil ditampilkan pada Gambar 3. Komposit SA dengan *filler*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diobservasi dan ditampilkan pada Gambar 3a. Gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat serat yang patah di dalam matrik dan tertarik keluar dari spesimen serta dislokasi serat yang mengindikasikan cukup baik dibandingkan dengan komposit SC. Tambahan *filler*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ditandai dengan adanya garis pada permukaan matrik dan berkaitan dengan kekakuan matrik ataupun komposit. Gambar 3b menunjukkan serat *pull out* yang lebih dominan pada sampel SC, yang mendukung hasil uji tarik. Komposit SC terindikasi memiliki interaksi yang kurang padat antara epoxy – serat timoho, hal ini ditandai dengan serat *pull out* yang menyebabkan kekuatan tarik mengalami penurunan. Inklusi serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20% ke dalam komposit epoxy cukup besar sehingga menurunkan viskositas epoxy dan tidak mampu mengikat serat timoho secara optimal.



Gambar 3 Morphology patahan tarik komposit a) sampel SA, b) sampel SC



Gambar 4 a) Konduktivitas termal, b) koefisien muai panas linier, c) suhu defleksi termal komposit

Tabel 4a dan 3 menunjukkan nilai konduktivitas termal komposit dengan komposit SC mencatat nilai konduktivitas termal tertinggi yaitu sebesar  $1,18 \pm 0,035$  W/m.K, meningkat dari komposit SA dan komposit SB masing-masing dapat dilihat pada Tabel 3. Perbandingan nilai konduktivitas termal dari tiga jenis komposit, yang mana komposit SC memiliki konduktivitas termal tertinggi mengindikasikan bahwa komposisi pada variasi ini sangat baik dalam menghantarkan panas karena jenis ini lebih homogen dalam matrik kompositnya [3], dan merupakan peran dari serbuk  $Al_2O_3$ . Nilai konduktivitas termal komposit meningkat secara bertahap pada komposit seiring penambahan *filler* serbuk  $Al_2O_3$ , hal ini mengindikasikan bahwa *filler* serbuk dapat menghantar jalur perpindahan panas. Hal ini menggambarkan bahwa komposit SC (*filler* 20% wt) mampu membentuk jalur perkolasi panas yang efektif, peran mikrostruktural seperti distribusi dan orientasi *filler*, interaksi antarmuka antara matriks dan *filler*, dan kemampuan material dalam membentuk jaringan termal yang terhubung secara kontinu [15].

Gambar 4b menunjukkan nilai koefisien muai termal linier (*coefficient of linear thermal expansion*) dari tiga jenis komposit. Komposit SC memiliki nilai CLTE tertinggi yaitu  $104,52 \pm 4,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  menunjukkan ekspansi termal yang cukup besar terhadap kenaikan suhu. Nilai CLTE meningkat secara bertahap hingga pada komposit SA dan komposit SB dengan nilai masing-masing  $68,34 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  dan  $87,43 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . Peningkatan nilai CLTE ini menunjukkan peningkatan stabilitas dimensi termal seiring dengan modifikasi komposisi khususnya rasio serat-*filler*-matriks. Komposit berbasis serat alam yang dipadukan dengan *filler* serbuk gergaji dan matriks dengan peningkatan kandungan *filler* secara progresif dapat menekan laju ekspansi termal [16]. Hal ini mungkin karena *filler* yang berperan dalam membatasi pergerakan rantai polimer dalam matriks dengan kontribusi serat alam yang memiliki stabilitas termal lebih baik dibandingkan fase matriksnya. Hal berbeda dengan bahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang mampu berekspansi termal.

Gambar 4c menunjukkan tren peningkatan nilai *heat deflection temperature* (HDT) dari komposit SA, SB dan SC. Nilai HDT tertinggi dicapai oleh komposit SA ( $58,425 \pm 2,41^{\circ}\text{C}$ ) dan terendah oleh komposit SC ( $37,635 \pm 3,72^{\circ}\text{C}$ ). Penurunan nilai HDT dari sampel SA ke SE mengindikasikan bahwa modifikasi komposisi khususnya peningkatan fraksi *filler* serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan proporsi serat timoho yang tepat dapat berdampak pada kontribusi nyata terhadap stabilitas termal komposit. Dimana penambahan *filler* dapat meningkatkan kekakuan termal komposit dan memperlambat deformasi termoplastik saat dikenai beban mekanik pada suhu tinggi yang terjadi karena *filler* berperan sebagai penghambat mobilitas rantai polimer dalam matriks sehingga suhu defleksi meningkat menyebabkan komposit mempertahankan bentuknya lebih lama di bawah tegangan termal [15].

Tabel 3 Parameter konduktivitas termal komposit

| Sampel | Parameter konduktivitas termal  |  |  |
|--------|---------------------------------|--|--|
|        | Konduktivitas termal<br>(W/m.K) | Koefesien muai panas linier<br>$^{\circ}\text{C} (\times 10^{-5})$ | Suhu defleksi termal<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| SA     | $0,891 \pm 0,043$               | $68,34 \pm 5,62$   | $58,425 \pm 2,41$                              |
| SB     | $0,994 \pm 0,036$               | $87,43 \pm 6,48$   | $50,428 \pm 2,85$                              |
| SC     | $1,179 \pm 0,035$               | $104,52 \pm 4,2$   | $37,635 \pm 3,72$                              |

#### 4. Kesimpulan

Komposit epoxy diperkuat serat timoho yang dimodifikasi dengan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  telah berhasil diinvestigasi. Kekuatan tarik tertinggi komposit diperoleh pada komposit SA ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  10%) sebesar 70,41 MPa, kemudian menurun dengan bertambahnya serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  15% dan 20% masing-masing menjadi 55,14 MPa dan 51,15 MPa berturut-turut. Hal berbeda terjadi pada modulus elastisitas komposit yang mengalami peningkatan dengan bertambahnya serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , komposit SC (20% wt  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) memiliki modulus elastisitas tertinggi sebesar 5724,48 MPa. Konduktivitas termal dan koefisien muai panas linier meningkat dengan bertambahnya serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Fenomena sebaliknya terjadi pada nilai suhu defleksi termal komposit mengalami penurunan dengan bertambahnya serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dari 10 – 20% dengan nilai  $58,425^{\circ}\text{C}$  menjadi  $37,635^{\circ}\text{C}$  sebagai akibat dari terhambatnya mobilitas rantai polimer. Morphology SEM mengungkapkan serat timoho mengalami *fiber pull out* dan retakan pada matrik epoxy. Secara keseluruhan hasil foto SEM kesesuaian yang mendukung nilai kekuatan tarik.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. Fuseini, M.M. Yousry Zaghoul, D. Abakar, M.M. Yousry Zaghoul, Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications, FlatChem, 49 (2025) 100768.
- [2] S. Parbin, N.K. Waghmare, S.K. Singh, S. Khan, Mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composites: A review, Procedia Comput. Sci., 152 (2019) 375–379.
- [3] Y. Jia, T.D. Ajayi, B.H. Wahls, K.R. Ramakrishnan, S. Ekkad, C. Xu, Multifunctional ceramic composite system for simultaneous thermal protection and electromagnetic interference shielding for carbon fiber-reinforced polymer composites, ACS Appl. Mater. Interfaces, 12 (52) (2020) 58005–58017.

- [4] A. Parkash, A. Kadier, P.C. Ma, Effect of NaOH concentration on the surface and mechanical properties of continuous basalt fibers, *Next Research*, 2 (3) (2025) 100682.
- [5] H. Chen, V.V. Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang, L. Du, B. Chen, Thermal conductivity of polymer-based composites: fundamentals and applications, *Prog. Polym. Sci.*, 59 (2016) 41–85.
- [6] F. Gapsari, A. Purnowidodo, P. H. Setyarini, S. Hidayatullah, Suteja, H. Izzuddin, R. Subagyo, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, Properties of organic and inorganic filler hybridization on Timoho Fiber-reinforced polyester polymer composite, *Polym. Compos.*, 43 (2) (2022) 1147–1156.
- [7] S. Köse, Investigation of the mechanical and tribological properties of aluminum powder filled with cyclo-olefin-copolymer composites, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 17 (1) (2024) 100848.
- [8] Suteja, S. Hidayatullah, F. Gapsari, A. Purnowidodo, L. Susanti, S.M. Rangappa, S. Siengchin, Enhancing the performance of natural fiber composites: Integrating Walikukun fiber and aluminum filler in epoxy matrices, *React. Funct. Polym.*, 214 (2025) 106302.
- [9] L. Guo, Q. Dai, X. Lin, Y. Jiang, B. Wang, X. Pan, Y. Peng, G. Zhao, Yi Ru, L. Zhou, Enhancing fiber–matrix interface permeability resistance of natural fiber-reinforced, bio-cemented sand by CaCO<sub>3</sub> seed pretreatment, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 35 (2023) 100481.
- [10] S. Sugiman, S. Salman, B. Anshari, Hydrothermal ageing of hydrophobic nano-calcium carbonate/epoxy nanocomposites, *Polym. Degrad. Stab.*, 191 (2021) 109671.
- [11] N.H. Sari, S. Suteja, C.I. Pruncu, I. Setyawan, R.A. Ilyas, L. Lamberti, Physicomechanical, water absorption and thermal properties and morphology of *Paederia foetida* fiber–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder hybrid-reinforced epoxy composites, *Polym. Int.*, 73 (7) (2024) 573–585.
- [12] F. Gapsari, A. Purnowidodo, S. Hidayatullah, S. Suteja, Characterization of timoho fiber as a reinforcement in green composite, *Journal of Materials Research and Technology*, 13 (2021) 1305–1315.
- [13] M. Ramesh, L.N. Rajeshkumar, N. Srinivasan, D.V. Kumar, D. Balaji, Influence of filler material on properties of fiber-reinforced polymer composites: A review, *e-Polymers*, 22 (1) (2022) 898–916.
- [14] N. Sienkiewicz, M. Dominic, J. Parameswaranpillai, Natural fillers as potential modifying agents for epoxy composition: a review, *Polymers (Basel)*, 14 (2) (2022) 265.
- [15] Y. Ouyang, L. Bai, H. Tian, X. Li, F. Yuan, Recent progress of thermal conductive polymer composites: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fillers, properties and applications, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 152 (2022) 106685.
- [16] Y. Wang, Y. Wang, D. Wang, Current status of research on modeling for calculating thermal conductivity of porous building materials, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 255 (2026) 127733.