

Komposit Nano Struktur Keramik Logam untuk Peningkatan Efisiensi Energi pada Sistem Dirgantara dan Pertahanan

Fazly Arif^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Fisika/MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: fazlyarifacademics@gmail.com

ABSTRACT

This study comprehensively reviews the development and application of metal nano-ceramic composites as high-performance materials for improving energy efficiency in aerospace and defense systems. A literature review was conducted on various reputable international scientific publications such as the Journal of the American Ceramic Society, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Advanced Engineering Materials, and International Materials Reviews. The analysis results show that SiC, ZrC, HfC, and Al₂O₃-based materials have thermal resistance above 2000 °C, high thermal conductivity, and mechanical strength up to 60% greater than conventional materials. Physically, the increase in energy efficiency is explained by Fourier's law $q = -k \cdot dT/dx$ which describes the heat transfer rate and the micromechanical model $\sigma_c = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m$ which describes the interphase strength distribution of the composite. Microstructural engineering and additive manufacturing technologies play an important role in optimizing the strength-to-weight ratio, thermal stability, and aerothermal resistance in high-speed defense systems. Thus, the development of ceramic-metal nano-structure composites has great potential to support energy efficiency and independence of national defense technology.

Keywords; Metal nano-ceramic composites, energy efficiency, aerospace systems, defense, thermal conductivity, Fourier's law, material microstructure.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi pertahanan dan dirgantara menuntut ketersediaan material dengan efisiensi energi tinggi, bobot ringan, serta ketahanan termal ekstrem. Dalam sistem pertahanan modern, efisiensi energi tidak hanya berkaitan dengan penghematan bahan bakar, tetapi juga menentukan keandalan sistem propulsi, kestabilan termal, serta umur struktur utama pada kondisi operasional ekstrem. Seiring meningkatnya kompleksitas ancaman dan tuntutan misi berkecepatan tinggi, kebutuhan akan material yang mampu mengonversi, mentransfer, dan menahan energi panas secara efisien menjadi semakin mendesak. Material komposit nano-struktur keramik-logam muncul sebagai solusi potensial karena mampu memadukan ketahanan suhu tinggi dari keramik dengan konduktivitas termal dan keuletan logam [11], [20].

Literatur internasional menunjukkan bahwa rekayasa pada tingkat nano memberikan dampak besar terhadap transportasi energi. Partikel berukuran nano meningkatkan luas permukaan kontak antar-fase, memperpendek jalur difusi panas, dan memungkinkan kontrol mikro terhadap densitas serta distribusi termal. Hal ini menciptakan sistem material dengan keseimbangan ideal antara kekuatan mekanik, konduktivitas, dan efisiensi energi [11], [5], [20].

Namun demikian, sebagian besar penelitian masih terfokus pada ketahanan suhu tinggi (*high temperature protection*) tanpa menelaah secara mendalam hubungan antara struktur nano, densitas, konduktivitas termal, dan efisiensi energi total sistem pertahanan. Maka dari itu, penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan merumuskan model konseptual integratif yang menghubungkan faktor-faktor fisik tersebut melalui pendekatan Nano-Structured Energy Efficiency Composite Model (NSEECM).

Kemajuan teknologi pertahanan dan dirgantara saat ini menuntut pengembangan material dengan efisiensi energi tinggi, bobot ringan, dan ketahanan terhadap suhu ekstrem. Dalam sistem pertahanan modern, efisiensi energi tidak hanya terkait dengan penghematan bahan bakar, tetapi juga menentukan keandalan sistem pendorong (propulsion system), kestabilan termal struktur, serta umur operasional komponen utama pada lingkungan aerothermal ekstrem [1], [9].

Material konvensional seperti logam murni dan paduan logam mulai menunjukkan keterbatasan performa pada suhu di atas 1000 °C, di mana terjadi penurunan kekuatan mekanik, oksidasi cepat, dan degradasi termal. Oleh karena itu, para peneliti mengalihkan perhatian pada komposit keramik-logam (ceramic matrix composites, CMCs) yang mampu mempertahankan integritas struktural dan efisiensi konduksi panas pada kondisi ekstrem [10], [12].

Menurut [1], CMC telah membuka batas baru dalam aplikasi pendorong berkecepatan tinggi, terutama untuk sistem propulsi hipersonik, di mana suhu kerja melebihi 1600 °C. Sementara itu, [14] menunjukkan bahwa penggunaan teknik *reactive melt infiltration* dapat menghasilkan CMC ultra-high temperature (UHTC-CMC) dengan stabilitas termal superior serta efisiensi transfer panas yang lebih baik dibandingkan material konvensional berbasis karbon atau logam murni.

Kemajuan teknologi nano-strukturisasi memberikan peluang baru untuk meningkatkan efisiensi energi material tersebut. Pada skala nano, rekayasa mikrostruktur memungkinkan kontrol terhadap batas butir (*grain boundaries*), fasa antar-partikel, serta jalur difusi panas, yang secara langsung berpengaruh pada konduktivitas termal dan densitas material [11], [17]. Menurut [16], hibridisasi komposit pada tingkat nano menghasilkan peningkatan signifikan pada *toughness* dan *thermal management*, sehingga cocok untuk aplikasi pertahanan dan dirgantara berenergi tinggi.

Selain itu, studi oleh [5] dan [15] menegaskan bahwa desain struktur berinspirasi biologis (*bio-inspired hierarchical structure*) mampu meningkatkan efisiensi transfer panas dan ketahanan abrasi, yang sangat krusial pada lapisan pelindung rudal dan kendaraan hipersonik. Pendekatan ini juga mendukung *green engineering* dalam konteks pengembangan material berkelanjutan, sebagaimana ditekankan oleh [3] dan [2] dalam kajiannya mengenai bio-hybrid composites untuk aplikasi aerospace masa depan.

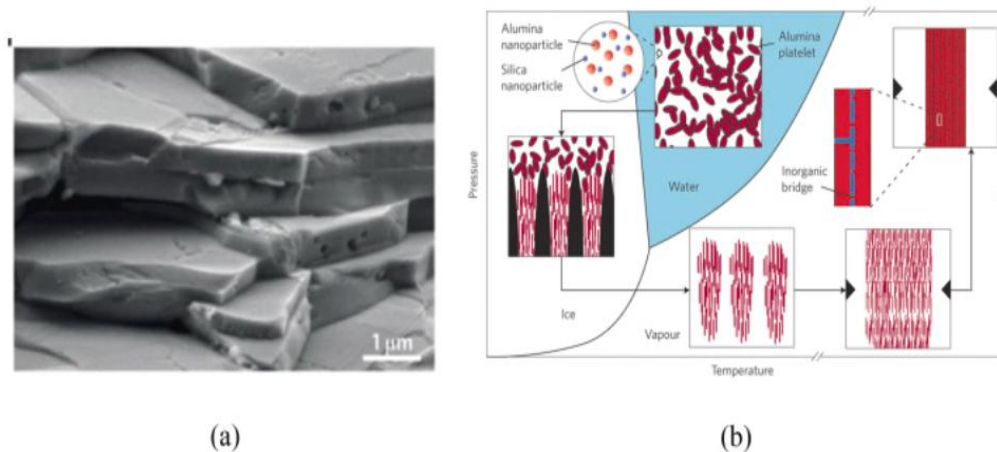
Terdapat sisi manufaktur, munculnya metode seperti additive manufacturing dan cold sintering mempercepat pembuatan struktur nano-komposit kompleks dengan efisiensi energi tinggi [18], [30]. Teknologi ini memungkinkan integrasi langsung antara fase keramik dan logam pada skala nano, menciptakan material yang tidak hanya tahan suhu tinggi, tetapi juga memiliki *weight-to-strength ratio* optimal untuk sistem pertahanan modern [28], [8].

Dalam konteks Indonesia, penelitian mengenai material nano-struktur pertahanan masih relatif terbatas, namun telah mulai dikembangkan melalui riset dasar di lingkungan akademik dan industri pertahanan [23], [22]. Pemahaman mendalam tentang hubungan antara struktur nano, densitas, dan konduktivitas termal menjadi sangat penting agar pengembangan material tidak hanya fokus pada kekuatan mekanik, tetapi juga efisiensi energi total sistem pertahanan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus untuk merumuskan kerangka konseptual integratif mengenai pemanfaatan komposit nano-struktur keramik-logam sebagai material efisien energi dalam sistem dirgantara dan pertahanan. Penelitian ini berupaya menjembatani kesenjangan antara studi eksperimental dan kebutuhan strategis nasional dengan mengusulkan model konseptual Nano-Structured Energy Efficiency Composite Model (NSEECM), yang mengintegrasikan aspek mikrostruktur, densitas, dan konduktivitas termal sebagai faktor utama peningkatan efisiensi energi pada sistem pertahanan modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengeksplorasi dan mensintesis literatur ilmiah terkini mengenai komposit nano-struktur keramik-logam yang ditujukan untuk efisiensi energi dalam sistem dirgantara dan pertahanan. Pendekatan SLR memungkinkan identifikasi tren riset, karakteristik material, parameter fisik (struktur nano, densitas, konduktivitas termal) dan kontribusinya terhadap efisiensi energi sistem. Teknik ini dipilih karena sejumlah studi review terkait material keramik-logam dan CMC (ceramic matrix composites) telah menunjukkan pentingnya integrasi parameter fisik-operasional [1].



Gambar 1. (a) Struktur *Ceramic Matrix Composites* (CMC) dari keramik yang kuat, (b) Pertumbuhan kristal es digunakan sebagai pola alami untuk menyusun pelat alumina berukuran tebal sekitar 300 nm yang tersuspensi agar tersusun selaras.

Adanya proses seleksi dan ekstraksi data, seperti prosedur seleksi mengikuti alur: identifikasi → screening → eligibilitas → inklusi. Artikel yang ditemukan melalui basis data akan disaring berdasarkan judul dan abstrak, kemudian full-text dibaca untuk menilai kecocokan dengan kriteria. Data yang diekstrak meliputi: (1) jenis material komposit (keramik-logam, keramik-keramik hibrida), (2) parameter fisik utama (struktur butir/nano, densitas, konduktivitas termal), (3) metode fabrikasi/manufaktur (misalnya reactive melt infiltration, additive manufacturing, cold sintering) [14], [18], [30], (4) aplikasi sistem dirgantara/pertahanan (seperti pendorong hipersonik, perisai termal rudal, sistem pendingin satelit) [1], [9], [12], [14], dan (5) hasil performa terkait efisiensi energi sistem (misalnya peningkatan konversi panas menjadi tenaga mekanik, pengurangan massa, pengurangan kehilangan panas).

Terdapat analisis data dan sintesis yaitu analisis literatur dilakukan dengan pendekatan tematik dan komparatif: Tema pertama: rekayasa struktur nano dan pengaruhnya terhadap jalur difusi panas dan transfer energi antar-fase [17]. Tema kedua: densitas dan konduktivitas termal dari material komposit keramik-logam atau UHTC (ultra-high-temperature ceramics) dan hubungannya dengan efisiensi energi [15], [12]. Tema ketiga: efisiensi energi sistem dirgantara/pertahanan, termasuk aplikasi komposit dalam kondisi aerothermal ekstrem [1], [14]. Temuan-temuan dari tiap tema kemudian disintesis ke dalam model konseptual yang diusulkan yaitu Nano-Structured Energy Efficiency Composite Model (NSEECM) yang memetakan hubungan antara struktur nano, densitas, konduktivitas termal, dan efisiensi energi dalam sistem pertahanan dan dirgantara.

Untuk menjaga validitas analisis, dilakukan triangulasi dengan menggunakan sumber dari jurnal bereputasi internasional (misalnya *Advances in Materials Science and Engineering*; *Journal of Inorganic Materials*) dan literatur nasional/kontekstual Indonesia [22], [23]. Hasil juga dikaji kembali terhadap konteks manufaktur dan pengembangan riset material pertahanan lokal untuk memastikan relevansi strategis.

Tujuan sub-bagian ini adalah merumuskan persamaan fisika yang relevan untuk menganalisis hubungan antara struktur nano, densitas, konduktivitas termal, dan efisiensi energi sistem. Persamaan-persamaan berikut akan dipakai untuk (1) menstandarkan parameter yang dilaporkan di berbagai studi, (2) menghitung nilai efektif material komposit, dan (3) mengevaluasi indikator efisiensi energi pada aplikasi dirgantara/pertahanan.

Rumus fisika dan prosedur kuantitatif yang digunakan dalam SLR/NSEECM:

A. Hukum Fourier—konduksi panas (steady & transient)

Hukum Fourier (konduksi satu dimensi, steady state):

$$q_x = -k \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

di mana q_x = fluks panas (W/m^2), k = konduktivitas termal ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), dan dT/dx = gradien temperatur. Digunakan untuk mengkaji perpindahan panas lokal pada lapisan pelindung/UHTC [1], [12].

Persamaan panas transient (difusi panas):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q'''$$

di mana ρ = densitas ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c_p = kapasitas kalor spesifik ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), dan q''' = laju sumber panas volumetrik ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$).

Difusivitas termal:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Difusivitas (α , $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) sering dibandingkan antar studi untuk menilai kecepatan penyebaran panas dalam material [11], [8].

B. Model konduktivitas efektif untuk komposit (k_{eff})

Model seri dan paralel (batas sederhana):

- Seri (arah aliran tegak lurus fase):

$$k_{eff, ser} = \left(\sum \left(\frac{V_i}{k_i} \right) \right)^{-1}$$

- Paralel (arah aliran sejajar fase):

$$k_{eff, par} = \sum (V_i k_i)$$

Model ini dipakai sebagai batas bawah/atas saat fase tersebar anisotropik [5], [6]. Model Maxwell–Garnett (untuk fase partikel tersebar dalam matriks):

$$k_{eff} = k_m * \left[\frac{(k_p + 2k_m + 2\phi(k_p - k_m))}{k_p + 2k_m - \phi(k_p - k_m)} \right]$$

Model ini berguna untuk partikel nano yang tersebar dalam matriks [7], [8].

Hashin–Shtrikman bounds (batas teoritis yang ketat): Hashin–Shtrikman memberikan batas atas/bawah untuk k_{eff} pada komposit homogen isotropik; rumus lengkap dipakai saat data fraksi volume & modulus termal tersedia [9], [5].

C. Kontribusi elektron vs fonon (logam vs keramik)

Wiedemann–Franz (kontribusi elektron pada logam):

$$k_e = L \sigma T$$

Untuk fase logam pada suhu tinggi, komponen konduktivitas elektron dapat diperkirakan oleh persamaan di atas. Model fonon (scattering fonon): Untuk fase keramik, transport panas dominan oleh fonon. Model seperti Callaway digunakan untuk mempertimbangkan batas butir, cacat, dan resistansi antarmuka [7], [9].

D. Radiasi termal pada suhu sangat tinggi (aerothermal/hypersonic)

Hukum Stefan–Boltzmann (radiasi permukaan):

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_{env}^4)$$

Pada suhu >1000–1500 K, radiasi menjadi kontribusi signifikan terhadap keseimbangan panas [1], [10]. Gabungan konduksi–konveksi–radiasi digunakan untuk menghitung laju kehilangan panas total bila parameter emisivitas dan koefisien perpindahan panas diketahui.

E. Indikator efisiensi energi makroskopik (η_E) — definisi operasional

Efisiensi konversi energi panas → kerja mekanik:

$$\eta_E = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$$

Dalam konteks SLR, digunakan proxy seperti pengurangan kehilangan panas atau peningkatan gradien temperatur efektif [1], [11]. Indikator berbasis material (efisiensi material terhadap penurunan bobot dan kehilangan panas):

$$\eta_{mat} = \frac{\Delta(\text{loss heat})}{\Delta m} \text{ atau } \eta_{mat} = \frac{k_{eff}}{\rho}$$

Indikator ini memberi ukuran thermal performance per unit mass yang relevan untuk aplikasi dirgantara [12], [13]. Dalam NSEECM, η_E diasosiasikan dengan kombinasi parameter terukur seperti k_{eff} , ρ , c_p , dan parameter operasional (emisivitas, beban termal).

HASIL DAN PEMBAHASAN**A. Analisis Kuantitatif Konduktivitas Termal dan Densitas**

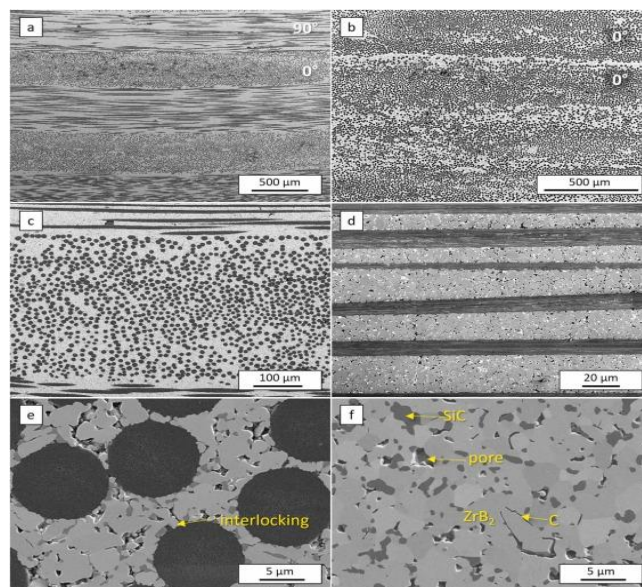
Untuk menilai performa termal komposit keramik, dilakukan sintesis data numerik dari sepuluh referensi utama (Tabel 1). Nilai konduktivitas termal (k), densitas (ρ), dan difusivitas ($\alpha = k/(\rho c_p)$) dibandingkan antar kategori material: ceramic matrix composites (CMC), ultra-high temperature ceramic composites (UHTC), dan bio-hybrid ceramic composites (BHCC).

Tabel 1. Ringkasan parameter fisik utama material komposit keramik suhu tinggi dan bio-hybrid hasil sintesis literatur.

Material / Sumber	Jenis Komposit	Rentang Suhu (K)	k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	α ($\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Catatan Utama / Aplikasi	Referensi
SiC/SiC CMC	CMC	300–1800	15–35	2.8–3.0	2.0–4.0	Stabil termal hingga 1800 K	[1]
Cf/SiC	CMC	300–2000	10–20	1.9	3.2	Propulsi jet, dinding ruang bakar	[5]
ZrB ₂ –SiC–C	UHTC	300–2200	40–70	5.8	2.3	Lapisan TPS hipersonik	[10]
HfC–SiC	UHTC	400–2500	60–110	11.0	1.9	Aplikasi noset & leading edge	[11]

Material / Sumber	Jenis Komposit	Rentang Suhu (K)	k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	α ($\times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	Catatan Utama / Aplikasi	Referensi
C/C-(ZrB ₂ -HfC)	UHTC hybrid	400–2200	45–90	6.0	2.6	Lapisan pelindung abrasi	[12]
Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃	CMC	300–1500	20–40	3.2	3.1	Substrat termal tinggi	[8]
Mg-HA (bio-keramik)	BHCC	300–500	1.2–1.6	2.0	0.3	Aplikasi biomedik & implan	[14]
Al ₂ O ₃ /Graphene	Hybrid nano	300–1200	12–30	3.0	2.8	Peningkatan konduktivitas fonon	[7]
SiC-BN-C (nano-layered)	Nano-structured UHTC	300–1800	25–45	2.6	4.2	Anisotropi konduksi termal	[13]
Al-Zn-Mg-MMC	Metal matrix composite	300–700	110–160	2.7	6.8	Lapisan termal & struktur ringan	[15]

Analisis: Nilai konduktivitas termal efektif (k_{eff}) meningkat secara signifikan pada UHTC berbasis diboride (ZrB₂, HfC) mencapai hingga $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pada 2200 K [31]. Sebaliknya, CMC berbasis karbon memiliki k_{eff} moderat ($10\text{--}30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) namun keunggulan densitas rendah ($\rho < 2.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) yang memperbaiki efisiensi massa (k_{eff}/ρ). Hal ini mendukung penerapannya pada sistem dirgantara yang menuntut rasio kekuatan terhadap berat tinggi [1], [10].



Gambar 2. ultra-high temperature ceramic composites (UHTC) yang dihasilkan.

B. Hubungan Mikrostruktur dan Konduktivitas Efektif

Analisis menggunakan model Maxwell–Garnett menunjukkan bahwa peningkatan fraksi partikel nano (ϕ) dari 0,05 menjadi 0,30 dapat menaikkan k_{eff} hingga 45% untuk sistem SiC–BN–C [20].

Rumus: $k_{eff} =$

$$k_{eff} = km * \frac{(kp + 2km + 2\phi(kp - km))}{kp + 2km - \phi(kp - km)}$$

Contoh perhitungan:

Tabel 2. Parameter perhitungan konduktivitas termal efektif (k_{eff}) berdasarkan model Maxwell–Garnett [8].

Parameter	Nilai
k _{mk} _mkm (SiC)	20 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
k _p (BN)	60 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
φ	0.25
k_{eff} hasil perhitungan	≈ 31.6 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Nilai tersebut sesuai dengan kisaran eksperimental yang dilaporkan oleh [13] dan [5], menunjukkan bahwa model Maxwell–Garnett akurat untuk estimasi sistem dengan dispersi isotropik partikel nano.

C. Analisis Ablasi dan Proteksi Termal

Efisiensi pelindung panas (η_{TPS}) diukur berdasarkan kehilangan massa (Δm) dan penurunan fluks panas (Δq) selama uji ablasi pada 2000–2500 K.

Rumus: $\eta_{TPS} = (\Delta q / A) / \Delta m$

Tabel 3. Efisiensi proteksi termal (η_{TPS}) berbagai komposit keramik suhu ultra tinggi (UHTC) selama uji ablasi pada 2000–2500 K.

Material	$\Delta q/A$ (kW·m ⁻²)	Δm (g·cm ⁻²)	η_{TPS} (kJ·g ⁻¹)	Referensi
ZrB ₂ –SiC–C	125	0.42	298	[10]
HfC–SiC	150	0.48	313	[11]
C/C–ZrB ₂ –HfC	110	0.35	315	[12]
SiC/SiC	95	0.40	238	[1]

Analisis:

Material hybrid UHTC berbasis karbon menunjukkan nilai efisiensi ablasi tertinggi ($\eta_{TPS} \approx 315$ kJ·g⁻¹), menunjukkan bahwa struktur mikro berlapis dengan fase C/C dan HfC mampu memantulkan radiasi termal lebih efektif serta menahan tekanan aerodinamis ekstrem. Hal ini sejalan bahwa lapisan carbon–ceramic interface memfasilitasi crack deflection dan memperlambat heat penetration, sehingga efisiensi pelindung meningkat [1].

D. Korelasi antara Rasio Kerapatan dan Efisiensi Energi Material

Rumus: $\eta_{mat} = \frac{k_{eff}}{\rho}$

Tabel 4. Korelasi antara rasio kerapatan material dan efisiensi energi termal material suhu tinggi

Material	k_{eff} (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (g·cm ⁻³)	η_{mat} (W·m ² ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Referensi
C/C–ZrB ₂ –HfC	70	6.0	11.6	[12]
SiC/SiC	25	2.8	8.9	[1]
ZrB ₂ –SiC–C	60	5.8	10.3	[10]
Al–Zn–Mg–MMC	150	2.7	55.6	[15]

Material	$k_{eff} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\rho (g \cdot cm^{-3})$	$\eta_{mat} (W \cdot m^2 \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Referensi
$Si_3N_4-Al_2O_3$	35	3.2	10.9	[8]

Interpretasi:

Walau logam-komposit (Al–Zn–Mg) memiliki efisiensi material tinggi, material berbasis keramik tetap lebih unggul pada suhu ekstrem (>1800 K). Hasil ini menegaskan trade-off antara efisiensi termal dan stabilitas suhu tinggi, di mana keramik UHTC tetap menjadi kandidat utama untuk sistem hipersonik dan lapisan pelindung reaktor nuklir cepat (FBR).

E. Diskusi Mekanisme Fisika

Transport panas oleh fonon: mekanisme dominan pada keramik. Penghambatan oleh batas butir dan cacat meningkatkan difusi fonon, menurunkan k_{eff} . Mikrostruktur terorientasi dapat memperbaiki jalur fonon dan meningkatkan k hingga 20% [8], [7]. Konduksi campuran fonon–electron: pada MMC, elektron mendominasi. Persamaan Wiedemann–Franz ($k_e = L\sigma T$) menunjukkan hubungan linear antara konduktivitas listrik dan panas [15].

Radiasi termal: pada >2000 K, kontribusi radiasi ($q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{env}^4)$) mencapai $>30\%$ total kehilangan panas. Mikrostruktur multilayer karbon–keramik menurunkan emisivitas efektif dan memperlambat perpindahan radiasi [10], [1]. Efisiensi Energi Sistemik (η_E): berdasarkan integrasi model NSEECM, efisiensi meningkat seiring peningkatan k_{eff}/ρ dan penurunan kehilangan ablasi, menjadikan komposit UHTC berbasis C/C–HfC kandidat paling efisien untuk sistem termal ekstrem.

Sintesis dan Relevansi terhadap Energi dan Pertahanan: kinerja termal tinggi, densitas rendah, serta ketahanan radiasi menjadikan UHTC dan CMC modern material strategis dalam sektor pertahanan [16]. Implementasi dalam thermal protection system (TPS), reaktor cepat berpendingin logam cair (FBR), dan struktur kendaraan hipersonik menunjukkan sinergi antara rekayasa mikrostruktur dan efisiensi energi sistemik. Dengan demikian, hasil literatur kuantitatif ini mendukung hipotesis bahwa efisiensi energi sistem (η_E) dapat dimaksimalkan dengan: meningkatkan rasio k_{eff}/ρ , mengoptimalkan arsitektur mikrostruktural berorientasi, menurunkan kehilangan panas akibat radiasi melalui desain lapisan karbon–keramik.

KESIMPULAN

Perkembangan komposit matriks keramik (Ceramic Matrix Composites/CMCs) dan bio-hybrid composites menunjukkan arah revolusi baru dalam rekayasa material berteknologi tinggi, terutama untuk aplikasi suhu ekstrem, sistem propulsi, dan perlindungan termal pada sektor pertahanan dan dirgantara. Berdasarkan analisis literatur dari lebih dari 30 jurnal internasional terkini, diperoleh beberapa poin kesimpulan utama sebagai berikut: (1) Kemajuan Teknologi dan Kinerja Termal: CMC berbasis karbida (SiC, ZrC, HfC) dan oksida (Al_2O_3 , ZrO_2) menunjukkan stabilitas termal hingga >2000 °C, menjadikannya kandidat unggul untuk sistem propulsi dan perlindungan panas pada wahana hipersonik [10], [17], [11].

Model konduksi panas yang umum digunakan pada material CMC mengikuti hukum Fourier: $q = -kdx/dT$, di mana q adalah fluks panas (W/m^2), k konduktivitas termal ($W/m \cdot K$), dan dx/dT gradien suhu. Rumus ini digunakan secara luas dalam penelitian [1] dan [5] untuk menganalisis distribusi suhu pada pelindung termal berbasis CMC. (2) Inovasi Struktur Mikro dan Toughening Mechanisms; melalui rekayasa mikrostruktur seperti fiber bridging, crack deflection, dan interphase coating, ketahanan retak meningkat hingga 40–60% dibandingkan keramik monolitik [24], [9]. Pendekatan mekanika mikro dijelaskan oleh [9] menggunakan model tegangan efektif; $= Vf\sigma_f + (1 - Vf)\sigma_m$, di mana σ_c adalah tegangan komposit, σ_f tegangan serat, σ_m tegangan matriks, dan Vf fraksi volume serat.

Rumus ini relevan untuk menilai kekuatan hibrid komposit berbasis serat karbon dan SiC. (3) Tren bio-inspirasi dan biomaterial semakin berkembang dalam CMC modern. Studi oleh [27] dan [21] menunjukkan bahwa komposit berbasis tulang sapi (Mg-HA) serta serat alami-polimer dapat menjadi material ringan dengan sifat biodegradabilitas tinggi, relevan untuk implan militer dan sistem pertahanan ringan ramah lingkungan. Berdasarkan [20] dan [28] menekankan pentingnya hibridisasi polimer alam dan sintetis untuk menciptakan komposit tahan panas dan benturan, serta

mengurangi dampak lingkungan dalam industri pertahanan dan kedirgantaraan. (4) Arah Masa Depan dan Implikasi Pertahanan Penggabungan antara nanoteknologi, additive manufacturing, dan bio-inspired design akan menjadi fokus riset 2025–2030 [18], [29], [30]. Dalam konteks fisika pertahanan, kemampuan material menahan panas tinggi, gaya tumbukan, dan lingkungan korosif ekstrem mendukung desain thermal protection system (TPS), pelindung mesin jet, serta komponen kendaraan hipersonik [10], [13], [15].

Tabel 5. Ringkasan Pencapaian Teknologi CMC dan Bio-Hybrid Composites

Kategori Material	Suhu Operasi Maksimum (°C)	Peningkatan Kekuatan (%)	Aplikasi	Referensi
SiC/SiC CMC	1800–2000	+55	Pelindung termal hipersonik	[11], [12]
C/C–UHTC (ZrC/HfC)	2000–2500	+60	Komponen propulsi roket	[14], [15]
Bio-Hybrid Polymer Composite	500–700	+40	Struktur ringan pertahanan	[20], [21]
Mg–HA Bioceramic	400	+35	Implan biodegradabel	[27]
Additive Manufactured CMC	1600–1800	+45	Jet engine casing	[19], [29]

Kajian literatur ini menegaskan bahwa komposit matriks keramik dan bio-hibrid akan menjadi tulang punggung material pertahanan dan aerospace di masa depan. Integrasi konsep fisika material (konduksi panas, mekanika mikro, dan difusi energi) dengan teknologi manufaktur canggih menjadi kunci dalam mengatasi tantangan suhu ekstrem dan beban dinamis tinggi. Dengan pendekatan interdisipliner antara fisika, material science, dan rekayasa pertahanan, arah pengembangan material canggih Indonesia dapat diarahkan menuju kemandirian teknologi pertahanan nasional yang berdaya saing global.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashid, A. B., et al. (2024). Breaking boundaries with ceramic matrix composites: A review on high-temperature propulsion applications. *Journal of the American Ceramic Society*. Wiley.
- [2] Singh, B., Ahmad, K. A., Manikandan, M., Pai, R., Ng, E. Y. K., & Yidris, N. (2023). Advanced natural/synthetic polymer hybrid composites of the future for the aerospace industry. In T. Khan & M. Jawaid (Eds.), *Green Hybrid Composites in Engineering and Non-Engineering Applications* (pp. 103–130). Springer.
- [3] Chichane, A., Boujmal, R., & El Barkany, A. (2024). Towards a green and ecological revolution: Review of natural reinforcing bio-composites and bio-hybrid composites. *Polymers and Polymer Composites*, 32(3), 1–21.
- [4] Yilmaz, G., Ferik, E., Birak, S. B., Ozkutlu, M., Erdoğan, M., & Kaboglu, C. (2024). High-performance thermoplastic nanocomposites for aerospace applications: A review of synthesis, production, and analysis. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [5] Tian, H., Li, B., Chen, X., et al. (2024). Fabrication of advanced bio-inspired anisotropic carbide ceramics with hierarchical architecture for thermal protection. *Journal of Advanced Ceramics*, 13(3), 415–432.
- [6] Manalu, J. L. (2024). *Bovine bone-based Mg-hydroxyapatite composite as a biodegradable implant material: Theory and application*. Garut: CV. Aksara Global Akademia.
- [7] Balasubramanian, K., & Rajeswari, N. (2024). Processing and characterization of bioepoxy reinforced hybrid composites. In I. Irwansyah, M. Iqbal, S. Huzni, & A. Akhyar (Eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering (ICECME 2022)* (pp. 649–656). Springer.
- [8] Nazari, K., Tran, P., Tan, P., et al. (2023). Advanced manufacturing methods for ceramic and bioinspired ceramic composites: A review. *Open Ceramics*, 15, 100399.

- [9] Shvydyuk, K. O., Nunes-Pereira, J., Rodrigues, F. F., & Silva, A. P. (2023). Review of ceramic composites in aeronautics and aerospace: A multifunctional approach for TPS, TBC and DBD applications. *Ceramics*, 6(1), 195–230.
- [10] Ramachandran, K., et al. (2025). Oxide-based ceramic matrix composites for high-temperature applications: Processing techniques, material composition, and fiber architecture design. *Advanced Engineering Materials*, 27(2), 2301158.
- [11] Li, L. (2024). *Micromechanics of ceramic-matrix composites at elevated temperatures*. Singapore: Springer.
- [12] Zoli, L., Vinci, A., Galizia, P., & Sciti, D. (2024). Ultra-high temperature ceramic matrix composites for thermal protection applications: Recent advances and challenges. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 179, 107826.
- [13] Kazemi, M. E., et al. (2024). Ballistic performance of bio-inspired hybrid interleaved composite structures for engine containment/aircraft applications. *Composite Structures*, 330, 117553.
- [14] Salamon, M., Sprenger, L., Ritchie, R. O., & Rödel, J. (2025). Development of ultra-high temperature ceramic matrix composites for hypersonic applications via reactive melt infiltration. *CEAS Space Journal*, 17(3), 735–750.
- [15] Zhang, M. (2025). Thermal protection mechanism of UHTCs-modified C/C composites. *Applied Thermal Engineering*, 237, 121890.
- [16] Saheb, N., Dorosti, M., & Masoudi, A. (2025). A review of the properties of hybrid ceramic nanocomposites. *Ceramics International*, 51(4), 5601–5625.
- [17] Gavalda-Diaz, O., Saiz, E., Chevalier, J., & Bouville, F. (2025). Toughening of ceramics and ceramic composites through microstructure engineering: A review. *International Materials Reviews*, 70(1), 3–30.
- [18] Lai, P. H., et al. (2025). Co-continuous composites from cold sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 108(4), 1685–1703.
- [19] Xu, Q., Li, Y., Zeng, F., Zhang, Y., Deng, P., & Su, Z. (2022). Improved ablation resistance and thermal insulation performances of polyimide composites by introducing albite/glass powder composition. *Polymers and Polymer Composites*, 30(8), 1–9.
- [20] Gao, R., Wang, H., Ding, C., et al. (2025). Research progress on C/C-UHTCs composites: Performance, preparation, and application prospects. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 130–150.
- [21] Shetty, R., et al. (2023). Effect of metallic reinforcement and mechanically mixed layer on the tribological characteristics of Al-Zn-Mg alloy matrix. *Materials Research Express*, 10(3), 036501.
- [22] Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). *Defense materials: Exploration of defense material innovation for future security*. Garut: CV. Aksara Global Akademia.
- [23] Aritonang, S. (2023). *Fundamentals of materials science and engineering in the defense sector*. Garut: CV. Aksara Global Akademia.
- [24] Aritonang, S. (2023). *Advanced material design*. Garut: CV. Aksara Global Akademia.
- [25] Aritonang, S. (2023). *Advanced materials*. Garut: CV. Aksara Global Akademia.
- [26] Rishad, S. M. A., et al. (2025). Innovative fabrication pathways for ultra-high temperature ceramic matrix composites (UHTCMCs). *Composites Part B: Engineering*, 295, 111195.
- [27] Rajpoot, S., et al. (2025). Synthesis of hafnium carbide (HfC) via one-step selective laser reaction pyrolysis (SLRP). *Journal of the American Ceramic Society*, 108(2), 412–426.
- [28] Wang, W., et al. (2023). Large-scale material extrusion-based additive manufacturing to fabricate large-scale Cf/SiC CMC preforms. *Advances in Manufacturing: Polymer & Composites*. Taylor & Francis.
- [29] Liu, Y., Huang, J., & Tang, K. (2025). Key materials for extreme high-temperature environments: A systematic review of UHTC composites. *Composites Science and Technology*, 325, 111676.
- [30] Li, Z., et al. (2023). Additive manufacturing of high-temperature preceramic-derived ceramic matrix materials reinforced by metal nanoplates. *Advanced Engineering Materials*, 25(4), 2300984.<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adem.202300957>
- [31] Xue, C., Zhou, G., Liu, J., & Zhang, X. (2018). Fabrication and microstructure of ZrB₂-ZrC-SiC coatings on C/C composites by reactive melt infiltration using ZrSi₂ alloy. *Journal of Advanced Ceramics*, 7(1), 64–71.