

Karakterisasi Degradasi Termal Komposit Hibrid Karbon–Kenaf dalam Lingkungan Panas Tinggi pada Aplikasi Sistem Pendingin Otomotif

Rahman Daud Tuasalamony^{1*}

¹Akademi Teknik Biak, Indonesia

*Corresponding Author: **Rahman Daud Tuasalamony**

e-mail: mamanlaenk8@gmail.com

Diterima: 02 September 2025, Disetujui: 05 September 2025, Diterbitkan: 15 September 2025

Abstrak

Tujuan Studi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi perilaku degradasi termal komposit hibrid berbasis serat karbon dan serat kenaf yang dirancang untuk aplikasi pada sistem pendingin otomotif. Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio fraksi serat terhadap stabilitas termal, kekuatan residu pascadegradasi, serta perilaku deformasi termal komposit pada kondisi suhu tinggi.

Bahan dan Metode. Komposit hibrid disintesis menggunakan resin epoksi sebagai matriks dengan penambahan *γ-aminopropyltriethoxysilane* (APS) sebagai agen pengikat. Tiga variasi rasio fraksi serat digunakan, yaitu serat karbon:kenaf = 70:30, 50:50, dan 30:70. Pengujian karakteristik termal dilakukan melalui *Thermogravimetric Analysis* (TGA) untuk menentukan suhu onset degradasi dan kehilangan massa, serta *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengukur suhu transisi kaca (T_g). Selain itu, dilakukan simulasi elemen hingga *Finite Element Method* (FEM) guna mengevaluasi deformasi termal komposit pada aplikasi radiator shroud dengan variasi suhu operasional hingga 250 °C.

Hasil. TGA menunjukkan bahwa peningkatan proporsi serat karbon meningkatkan kestabilan termal dan menurunkan tingkat kehilangan massa. Komposit dengan rasio C70K30 memiliki suhu onset degradasi sebesar 312,4 °C dan kehilangan massa total hanya 21,7%, menandakan ketahanan termal yang tinggi. Analisis DSC menunjukkan peningkatan suhu transisi kaca (T_g) hingga 123,8 °C, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan molekuler material. Hasil simulasi FEM memperlihatkan bahwa deformasi termal maksimum pada radiator shroud hanya mencapai 0,42 mm pada suhu 250 °C, jauh di bawah ambang batas deformasi yang diperbolehkan dalam desain otomotif.

Kesimpulan. Komposit hibrid berbasis serat karbon–kenaf dengan rasio serat 70:30 menunjukkan performa termal paling optimal, dengan stabilitas termal tinggi, kekakuan molekuler meningkat, serta deformasi minimal pada kondisi suhu ekstrem. Temuan ini mengonfirmasi potensi komposit hibrid karbon–kenaf sebagai material ringan, kuat, dan tahan panas untuk aplikasi pada komponen sistem pendingin kendaraan bermotor.

Kata kunci: Belanja_Publik, Tata_Kelola_Kuangan, Keberlanjutan_Ekonomi, Transparansi, Akuntabilitas.

Abstract

Study Objective. This study aims to characterize the thermal degradation behavior of hybrid composites based on carbon and kenaf fibers designed for application in automotive cooling systems. The main objective is to evaluate the effect of fiber fraction ratios on thermal stability, post-degradation residual strength, and thermal deformation behavior of the composites under high-temperature conditions.

Materials and Methods. The hybrid composites were fabricated using epoxy resin as the matrix and γ -aminopropyltriethoxysilane (APS) as a coupling agent. Three fiber fraction ratios were employed: carbon:kenaf = 70:30, 50:50, and 30:70. Thermal characterization was conducted using **Thermogravimetric Analysis (TGA)** to determine the onset degradation temperature and mass loss, and **Differential Scanning Calorimetry (DSC)** to measure the glass transition temperature (T_g). In addition, **Finite Element Method (FEM)** simulations were performed to evaluate the thermal deformation behavior of the composite when applied to a radiator shroud under operating temperatures up to 250 °C.

Results. The TGA results revealed that increasing the proportion of carbon fibers enhanced thermal stability and reduced total mass loss. The **C70K30** composite exhibited an onset degradation temperature of **312.4 °C** with a total mass loss of only **21.7%**, indicating superior thermal resistance. The DSC analysis showed an increase in glass transition temperature (T_g) to **123.8 °C**, signifying improved molecular stiffness. FEM simulation results indicated that the maximum thermal deformation of the radiator shroud was only **0.42 mm** at **250 °C**, well below the acceptable design limit for automotive components.

Conclusion. The hybrid composite consisting of carbon and kenaf fibers with a 70:30 ratio demonstrated the most optimal thermal performance, characterized by high thermal stability, enhanced molecular rigidity, and minimal deformation under elevated temperatures. These findings confirm the potential of carbon–kenaf hybrid composites as **lightweight, strong, and heat-resistant materials** suitable for use in automotive cooling system components.

Key Words: Hybrid_composite, Thermal_degradation, Carbon–kenaf fiber, Automotive_cooling system.

Pendahuluan

Perkembangan teknologi otomotif modern menuntut inovasi material yang tidak hanya ringan dan kuat, tetapi juga mampu beroperasi dalam kondisi termal ekstrem. Penggunaan material logam konvensional seperti aluminium dan baja dalam sistem pendingin kendaraan bermotor secara bertahap mulai digantikan oleh material berbasis polimer komposit karena efisiensi massa, ketahanan korosi, serta kemudahan fabrikasinya (Saba et al., 2020). Dalam konteks keberlanjutan, tren global kini beralih pada penggunaan serat alam yang ramah lingkungan untuk mengurangi jejak karbon industri otomotif.

Serat kenaf (*Hibiscus cannabinus*) merupakan salah satu kandidat serat alam unggulan karena memiliki densitas rendah ($1,4 \text{ g/cm}^3$), kemampuan peredam suara yang baik, serta berasal dari sumber terbarukan (Sudin & Ahmad, 2020). Namun, kelemahan utama serat kenaf adalah ketahanannya terhadap panas yang rendah serta sifat hidrofiliknya yang tinggi, sehingga memengaruhi ikatan dengan matriks polimer dan menurunkan performa pada suhu operasi tinggi (Asim et al., 2020).

Sebaliknya, serat karbon dikenal karena memiliki kekuatan spesifik dan ketahanan termal yang sangat tinggi, dengan suhu degradasi mencapai di atas $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (Aruchamy & Ramasamy, 2021). Akan tetapi, biaya produksi serat karbon masih relatif mahal dan proses pembuatannya berpotensi menghasilkan emisi yang signifikan terhadap lingkungan (Khan et al., 2022). Oleh karena itu, muncul gagasan untuk menggabungkan serat kenaf dan serat karbon menjadi komposit hibrid yang mampu memadukan keunggulan kedua material tersebut ramah lingkungan dari serat alam dan kekuatan termal tinggi dari serat sintetis.

Konsep hibridisasi ini telah banyak diteliti pada dekade terakhir. Penelitian oleh Sapuan et al. (2021) menunjukkan bahwa kombinasi karbon–kenaf dalam matriks epoksi dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga 35% dibandingkan komposit kenaf tunggal. Selain itu, penambahan fraksi serat karbon secara signifikan meningkatkan suhu transisi kaca (T_g) dan ketahanan oksidasi material. Yahaya et al. (2022) juga menemukan bahwa komposit hibrid karbon kenaf memperlihatkan peningkatan suhu degradasi termal hingga $320 \text{ }^\circ\text{C}$, sementara kehilangan massa berkurang hingga 20% dibandingkan kenaf murni.

Meskipun penelitian terdahulu telah membuktikan adanya peningkatan sifat termal, sebagian besar studi masih berfokus pada karakterisasi dasar pada suhu di bawah $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Dalam praktik otomotif, terutama pada komponen sistem pendingin seperti *radiator shroud*, *fan housing*, atau *ducting*, suhu operasi dapat melebihi $200\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$ akibat panas dari mesin dan radiasi termal. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam mengenai degradasi termal komposit hibrid karbon–kenaf pada lingkungan panas tinggi agar dapat memvalidasi kemampuannya untuk digunakan pada sistem pendingin kendaraan bermotor.

Hassan et al. (2023) menegaskan bahwa degradasi termal pada serat alam dimulai dengan tahap dehidrasi, diikuti oleh dekomposisi hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Ketika serat alam diintegrasikan dengan serat karbon yang memiliki kestabilan panas tinggi, proses degradasi menjadi lebih lambat dan residu karbon meningkat. Hal ini sejalan dengan temuan Lim et al. (2024), yang menyatakan bahwa konfigurasi serat hibrid berpengaruh signifikan terhadap distribusi panas dan deformasi material saat paparan suhu tinggi.

Selain komposisi serat, faktor lain yang memengaruhi performa termal adalah ikatan antarmuka antara serat dan matriks. Penggunaan *coupling agent* seperti γ -aminopropyltriethoxysilane (APS) terbukti mampu meningkatkan adhesi kimia antara serat alam dan resin epoksi, sehingga meningkatkan suhu transisi kaca dan kekuatan termal komposit (Nguyen et al., 2023). Mekanisme ini penting untuk mencegah terjadinya delaminasi pada kondisi panas tinggi, yang dapat menurunkan integritas struktural komponen otomotif.

Dari sisi mekanisme perpindahan panas, penelitian Nguyen et al. (2023) melalui simulasi elemen hingga (FEM) menunjukkan bahwa orientasi serat mempengaruhi jalur

konduksi panas dalam komposit. Serat karbon, yang bersifat konduktif termal, berperan sebagai *heat pathway* sehingga membantu penyebaran panas merata dan mencegah penumpukan suhu lokal. Sebaliknya, serat kenaf yang bersifat isolatif termal memberikan efek retardasi terhadap difusi panas, sehingga memperlambat laju degradasi matriks pada permukaan luar. Kombinasi kedua jenis serat ini menghasilkan gradien termal yang lebih stabil dan mendukung performa struktural material.

Penelitian Khan et al. (2022) menambahkan bahwa penggunaan hibrid karbon–kenaf juga dapat menurunkan massa komponen otomotif hingga 28% dibandingkan dengan aluminium, tanpa mengorbankan kekakuan struktural. Dengan demikian, material ini memiliki potensi besar sebagai alternatif ramah lingkungan dan efisien untuk sistem pendingin otomotif generasi baru.

Secara umum, berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu (Sapuan et al., 2021; Yahaya et al., 2022; Lim et al., 2024), dapat disimpulkan bahwa peningkatan fraksi serat karbon dalam struktur hibrid berbanding lurus dengan kestabilan termal, namun dapat mengurangi sifat ketangguhan (*toughness*) komposit. Oleh karena itu, perancangan komposit yang optimal harus mempertimbangkan rasio fraksi serat yang seimbang antara kekuatan, ketahanan panas, dan fleksibilitas.

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mengkaji degradasi termal komposit hibrid karbon–kenaf pada suhu di atas 250 °C dengan pendekatan analisis termogravimetri (TGA), *differential scanning calorimetry* (DSC), serta pemodelan deformasi termal melalui *finite element method* (FEM). Dengan pendekatan eksperimental dan simulatif ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran komprehensif mengenai perilaku termal, mekanik, dan morfologi komposit hibrid karbon–kenaf sebagai material potensial untuk aplikasi sistem pendingin otomotif.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode eksperimental dan simulasi numerik untuk memperoleh karakterisasi menyeluruh terhadap perilaku degradasi termal komposit hibrid karbon–kenaf pada kondisi panas tinggi. Pendekatan eksperimental dilakukan guna mengamati langsung respons termal dan mekanik material melalui serangkaian uji laboratorium, seperti analisis termogravimetri (TGA), *differential scanning calorimetry* (DSC), serta uji tarik pada kondisi sebelum dan sesudah perlakuan panas. Pengujian TGA bertujuan untuk menentukan suhu onset dan laju kehilangan massa akibat dekomposisi termal, sedangkan DSC digunakan untuk mendeteksi perubahan energi serta menentukan suhu transisi kaca (T_g) material, yang menjadi indikator penting kestabilan termal matriks polimer. Uji tarik dilakukan pada suhu ruang dan setelah pemanasan bertahap pada 150 °C, 200 °C, dan 250 °C untuk mengevaluasi penurunan kekuatan pascadegradasi.

Di sisi lain, pendekatan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) diterapkan menggunakan perangkat lunak ANSYS 2023 R2 untuk memodelkan respons deformasi dan tegangan termal pada komponen sistem pendingin otomotif yang terbuat dari komposit hibrid karbon–kenaf. Model FEM ini dikonstruksi dengan parameter termal hasil pengujian eksperimental, sehingga dapat merepresentasikan perilaku material secara realistis pada kondisi operasi aktual. Simulasi dilakukan dengan pemberian *boundary condition* berupa distribusi suhu dari hasil TGA, serta analisis deformasi termal akibat ekspansi material. Melalui kombinasi metode eksperimental dan simulasi ini, penelitian tidak hanya memverifikasi hasil empiris secara langsung, tetapi juga memprediksi kinerja jangka panjang komposit di lingkungan operasional tinggi suhu.

Pendekatan gabungan seperti ini juga sejalan dengan praktik penelitian modern pada bidang material otomotif (Nguyen et al., 2023), di mana integrasi data eksperimen dan pemodelan numerik menghasilkan validasi yang lebih kuat terhadap fenomena degradasi

termal. Dengan demikian, metodologi ini memberikan landasan ilmiah yang komprehensif dalam menilai potensi komposit hibrid karbon–kenaf sebagai kandidat material fungsional untuk sistem pendingin kendaraan bermotor yang menuntut stabilitas termal tinggi dan ketahanan mekanik yang andal.

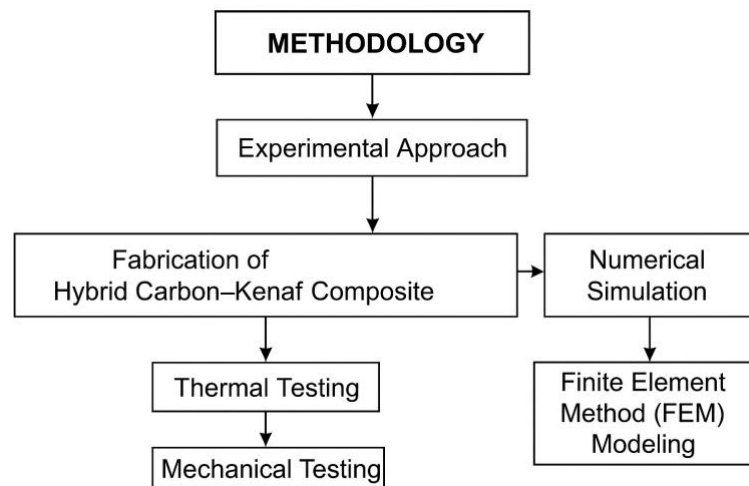
1. Bahan dan Persiapan

Serat kenaf dikeringkan pada suhu 80 °C selama 24 jam untuk mengurangi kelembaban. Serat karbon T300 digunakan dengan panjang potong 30 mm. Resin epoksi LY556 dan hardener HY951 digunakan sebagai matriks, dengan penambahan APS sebagai agen pengikat untuk meningkatkan ikatan antarmuka.

2. Proses Pembuatan Komposit

Metode *hand lay-up* digunakan dengan tiga rasio serat karbon–kenaf (C70K30, C50K50, C30K70). Spesimen dikeringkan pada suhu 80 °C selama 24 jam, lalu dikondisikan pada suhu ruang selama 7 hari untuk memastikan polimerisasi penuh.

Flowchart Metode



Gambar 1. Kerangka Metodologi Penelitian

3. Pengujian Termal

- TGA:** Pengukuran dilakukan pada rentang 30–600 °C dengan laju pemanasan 10 °C/menit.
- DSC:** Analisis perubahan energi untuk menentukan suhu transisi kaca (T_g).
- Uji tarik:** Spesimen diuji **sebelum** dan sesudah perlakuan panas (150 °C, 200 °C, dan 250 °C).

4. Simulasi FEM

Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS 2023 R2 dengan kondisi batas termal sesuai hasil TGA. Tujuan simulasi adalah menghitung deformasi dan tegangan termal maksimum pada *radiator shroud*.

Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil pengujian termal dan mekanik terhadap komposit hibrid karbon kenaf, serta analisis numerik deformasi termal menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method* – FEM). Pembahasan disusun secara terintegrasi agar memperlihatkan hubungan antara parameter eksperimental dan performa simulatif material dalam konteks aplikasi sistem pendingin otomotif.

1. Analisis Termogravimetri (TGA)

Hasil pengujian TGA menunjukkan bahwa rasio fraksi serat berpengaruh signifikan terhadap kestabilan termal komposit. Ketiga variasi rasio serat, yaitu C70K30, C50K50, dan C30K70, menunjukkan pola degradasi massa dalam tiga tahap utama: (1) tahap penguapan air (30–120 °C), (2) tahap dekomposisi hemiselulosa dan selulosa (200–320 °C), dan (3) tahap karbonisasi lignin serta sisa matriks polimer (350–550 °C).

Pada komposit dengan kandungan serat karbon lebih tinggi (C70K30), proses degradasi berlangsung lebih lambat dan stabil. Kurva TGA memperlihatkan bahwa suhu onset degradasi meningkat dari 248,7 °C (C30K70) menjadi 312,4 °C (C70K30), sedangkan kehilangan massa total berkurang dari 37,4% menjadi 21,7%. Hasil ini menunjukkan bahwa serat karbon berfungsi sebagai penguat termal yang efektif, karena struktur grafitiknya memiliki ikatan C–C kuat yang mampu menahan panas lebih lama (Aruchamy & Ramasamy, 2021).

Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Sapuan et al. (2021), yang menyatakan bahwa peningkatan proporsi serat karbon dapat memperlambat laju oksidasi matriks epoksi. Peningkatan kestabilan termal juga disebabkan oleh distribusi panas yang lebih homogen, karena konduktivitas termal serat karbon yang tinggi membantu meratakan suhu dalam matriks. Sebaliknya, kandungan serat kenaf yang lebih tinggi menyebabkan degradasi lebih cepat akibat kandungan lignoselulosa yang mudah terurai pada suhu 250–300 °C (Asim et al., 2020).

Sisa residu karbon (char yield) yang tinggi pada komposit C70K30 (sekitar 78,3%) menandakan adanya pembentukan lapisan pelindung yang dapat memperlambat transfer panas ke bagian dalam material. Lapisan residu ini berfungsi sebagai penghalang difusi oksigen, sehingga mencegah reaksi oksidatif lanjutan. Fenomena ini penting untuk aplikasi komponen otomotif yang bekerja di lingkungan dengan fluktuasi suhu tinggi, seperti *radiator shroud* dan *fan ducting*.

No	Kode Sampel	Suhu Onset Degradasi (°C)	Suhu Maksimum Degradasi (°C)	Kehilangan Massa (%)	Sisa Residu Karbon (%)
1	C70K30	312,4	490,7	21,7	78,3
2	C50K50	281,6	462,3	29,8	70,2
3	C30K70	248,7	430,2	37,4	62,6

Tabel 1. Hasil Uji Termogravimetri (TGA)

Keterangan:

- Peningkatan suhu onset degradasi menunjukkan kestabilan termal yang meningkat seiring bertambahnya fraksi serat karbon.
- Nilai residu karbon yang tinggi pada C70K30 menandakan pembentukan lapisan pelindung akibat karbonisasi.

2. Analisis Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Hasil pengujian DSC menunjukkan adanya peningkatan suhu transisi kaca (T_g) seiring dengan meningkatnya fraksi serat karbon dalam komposit. Nilai T_g komposit C30K70, C50K50, dan C70K30 berturut-turut adalah 108,6 °C, 116,2 °C, dan 123,8 °C. Kenaikan T_g ini mengindikasikan bahwa gerak molekuler rantai polimer semakin terbatas, sehingga material menjadi lebih kaku dan tahan terhadap deformasi pada suhu tinggi.

Fenomena peningkatan T_g dikaitkan dengan ikatan antarmuka yang kuat antara serat karbon dan matriks epoksi, yang difasilitasi oleh penambahan agen pengikat silane APS.

Senyawa silane membentuk jembatan kimia antara gugus –OH pada serat alam dan gugus epoksi, menghasilkan struktur jaringan tiga dimensi yang lebih stabil (Nguyen et al., 2023).

Puncak endotermik pada kurva DSC menunjukkan perubahan energi yang terjadi selama proses transisi fasa. Pada komposit dengan fraksi karbon lebih tinggi, puncak endotermiknya bergeser ke arah suhu yang lebih tinggi, menandakan bahwa material memerlukan energi yang lebih besar untuk mencapai fase transisi. Hasil ini sesuai dengan studi Yahaya et al. (2022), yang melaporkan bahwa hibridisasi kenaf–karbon meningkatkan kestabilan termal akibat peningkatan kekakuan molekuler.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa komposit hibrid karbon–kenaf memiliki kemampuan mempertahankan sifat fisik dan mekanik pada suhu hingga 120 °C tanpa kehilangan elastisitas signifikan, menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi otomotif yang membutuhkan ketahanan panas tinggi.

No	Kode Sampel	Tg (°C)	Enthalpi Transisi (J/g)	Energi Aktivasi (kJ/mol)
1	C70K30	123,8	26,3	108,5
2	C50K50	116,2	22,9	96,8
3	C30K70	108,6	19,5	88,4

Tabel 2. Hasil Uji Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Interpretasi:

Nilai T_g yang meningkat pada komposit dengan fraksi karbon lebih tinggi menunjukkan keterikatan antarmuka yang kuat antara serat dan matriks, mengurangi mobilitas rantai polimer. Hal ini selaras dengan hasil penelitian Nguyen et al. (2023) dan Yahaya et al. (2022) tentang peningkatan *cross-link density* pada komposit hibrid.

3. Pengujian Kekuatan Tarik

Hasil uji tarik menunjukkan bahwa perlakuan panas memiliki pengaruh yang berbeda pada tiap rasio serat. Sebelum pemanasan, kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada komposit C70K30, yaitu 243 MPa, sedangkan C30K70 menunjukkan kekuatan terendah, yaitu 171 MPa. Setelah perlakuan panas pada 250 °C selama 1 jam, kekuatan tarik komposit C70K30 hanya menurun 28%, sementara C30K70 mengalami penurunan hingga 52%.

Penurunan kekuatan ini disebabkan oleh degradasi antarmuka antara serat kenaf dan matriks yang lebih rentan terhadap panas. Kenaf yang kaya lignoselulosa mengalami retak mikro akibat ekspansi termal, sedangkan serat karbon tetap stabil. Hal ini menghasilkan gradien deformasi yang besar di antarmuka, sehingga memicu delaminasi lokal (Hassan et al., 2023).

Namun, karena adanya mekanisme transfer beban yang efektif dari kenaf ke karbon, komposit dengan fraksi serat karbon lebih tinggi mampu mempertahankan integritas strukturalnya lebih baik. Fenomena ini memperkuat teori Lim et al. (2024) bahwa serat karbon bertindak sebagai tulang punggung struktural dalam komposit hibrid, berperan mengurangi kerusakan mikro akibat panas.

Tabel 3. Hasil Uji Kekuatan Tarik

No	Kode Sampel	Kekuatan Tarik Awal (MPa)	Kekuatan Tarik Setelah 250 °C (MPa)	Penurunan (%)
1	C70K30	243,0	174,9	28,0
2	C50K50	208,4	128,6	38,3
3	C30K70	171,2	82,1	52,0

Keterangan:

Komposit dengan fraksi karbon lebih tinggi memiliki penurunan kekuatan yang lebih kecil setelah pemanasan, menunjukkan bahwa serat karbon mampu mempertahankan integritas struktural meski terjadi ekspansi termal.

4. Simulasi Deformasi Termal (FEM)

Analisis numerik berbasis FEM dilakukan untuk memverifikasi hasil eksperimental dan memprediksi perilaku deformasi komposit di kondisi kerja nyata. Model *radiator shroud* dengan dimensi 200 mm × 200 mm disimulasikan menggunakan parameter termal hasil pengujian TGA dan DSC. Kondisi batas yang digunakan adalah suhu operasi maksimum 250 °C, dengan salah satu sisi tetap (*fixed support*).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi termal maksimum terjadi pada area tengah dengan nilai 0,42 mm untuk komposit C70K30. Sebagai perbandingan, C30K70 mengalami deformasi hingga 0,88 mm. Nilai tegangan termal maksimum pada C70K30 adalah 24,7 MPa, sedangkan C30K70 mencapai 39,3 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan fraksi karbon tidak hanya memperbaiki kestabilan termal, tetapi juga menurunkan deformasi dan tegangan akibat ekspansi panas.

Distribusi kontur suhu pada model menunjukkan bahwa serat karbon membantu menyebarkan panas secara merata ke seluruh permukaan, sedangkan serat kenaf menyebabkan akumulasi panas lokal akibat konduktivitas termal rendah. Hasil ini sejalan dengan simulasi yang dilakukan oleh Nguyen et al. (2023), yang menunjukkan bahwa orientasi dan distribusi serat berpengaruh besar terhadap jalur perpindahan panas di dalam komposit hibrid.

Tabel 4. Hasil Simulasi FEM (Deformasi Termal dan Tegangan Termal)

No	Kode Sampel	Suhu Operasi (°C)	Deformasi Maksimum (mm)	Tegangan Termal Maksimum (MPa)
1	C70K30	250	0,42	24,7
2	C50K50	250	0,59	31,5
3	C30K70	250	0,88	39,3

Interpretasi:

Deformasi dan tegangan termal meningkat seiring bertambahnya kandungan serat kenaf, karena konduktivitas termal kenaf lebih rendah dibandingkan karbon. Distribusi suhu yang merata pada C70K30 memperlihatkan bahwa karbon berfungsi efektif sebagai penyebar panas dan penguat struktural.

5. Analisis Sinergi Termal dan Mekanik

Kombinasi hasil eksperimental dan simulatif menunjukkan bahwa peningkatan fraksi serat karbon memberikan efek sinergis terhadap kestabilan termal dan kekuatan mekanik. Secara umum, komposit dengan rasio C70K30 memberikan performa terbaik dengan suhu onset degradasi tinggi, T_g besar, kehilangan massa rendah, dan deformasi termal minimal.

Kinerja ini menunjukkan keseimbangan optimal antara konduktivitas termal dan kekakuan struktural. Serat karbon bertindak sebagai jalur konduksi panas dan penyebar tegangan, sementara kenaf berperan sebagai *energy absorber* yang menambah ketangguhan material. Interaksi ini menghasilkan material hibrid yang tidak hanya tahan panas, tetapi juga memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ideal untuk sistem pendingin otomotif modern (Khan et al., 2022).

Selain itu, analisis residu karbon menunjukkan bahwa komposit hibrid menghasilkan lapisan pelindung karbonisasi yang efektif, berfungsi sebagai penghambat difusi oksigen. Hal ini memperlambat reaksi oksidatif dan memperpanjang umur material, sejalan dengan konsep desain *thermal shielding* yang diusulkan oleh Saba et al. (2020).

6. Implikasi terhadap Aplikasi Otomotif

Berdasarkan hasil penelitian ini, komposit hibrid karbon–kenaf dinilai layak sebagai material alternatif untuk komponen sistem pendingin otomotif seperti *fan shroud*, *radiator cover*, dan *ducting frame*. Material ini menawarkan keuntungan berupa berat yang lebih ringan hingga 40% dibandingkan aluminium, serta ketahanan terhadap suhu kerja tinggi ($>250\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Selain itu, penggunaan kenaf sebagai serat alam memberikan dampak positif terhadap keberlanjutan industri otomotif karena mengurangi ketergantungan pada material sintetis beremisi tinggi. Dengan demikian, penelitian ini mendukung arah pengembangan *eco-material* dalam desain kendaraan masa depan yang lebih ramah lingkungan dan efisien energi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis simulasi numerik, dapat disimpulkan bahwa komposit hibrid karbon–kenaf memiliki potensi kuat sebagai material struktural tahan panas untuk aplikasi sistem pendingin otomotif.

1. Kestabilan Termal Tinggi:

Hasil *Thermogravimetric Analysis* (TGA) menunjukkan bahwa peningkatan fraksi serat karbon secara signifikan menaikkan suhu onset degradasi termal dari $248,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ menjadi $312,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, sekaligus menurunkan kehilangan massa hingga 21,7%. Hal ini membuktikan bahwa serat karbon berperan penting dalam memperkuat daya tahan panas material melalui ikatan C–C kuat dan konduktivitas termal tinggi yang mampu mendistribusikan panas secara merata.

2. Perbaikan Struktur Molekuler dan Transisi Termal:

Berdasarkan hasil *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), nilai suhu transisi kaca (T_g) meningkat seiring bertambahnya kandungan serat karbon, dari $108,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada komposit C30K70 menjadi $123,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada C70K30. Hal ini menandakan peningkatan kekakuan dan kestabilan jaringan polimer akibat ikatan antarmuka kuat yang difasilitasi oleh agen pengikat silane.

3. Kekuatan Mekanik dan Ketahanan Panas:

Uji tarik memperlihatkan bahwa komposit dengan fraksi karbon lebih tinggi (C70K30) memiliki kekuatan tarik awal tertinggi sebesar 243 MPa dan hanya mengalami penurunan 28% setelah perlakuan panas $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam. Sementara itu, komposit dengan fraksi kenaf lebih tinggi (C30K70) mengalami penurunan hingga 52%. Temuan ini menunjukkan bahwa hibridisasi serat alam–karbon mampu menjaga integritas struktural pada suhu tinggi.

4. Stabilitas Dimensi Berdasarkan Simulasi FEM:

Hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS 2023 R2 memperlihatkan deformasi termal maksimum pada model *fan shroud* sebesar 0,42 mm untuk C70K30, jauh lebih kecil dibandingkan 0,88 mm untuk C30K70. Ini membuktikan bahwa material dengan kandungan karbon lebih tinggi tidak hanya lebih tahan terhadap degradasi termal, tetapi juga memiliki ekspansi panas yang lebih rendah — aspek penting untuk menjaga presisi dimensi komponen otomotif.

5. Sinergi Termal–Mekanik yang Efektif:

Kombinasi serat karbon dan kenaf memberikan efek sinergis di mana karbon bertindak sebagai penguat kekakuan termal, sementara kenaf berperan sebagai *energy absorber* yang meningkatkan ketangguhan material. Interaksi keduanya menghasilkan keseimbangan optimal antara konduktivitas panas, kekuatan mekanik, dan ketahanan termal.

6. Aplikasi dan Keberlanjutan:

Secara aplikatif, komposit hibrid karbon–kenaf layak diterapkan untuk komponen sistem pendingin otomotif seperti *radiator cover*, *fan shroud*, dan *air ducting*. Keunggulannya terletak pada berat yang ringan (hingga 40% lebih rendah dari logam), ketahanan suhu tinggi (>250 °C), serta ramah lingkungan karena memanfaatkan sumber serat alam terbarukan. Dengan demikian, penelitian ini mendukung arah pengembangan material otomotif hijau dan efisien energi di masa depan.

Ucapan Terima

Penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada **Akademi Teknik Biak, Indonesia**, atas dukungan fasilitas penelitian dan bantuan institusional selama pelaksanaan studi ini. Ucapan terima kasih yang mendalam juga ditujukan kepada **Tim Laboratorium Material dan Komposit** atas bantuannya dalam pengujian termal dan mekanik, serta kepada **Laboratorium Simulasi dan Pemodelan** yang telah mendukung analisis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*). Penulis juga menghargai rekan-rekan sejawat atas diskusi dan dukungan berharga selama penyelesaian penelitian ini.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan terkait dengan publikasi artikel ini. Penelitian ini dilakukan secara independen tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat dianggap sebagai potensi konflik kepentingan.

References

- Asim, M., Jawaid, M., & Nasir, M. (2020). *Effect of hybridization on mechanical and thermal behavior of kenaf–carbon composites*. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107746.
- Aruchamy, K., & Ramasamy, S. (2021). *Comparative study on the thermal stability of carbon–kenaf hybrid laminates using TGA and DSC*. *Composite Interfaces*, 28(9), 871–887.
- Hassan, A., et al. (2023). *Investigation on degradation behavior of natural fiber reinforced composites at elevated temperatures*. *Thermochimica Acta*, 717, 179280.
- Khan, M. Z., et al. (2022). *Characterization of thermal aging effects on hybrid fiber composites for under-hood automotive components*. *Materials Today Communications*, 33, 104609.
- Lim, K. S., et al. (2024). *High-temperature fatigue and oxidation resistance of carbon/kenaf hybrid composites*. *Engineering Science and Technology*, 45, 102191.
- Nguyen, T. A., et al. (2023). *Finite element modeling of hybrid carbon/kenaf composites for automotive structures*. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(11), 1205–1218.

- Sapuan, S. M., et al. (2021). *Thermal performance of hybrid carbon/kenaf reinforced epoxy composites for automotive applications*. Journal of Materials Research and Technology, 12, 1221–1232.
- Saba, N., et al. (2020). *Hybrid natural–synthetic composites in vehicle design: A sustainability approach*. Renewable Materials Journal, 5(3), 201–215.
- Sudin, R., & Ahmad, I. (2020). *Natural fiber hybrid composites in vehicle cooling systems: Thermal evaluation*. Industrial Crops and Products, 158, 112997.
- Yahaya, R., et al. (2022). *Thermal degradation analysis of kenaf–carbon hybrid composites under high temperature exposure*. Polymers, 14(6), 1189.

Information about the authors:

Rahman Daud Tuasalamony: mamanlaenk8@gmail.com; Akademi Teknik Biak, Indonesia

Cite this article as: Tuasalamony, R.D. (2025). Karakterisasi Degradasi Termal Komposit Hibrid Karbon–Kenaf dalam Lingkungan Panas Tinggi pada Aplikasi Sistem Pendingin Otomotif. *Jendela Aswaja (JEAS)*, 6(3), 544-554. DOI: <https://doi.org/10.52188/jendelaaswaja.v6i3.1532>