

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi Panas

Kalor didefinisikan sebagai bentuk energi yang berpindah akibat gradien termal antara dua sistem. Secara fundamental, transfer energi termal ini terjadi secara spontan dari zona bertemperatur tinggi menuju zona bertemperatur lebih rendah, sebagaimana dijelaskan dalam hukum termodinamika kedua. Dalam konteks makroskopis, radiasi matahari menempati posisi sebagai sumber energi kalor dominan di ekosistem bumi, menyumbang lebih dari 99% total energi termal yang diterima permukaan planet (A. Hu dkk., 2025).

Karakteristik intrinsik energi termal mencakup sifat imperceptible terhadap indera penglihatan dan pendengaran, meskipun efek fisiologisnya dapat terdeteksi melalui perubahan suhu. Dari perspektif mekanisme perpindahan, kalor melakukan transmisi melalui tiga moda utama: konduksi (transfer melalui medium padat tanpa disertai perpindahan materi), konveksi (aliran melalui medium fluida yang melibatkan pergerakan partikel), dan radiasi (propagasi gelombang elektromagnetik) (Abdel-rahman dkk., 2025).

Implementasi praktis energi termal dalam antropogenik mencakup spektrum aplikasi yang luas. Sektor energi memanfaatkan prinsip konversi termodinamika untuk menghasilkan listrik melalui pembangkit listrik tenaga uap dan surya. Pada sektor agroindustri, energi panas diaplikasikan dalam proses dehidrasi produk pertanian seperti sereal, biji kopi, dan rempah-rempah untuk meningkatkan masa simpan. Inovasi terkini juga

mengembangkan teknologi desalinasi berbasis distilasi termal untuk mengatasi krisis air bersih di wilayah pesisir (Kryshtal & Khshanovska, 2025).

Secara historis, konseptualisasi kalor mengalami evolusi pemikiran sejak era Yunani Kuno hingga abad ke-18. Teori atomistik Demokritus yang menyatakan kalor sebagai manifestasi gerakan partikel mikroskopis mendapat validasi empiris melalui eksperimen ilmuwan Renaissance seperti Galileo Galilei dan Isaac Newton. Perkembangan instrumentasi presisi pada abad ke-19 memungkinkan kuantifikasi kalor secara termodinamika melalui kalorimeter, mengungkap prinsip kekekalan energi dalam pertukaran termal antar benda (Kryshtal & Khshanovska, 2025).

2.1.1. Mekanisme Perpindahan Panas

Transfer kalor sebagai fenomena alamiah dapat dikaji melalui prinsip fisika fundamental dan memainkan peran vital dalam sistem Bumi. Mekanisme konveksi, salah satu mode transfer termal, terjadi ketika fluida berpindah akibat gradien suhu vertikal, seperti naiknya fluida bersuhu tinggi dalam kolom air (Abdel-rahman dkk., 2025).

1. Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi termal merupakan mekanisme transfer energi panas antar partikel material melalui interaksi molekuler, di mana energi kinetik berpindah dari daerah bersuhu tinggi ke rendah. Fenomena ini dominan terjadi pada benda padat, dengan karakteristik khas berupa difusi energi tanpa disertai perpindahan massa material penghantar itu sendiri (L. Hu

dkk., 2021). Persamaan dasar yang mendasari perpindahan panas secara konduksi adalah sebagai berikut:

$$Q_{kond} = -kA \frac{dT}{dX} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

Q_{kond} = Laju perpindahan panas konduksi (W)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

A = Luas penampang (m²)

dT = Perbedaan suhu (K)

dX = Perbedaan jarak (m)

2. Perpindahan Panas Konveksi

Mekanisme transfer kalor konvektif merupakan proses perambatan energi termal yang disertai perpindahan massa medium fluida. Fenomena ini secara dominan terjadi pada zat alir, baik dalam fase cair maupun gas, sebagai respons terhadap gradien termal. Berdasarkan faktor penggerak aliran, konveksi terbagi menjadi dua kategori: konveksi terinduksi eksternal, di mana pergerakan fluida dihasilkan oleh gaya mekanis eksternal seperti turbin atau sistem tekanan buatan, dan konveksi alamiah, yang muncul secara spontan akibat perbedaan densitas fluida tanpa stimulasi luar. Klasifikasi ini merefleksikan prinsip termodinamika tentang interaksi antara energi panas dan dinamika fluida dalam sistem tertutup maupun terbuka (Boujelbene dkk., 2025). Persamaan umum yang digunakan untuk menggambarkan perpindahan panas melalui konveksi adalah sebagai berikut:

$$Q_{konv} = h_c \cdot A \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

Q_{konv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h_c = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².K)

A = Luas Penampang (m²)

ΔT = Perubahan Suhu (K)

3. Perpindahan Panas Radiasi

Transfer energi termal secara radiatif terjadi melalui propagasi gelombang elektromagnetik yang bersifat omnidirectional tanpa ketergantungan pada medium fisik. Proses ini memungkinkan transmisi energi antar objek terpisah melalui ruang vakum, mengikuti prinsip emisi foton dari permukaan benda panas. Berbeda dengan konduksi dan konveksi, radiasi tidak melibatkan interaksi molekular atau perpindahan massa, menjadikannya satu-satunya mekanisme transfer panas yang efektif dalam kondisi ketiadaan materi (He dkk., 2025). Persamaan umum yang digunakan untuk menggambarkan perpindahan panas melalui radiasi adalah sebagai berikut:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4 \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

Q_{rad} = Laju perpindahan panas radiasi (W)

σ = Konstanta boltzman (5,669x10⁻⁸ W/m².K⁴)

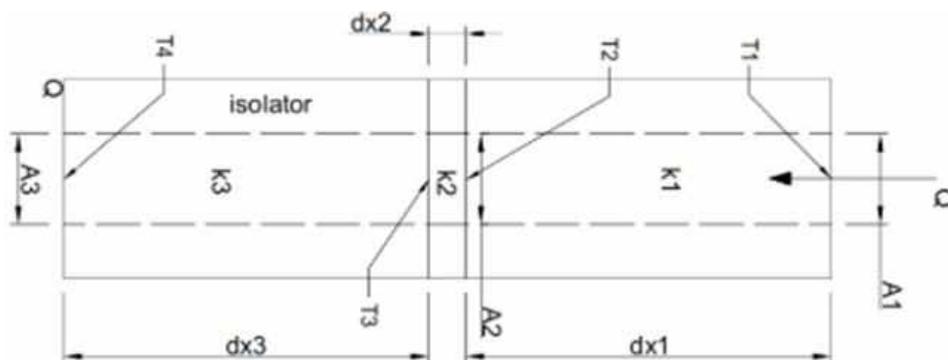
A = Luas permukaan benda (m²)

T = Suhu absolut benda (K)

ϵ = Emisivitas termal benda

4. Tahanan Termal Konduksi

Resistivitas termal merepresentasikan karakteristik intrinsik material dalam menahan laju transfer kalor, suatu parameter kritis dalam termodinamika terapan. Dalam konteks rekayasa termal, properti ini menjadi basis perancangan sistem insulasi melalui analisis gradien suhu per satuan fluks panas ($\Delta T/Q$), yang diekspresikan dalam satuan $^{\circ}C/W$. Secara kuantitatif, nilai R-termal yang tinggi mengindikasikan reduksi konduktivitas termal, sehingga material tersebut mampu meminimalkan disipasi energi kalor. Implementasi prinsip ini pada skala makro meliputi optimasi efisiensi energi bangunan melalui seleksi material konstruksi ber-R-value spesifik, manajemen termal perangkat elektronik, hingga desain sistem industri yang memenuhi standar konservasi energi (Setyawan dkk., 2022). Persamaan umum dari tahanan termal untuk tiga material yaitu kuningan atas, spesimen dan kuningan bawah adalah :



Gambar 2. 1 Susunan Spesimen Uji

$$R_1 + R_2 + R_3 = \left(\frac{dx_1}{A_1 \cdot k_1} \right) + \left(\frac{dx_2}{A_2 \cdot k_2} \right) + \left(\frac{dx_3}{A_3 \cdot k_3} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

k_1 = Konduktivitas termal kuningan atas (W/m.°C)

k_2 = Konduktivitas termal spesimen (W/m.°C)

k_3 = Konduktivitas termal kuningan bawah (W/m.°C)

R_1 = Tahanan termal kuningan atas (°C/W)

R_2 = Tahanan termal spesimen (°C/W)

R_3 = Tahanan termal kuningan bawah (°C/W)

dx_1 = Jarak perpindahan panas kuningan atas (m)

dx_2 = Jarak perpindahan panas spesimen (m)

dx_3 = Jarak perpindahan panas kuningan bawah (m)

A_1 = Luas permukaan kuningan atas (m²)

A_2 = Luas permukaan spesimen (m²)

A_3 = Luas permukaan kuningan bawah (m²)

dT_1 = Perbedaan suhu kuningan bawah (°C)

dT_2 = Perbedaan suhu spesimen (°C)

dT_3 = Perbedaan suhu kuningan bawah (°C)

Resistansi termal, sebagai parameter kemampuan material dalam mengurangi laju transfer kalor, ditentukan oleh karakteristik intrinsik seperti nilai konduktivitas termal, ketebalan, dan geometri permukaan. Di sisi lain, densitas material yang merepresentasikan rasio massa terhadap volume berperan krusial dalam menentukan kapasitas panas spesifik, suatu indikator kemampuan penyimpanan energi panas (Setyawan dkk., 2022).

2.2. Massa Jenis

Densitas (ρ), suatu besaran fisika fundamental, merepresentasikan rasio kuantitatif antara massa suatu material terhadap volume yang ditempatinya. Secara matematis, parameter material ini bersifat invers proporsional terhadap volume ketika massa konstan. Pada tingkat mikroskopis, derajat kompaksi partikel penyusun material berkorelasi positif dengan nilai densitas – semakin padat struktur atom/molekul, semakin tinggi kerapatan partikel per unit volume. Fenomena ini menjelaskan mengapa material fase padat seperti logam ferrous (besi, baja) memiliki densitas 5-8 kali lebih besar dibanding substansi fase gas. Simbol ρ yang digunakan secara universal dalam literatur fisika berasal dari alfabet Yunani kuno, merefleksikan akar historis konsep ini dalam perkembangan ilmu material sejak era Aristoteles. Dalam praktik rekayasa, pemahaman tentang densitas menjadi krusial untuk aplikasi seperti seleksi material struktural, analisis buoyansi fluida, hingga optimasi desain termomekanik.

Persamaan massa jenis adalah sebagai berikut :

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

ρ = massa jenis (kg/m³)

m = massa benda (kg)

V = Volume (m³)

2.3. Konduktivitas Thermal

Konduktivitas termal (k), suatu properti intensif dalam termodinamika material, secara kuantitatif merepresentasikan kapasitas substansi dalam mentransmisikan energi kalor melalui mekanisme konduktif. Besaran ini menunjukkan variasi signifikan antarjenis material, di mana logam umumnya mendominasi skala nilai tertinggi dibandingkan polimer atau keramik. Material dengan indeks konduktivitas termal ≥ 400 W/m·K, seperti intan atau grafit pirolitik, diklasifikasikan sebagai superkonduktor termal akibat mobilitas fonon yang tinggi. Sebaliknya, material ber- $k < 0.1$ W/m·K seperti aerogel berfungsi optimal sebagai insulator. Pemahaman parameter ini menjadi fundamental dalam rekayasa sistem termal, mulai dari desain heat sink hingga optimasi efisiensi energi bangunan (Hartquist dkk., 2024).

Tabel 2. 1 Konduktivitas Termal Berbagai Bahan Pada suhu 0°C

Bahan	W/m.K	Btu/h.ft.°F
Logam		
Perak (murni)	410	237
Tembaga (murni)	385	223
Aluminium (murni)	202	117
Nikel (murni)	93	54
Besi (murni)	73	42
Baja Karbon, 1% C	43	25
Baja Karbon-Nikel (18% Cr, 8% Ni)	16,3	9,4
Bukan Logam		
Magnesit	4,15	24
Marmar	2,08-2,94	1,2-1,7
Batu Pasir	1,83	1,06

Bahan	W/m.K	Btu/h.ft.°F
Kaca	0,78	0,45
Kayu Maple	0,17	0,096
Serbuk Gergaji	0,059	0,034
Wol Kaca	0,038	0,022
Zat Cair		
Raksa	8,21	4,74
Air	0,556	0,327
Amonia	0,54	0,312
Minya Pelumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042
Gas		
Hidrogen	0,175	0,101
Helium	0,141	0,081
Udara	0,024	0,0139
Uap Air (Jenuh)	0,0206	0,0119
Karbon Dioksida	0,0146	0,00844

Persamaan konduktivitas adalah sebagai berikut:

$$k = \frac{Q \cdot dx}{A \cdot dT}$$

Dimana:

k = Konduktivitas termal (W/m°C)

Q = Laju Kalor (W)

Dx = Perbedaan Jarak (m)

A = Luas Penampang (m²)

dT = Perbedaan Suhu (°C)

2.4. Alumina

Aluminium oksida (Al_2O_3), atau alumina, merupakan senyawa anorganik biner yang terbentuk melalui ikatan ionik antara atom aluminium dan oksigen. Sebagai fase oksida aluminium paling stabil secara termodinamika, senyawa ini memainkan peran pivotal dalam teknologi material modern karena kombinasi unik antara sifat fisika-kimia dan struktur kristalannya yang kompleks. Kisi kristal alumina terdiri dari susunan heksagonal rapat ion O^{2-} dengan ion Al^{3+} yang menempati $2/3$ celah oktahedral, membentuk struktur korundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) yang menjadi basis kekuatan mekaniknya (Hammi dkk., 2021).

Ditinjau dari sifat fisik, alumina menunjukkan karakteristik luar biasa dengan skala kekerasan Mohs 9, setara dengan safir dan hanya dilampaui oleh intan. Sifat ini dimanfaatkan secara ekstensif dalam aplikasi abrasif seperti pelapisan amplas industri dan mata bor pengeboran geotermal. Titik leleh elevasinya yang mencapai 2.072°C , disertai densitas $3,95 \text{ g/cm}^3$, menjadikannya material kandidat ideal untuk komponen refraktori pada tungku peleburan logam. Analisis termogravimetri oleh Adesina dkk. (2023) mengonfirmasi stabilitas termal alumina hingga 1.800°C tanpa degradasi struktural, dengan koefisien ekspansi termal rendah ($8,1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) yang meminimalkan stress termal (Adesina dkk., 2023).

Secara polimorfik, alumina memiliki tujuh fase kristal berbeda, di mana fase α (korundum) merupakan konfigurasi paling stabil secara termal. Konduktivitas termal fase α pada suhu kamar tercatat $30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, nilai yang

100 kali lipat lebih tinggi daripada polimer teknik umum. Parameter ini berasal dari mobilitas fonon optik yang tinggi dalam kisi kristal teratur, memungkinkan aplikasi sebagai substrat disipasi panas dalam modul daya elektronik. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa doping alumina dengan 0,1% ion Y^{3+} dapat meningkatkan konduktivitas termalnya hingga $35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ melalui reduksi hamburan fonon (Adesina dkk., 2023).

Ketahanan kimia alumina yang superior ditunjukkan melalui stabilitasnya dalam media asam kuat (HCl pekat) dan basa konsentrasi tinggi (NaOH 50%) pada suhu hingga 200°C . Sifat inert ini berasal dari lapisan pasivasi oksida yang terbentuk secara spontan pada permukaan, menghambat reaksi redoks lebih lanjut. Dalam aplikasi industri kimia, alumina digunakan sebagai katalis pendukung (support catalyst) untuk reaksi hidrogenasi bertekanan tinggi karena stabilitas strukturalnya (Adesina dkk., 2023).

Aplikasi alumina sangat luas di berbagai industri. Dalam industri refraktori, alumina digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan bata tahan api untuk tungku industri. Sifat refraktori alumina memungkinkannya untuk bertahan pada suhu yang sangat tinggi tanpa mengalami deformasi atau penurunan kinerja. Di industri keramik, alumina digunakan untuk memproduksi berbagai produk keramik teknik yang memerlukan kekerasan, kekuatan, dan ketahanan termal yang tinggi, seperti komponen mesin, alat pemotong, dan isolator listrik (Hammi dkk., 2021). Aplikasi multifaset alumina mencakup:

- a. Sektor Refraktori: Membentuk 68% komposisi bata tahan api kelas tinggi untuk tungku rotari industri semen, mampu bertahan pada temperatur 1.600°C secara kontinu.
- b. Teknologi Keramik Lanjut: Keramik alumina dengan kemurnian 99,5% digunakan dalam komponen prostesis ortopedi karena biokompatibilitas dan modulus Young tinggi (380 GPa).
- c. Elektrometalurgi: Sebagai elektrolit dalam proses Hall-Héroult untuk produksi aluminium primer, dengan konsumsi spesifik 1,92 kg Al₂O₃ per kg Al.
- d. Elektronika Daya: Substrat alumina dengan rugi dielektrik rendah ($\tan \delta = 0,0002$) menjadi basis untuk sirkuit hybrid high-frequency.

Penelitian Hammi dkk. (2021) mengungkap potensi alumina dalam teknologi energi terbarukan melalui pengembangan membran keramik untuk sel bahan bakar oksida padat (SOFC). Dengan modifikasi dopant ZrO₂, membran alumina mencapai konduktivitas ionik 0,1 S/cm pada 800°C, membuka jalan bagi aplikasi penyimpanan energi berskala besar (Hammi dkk., 2021).



Gambar 2. 2 Serbuk Alumina

Sumber : <https://www.blibli.com/p/high-purity-crystalline-nano-alumina-a-phase-white-alumina-powder/ps--TEP-70067-00947>

2.5. Tempurung Kemiri

Tempurung Tempurung kemiri merupakan bagian keras dari buah kemiri yang berfungsi melindungi bijinya. Meskipun sering dianggap sebagai limbah, mirip dengan tempurung kelapa, tempurung kemiri memiliki potensi yang signifikan untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi. Secara kimiawi, komposisi tempurung kemiri terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa, yang merupakan komponen utama dalam banyak bahan lignoselulosa lainnya. Kandungan lignin yang tinggi memberikan sifat kekakuan dan ketahanan terhadap proses dekomposisi, sedangkan selulosa dan hemiselulosa berkontribusi terhadap kekuatan mekanik dan fleksibilitas material tersebut (Sianturi dkk., 2021).

Sifat fisik dan mekanik tempurung kemiri menjadikannya sebagai kandidat yang menjanjikan untuk digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit. Salah satu sifat fisik yang penting adalah densitasnya, yang berkisar antara 1,2 hingga 1,5 g/cm³, menjadikannya cukup ringan namun tetap memiliki kekuatan yang memadai. Tempurung kemiri juga menunjukkan ketahanan yang baik terhadap tekanan dan kekuatan tarik, meskipun tidak sekuat serat alami lainnya, seperti serat kelapa. Karakteristik ini menjadikan tempurung kemiri sangat ideal untuk aplikasi yang memerlukan material dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi (Sianturi dkk., 2021).

Dari segi sifat termal, tempurung kemiri memiliki konduktivitas termal yang rendah, sehingga berfungsi sebagai isolator termal alami. Sifat ini sangat bermanfaat dalam aplikasi yang memerlukan material dengan kemampuan

untuk menghambat aliran panas. Selain itu, tempurung kemiri juga tahan terhadap suhu tinggi, menjadikannya cocok untuk digunakan dalam komposit yang beroperasi dalam kondisi termal yang ekstrem (Leslie Mendame dkk., 2021).

Salah satu keunggulan utama dari tempurung kemiri adalah keberlanjutannya sebagai sumber daya alam. Sebagai limbah pertanian yang dapat diperbarui, tempurung kemiri memiliki siklus hidup yang relatif pendek. Pemanfaatan tempurung kemiri dalam industri material komposit berkontribusi pada pengurangan ketergantungan terhadap material sintetis yang tidak ramah lingkungan, seperti serat sintetis dan plastik. Selain itu, penggunaan limbah tempurung kemiri dalam produk bernilai tinggi memberikan solusi yang ramah lingkungan untuk tantangan pengelolaan limbah pertanian (Leslie Mendame dkk., 2021).

Tempurung kemiri memiliki potensi yang besar sebagai bahan pengisi atau penguat dalam material komposit. Dalam komposit polimer, tempurung kemiri dapat berfungsi sebagai bahan pengisi yang meningkatkan kekuatan mekanik, kekerasan, dan ketahanan terhadap aus. Selain itu, dalam komposit semen, partikel tempurung kemiri dapat berfungsi sebagai agregat ringan yang meningkatkan ketahanan termal serta sifat isolasi akustik dari material yang dihasilkan (Sianturi dkk., 2021).

Di luar penggunaannya dalam komposit, tempurung kemiri juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi karbon aktif, yang merupakan material penting dalam aplikasi penyaringan air dan udara. Proses

karbonisasi tempurung kemiri pada suhu tinggi menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang besar dan struktur pori yang baik, sehingga efektif dalam menyerap zat-zat berbahaya dari lingkungan (Leslie Mendame dkk., 2021).



Gambar 2. 3 Tempurung Kemiri

Sumber : <https://www.istockphoto.com/id/foto/cangkang-kemiri-kosong-gm537450458-95317231>

2.6. Serat Kelapa

Serat mesokarp kelapa (*Cocos nucifera* L.), atau koira, merupakan material lignoselulosa alami yang diekstraksi dari lapisan mesodermik buah kelapa antara eksokarp dan endokarp. Sebagai komoditas agroindustri terbarukan, material ini menempati posisi strategis dalam ekonomi sirkular negara tropis penghasil kelapa, dengan potensi produksi global mencapai 650.000 ton/tahun (Rajesh et al., 2024). Secara mikrostruktural, serat ini tersusun atas berkas-berkas fibril selulosa (40-45%) yang terikat dalam matriks lignin (30-35%) dan hemiselulosa (15-20%), membentuk komposit alamiah dengan anisotropi mekanik unik. Komponen minor seperti senyawa kutikular

(3-5%) dan mineral anorganik (1-2%) berperan dalam modifikasi sifat permukaan dan durabilitas (Rajesh dkk., 2024).

Analisis termomekanik mengungkap kekuatan tarik serat berkisar 120-180 MPa dengan modulus Young 4-6 GPa, parameter yang setara dengan serat polimer semi-sintetis seperti PLA namun dengan densitas lebih rendah (1.2-1.5 g/cm³). Karakteristik ini menjadikannya kandidat ideal untuk penguatan komposit struktural ringan dalam rasio kekuatan-berat (specific strength) 80-100 MPa·cm³/g, melebihi kayu lunak konvensional. Mekanisme deformasi non-linear pada regangan >8% menunjukkan kemampuan absorpsi energi melalui realignment fibril selulosa, properti kritis untuk aplikasi dampak-resistan (Rajesh dkk., 2024).

Dari perspektif termodinamika, konduktivitas termal rendah (0.04-0.06 W/m·K) yang berasal dari struktur seluler mikropori, memposisikan koira sebagai insulator termal alami dengan nilai R (thermal resistance) 3.5-4.0 m²·K/W untuk ketebalan 10 cm. Performa ini melampaui wol kaca komersial (R=2.5-3.0) sekaligus menawarkan keunggulan biodegradabilitas. Studi siklus termal menunjukkan stabilitas dimensi pada rentang -40°C hingga 120°C, memenuhi persyaratan material bangunan hijau (Rizwana dkk., 2023).

Ketahanan biologisnya yang superior, ditunjukkan melalui indeks ketahanan jamur (FRI) >85% dan laju degradasi mikroba <0.5%/tahun, berasal dari kandungan lignin tinggi yang menghambat aktivitas enzim hidrolitik. Uji aging memperlihatkan retensi kekuatan tarik 75% setelah 18 bulan paparan UV dan kelembaban 95%, mengungguli serat alam lain seperti kenaf atau sisa.

Kemampuan hidrofilik terbatas (sudut kontak air 110-120°) menjadikannya stabil dalam aplikasi geotekstil basah (Rizwana dkk., 2023).

Ketahanan biologisnya yang superior, ditunjukkan melalui indeks ketahanan jamur (FRI) >85% dan laju degradasi mikroba <0.5%/tahun, berasal dari kandungan lignin tinggi yang menghambat aktivitas enzim hidrolitik. Uji aging memperlihatkan retensi kekuatan tarik 75% setelah 18 bulan paparan UV dan kelembaban 95%, mengungguli serat alam lain seperti kenaf atau sisal (Rizwana et al., 2023). Kemampuan hidrofilik terbatas (sudut kontak air 110-120°) menjadikannya stabil dalam aplikasi geotekstil basah (Rizwana dkk., 2023).



Gambar 2. 4 Serat Kelapa

Sumber : <https://serdangmasindo.web.indotrading.com/product/sabut-kelapacoconut-fiber-kemasan-pack-p955704.aspx>

2.7. Material Komposit

Material komposit didefinisikan sebagai sistem heterogen hasil integrasi dua atau lebih fase penyusun pada skala mikro/nano, yang dirancang untuk mencapai sinergi properti fisiko-mekanik superior melalui efek kombinasi konstituennya. Secara fundamental, struktur ini terdiri dari fase kontinu (matriks) dan fase terdispersi (penguat), di mana interaksi antarmuka

menentukan performa akhir material. Meskipun rekayasa modern kerap mengaitkan komposit dengan inovasi teknologi, sistem material hierarkis ini telah berevolusi secara alami selama jutaan tahun, sebagaimana terlihat pada biosistem lignoselulosa dan biokeramik (Aliqab dkk., 2025).

Kayu alam merepresentasikan prototipe komposit biologis canggih dengan arsitektur fibril selulosa (polimer kristalin modulus tinggi 138 GPa) yang tertanam dalam matriks lignin-hemiselulosa amorf. Sistem alamiah ini menunjukkan rasio kekuatan-berat $85 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$, melebihi banyak polimer teknik sintetis. Namun, keterbatasan dimensi transversal akibat morfologi pertumbuhan pohon dan anisotropi mekanis (perbandingan kuat tarik aksial:radial = 10:1) mendorong pengembangan komposit laminat rekayasa seperti kayu lapis. Material ini mengatasi anisotropi melalui susunan orthogonal veneer yang diikat resin fenolik, mencapai kuat lentur isotropik 60-80 MPa (Aliqab dkk., 2025).

Biosistem lain seperti tulang mamalia mengadopsi strategi komposit hibrida dengan menggabungkan nanopartikel hidroksiapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) dalam matriks kolagen fibrilar, menghasilkan material dengan modulus 18 GPa dan ketangguhan fraktur $3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Cangkang moluska menggunakan mekanisme serupa melalui laminasi aragonit nanokristalin dan matriks protein konkit. Perkembangan revolusioner dalam sains material 50 tahun terakhir memungkinkan sintesis komposit canggih seperti CFRP (komposit polimer diperkuat serat karbon) dengan modulus spesifik $245 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$, mengubah paradigma desain di industri aerospace dan biomedis (Daghrery dkk., 2025).

2.8. Resin

Resin, suatu material polimerik, dapat diklasifikasikan berdasarkan asal pembentukannya menjadi senyawa organik alami hasil eksudasi tumbuhan maupun produk sintesis kimiawi. Secara termodinamika, material ini menunjukkan karakteristik fase amorf dengan variasi sifat fisik meliputi transparansi optik (indeks bias 1.5-1.6), kekerasan Shore D 70-90, dan titik leleh 80-250°C tergantung komposisi kimianya. Perilaku termal resin ditandai dengan emisi volatil organik (VOC) dan pembentukan residu karbon saat pirolisis pada suhu >300°C, sebagaimana diobservasi melalui analisis termogravimetri (Sukanto dkk., 2021).

Secara historis, resin alam terutama diproduksi dari eksudat kulit pohon *Pinus* spp. dan *Dipterocarpaceae*, dengan produksi global mencapai 1,2 juta ton/tahun pada awal abad ke-20. Namun, tekanan ekstraksi berlebihan menyebabkan penurunan stok pohon penghasil resin alam hingga 40% dalam 50 tahun terakhir, memicu transisi ke resin sintetis berbasis monomer petrokimia seperti stirena dan epiklorohidrin. Menurut studi Frenly (2021), substitusi resin sintetis telah mengurangi ketergantungan pada sumber alam sebesar 78% sejak 1990 melalui optimasi proses katalisis Ziegler-Natta (Frenly Simanullang, 2021).

Epoksi, sebagai resin sintetis dominan, terdiri dari prepolimer bisphenol-A diglisidil eter (DGEBA) yang dikeraskan dengan amina aromatik. Material ini menunjukkan performa unggul dengan kuat tarik 85-120 MPa dan modulus elastisitas 3,2-3,8 GPa ketika diperkuat mikrofiber karbon (volume fraksi

60%). Transparansi optiknya (haze <2%) menjadikannya ideal untuk aplikasi optoelektronik, meskipun rentan terhadap degradasi UV yang menyebabkan peningkatan nilai Yellowness Index ($\Delta YI > 15$) setelah 500 jam paparan xenon arc. Solusi terkini melibatkan modifikasi permukaan dengan nano-TiO₂ untuk meningkatkan stabilitas warna hingga 300% (Frenly Simanullang, 2021).



Gambar 2. 5 Resin Epoxy

Sumber : <https://www.flipkart.com/resiwell-epoxy-resin-art-medium/p/itm2582a2a79e4d3?pid=APMGZGEEVZYJH9Z>

2.9. Isolator Termal

Material yang berfungsi sebagai insulator panas umumnya memiliki tingkat konduktivitas termal yang sangat rendah. Hal ini dicapai melalui desain struktur internal berupa pori-pori atau rongga-rongga kecil yang terisi oleh udara maupun gas lain. Struktur semacam ini menyebabkan kemampuan penghantaran panas menjadi sangat terbatas sehingga mampu menjaga perbedaan temperatur antara dua area berbeda secara efektif. Isolasi panas dirancang khusus untuk memperlambat laju transfer energi panas dari satu sistem ke sistem lainnya—baik untuk mempertahankan suhu di dalam ruangan maupun mencegah masuknya panas dari lingkungan luar (Himawari dkk., 2024).

Secara prinsipial, kinerja insulator termal didasarkan pada kemampuannya menekan tiga jalur utama perpindahan kalor: konduksi, konveksi, serta radiasi. Proses konduksi—yang terjadi akibat kontak langsung antar molekul padatan—dapat diminimalisasi dengan mengurangi titik-titik sentuh antar partikel penyusun bahan tersebut. Sementara itu, mekanisme perpindahan kalor melalui fluida atau dikenal sebagai konveksi dapat ditekan dengan memanfaatkan sifat porositas bahan sehingga aliran udara atau gas menjadi terbatas di dalamnya. Untuk radiasi kalor sendiri—yang berlangsung lewat gelombang elektromagnetik seperti inframerah—penggunaan permukaan reflektif atau lapisan khusus mampu menurunkan jumlah energi radiasi yang diteruskan (Himawari dkk., 2024).

Penggunaan insulator panas telah meluas ke berbagai sektor industri seperti konstruksi bangunan, proses manufaktur pabrikasi komponen sensitif terhadap suhu tinggi, hingga aplikasi pada kendaraan bermotor dan pesawat terbang guna meningkatkan kenyamanan serta perlindungan terhadap fluktuasi temperatur ekstrem bagi penumpangnya. Dalam dunia konstruksi misalnya, bahan-bahan ini diaplikasikan pada elemen struktural seperti atap dan lantai demi efisiensi energi bangunan (Himawari dkk., 2024).

Pemilihan jenis insulator harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik berdasarkan kondisi operasi termasuk rentang suhu kerja serta tuntutan karakteristik mekanis lingkungan aplikasinya. Beberapa contoh material populer antara lain mineral wool (wol mineral), polystyrene foam (polistirena), hingga aerogel; dimana aerogel menawarkan performa unggul berupa nilai

hambatan thermal sangat tinggi meskipun harganya relatif mahal dibanding alternatif lain sehingga lebih cocok digunakan untuk kebutuhan isolasi ekstrem saja. Setiap jenis bahan memiliki keunggulan tersendiri sesuai konteks penggunaannya sehingga seleksi material secara cermat mutlak diperlukan agar hasil akhir optimal (Himawari dkk., 2024).

2.10. Hubungan Porositas Dengan Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal merupakan salah satu karakteristik utama suatu bahan yang menentukan kemampuannya dalam mentransfer energi panas. Salah satu faktor signifikan yang memengaruhi besarnya nilai konduktivitas ini adalah tingkat porositas pada material tersebut, yaitu perbandingan antara volume rongga atau celah-celah kecil dengan keseluruhan volume benda padat. Secara umum, semakin besar tingkat keberadaan rongga-rongga tersebut—atau semakin tinggi derajat porositas—maka kecenderungan kemampuan penghantaran kalor oleh material akan menurun. Hal ini terjadi karena udara atau gas lain yang mengisi ruang kosong di antara struktur padatan memiliki daya hantar panas jauh lebih rendah daripada zat padat seperti logam maupun keramik (Sabilillah dkk., 2023).

Meskipun demikian, interaksi antara tingkat porositas dan nilai konduktivitas tidak selalu bersifat sederhana atau proporsional secara langsung. Terdapat sejumlah variabel tambahan seperti dimensi serta pola penyebaran rongga-rongga itu sendiri maupun karakteristik fisik dari matriks penyusunnya yang turut memengaruhi hasil akhir. Sebagai contoh, jika sebuah bahan memiliki rongga besar yang saling terkoneksi maka potensi perpindahan

kalor melalui mekanisme aliran udara meningkat; sebaliknya apabila celah-celah tersebut kecil serta terpisah-pisah maka hambatan terhadap aliran energi menjadi lebih efektif sehingga penurunan laju transfer kalor pun optimal (Sabilillah dkk., 2023).

Dalam praktik rekayasa pembuatan insulator thermal modern seringkali dilakukan upaya untuk memperbesar jumlah serta distribusi ruang kosong guna memperlambat pergerakan energi panas melintasi medium tersebut. Udara sebagai pengisi utama pada struktur berpori hanya mempunyai nilai daya hantar sekitar 0,026 W/mK sehingga kehadirannya sangat membantu menekan efisiensi transmisi kalor dibandingkan dengan kebanyakan zat padat lainnya. Namun demikian perlu dicatat bahwa walaupun suatu bahan telah didesain sedemikian rupa agar kaya akan rongga namun apabila sifat dasar penghantaran kalornya memang sudah tinggi maka secara keseluruhan performa isolasinya masih dapat terbatas akibat dominansi karakteristik intrinsik dari matriks utamanya (Sabilillah dkk., 2023).

2.11. Data Logger

Sistem akuisisi data otomatis (datalogger) merupakan perangkat elektronik multikanal yang dirancang untuk merekam parameter lingkungan secara kontinu melalui integrasi sensor dan memori non-volatil. Dalam industri farmasi dan pangan yang teregulasi ketat, implementasi sistem ini menjadi kritical untuk menjamin kepatuhan CPOB dan HACCP melalui pemantauan suhu (akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban relatif ($\pm 2\%$ RH) selama rantai pasok,

sebagaimana diamanatkan dalam pedoman FDA 21 CFR Part 11 (Efendi dkk., 2023).

Keunggulan operasional datalogger termanifestasi dalam kapasitas otonomi jangka panjang (>1 tahun) dengan konsumsi daya ultrarendah (<1 mAh), didukung oleh algoritma sleep mode adaptif. Periode sampling dapat dikonfigurasi secara dinamis mulai dari 1 Hz hingga interval 24 jam melalui antarmuka SPI/I2C, memenuhi kebutuhan resolusi temporal beragam aplikasi. Integrasi protokol IoT LoRaWAN dan NB-IoT memungkinkan transmisi data real-time ke platform cloud dengan latency <100 ms, menghilangkan kebutuhan intervensi fisik untuk data retrieval (Efendi dkk., 2023).

Modularitas sistem tercermin dari kompatibilitas dengan array sensor kelas industri, termasuk termokopel Tipe K (rentang -200°C hingga +1350°C), higrometer kapasitif (0-100% RH), serta sensor gas NDIR CO₂. Evolusi desain terkini menghasilkan form factor miniatur (ukuran 30x30x15 mm) dengan proteksi IP68, optimal untuk pemasangan in-situ di lingkungan ekstrem. Studi kasus pada cold chain vaksin COVID-19 menunjukkan reduksi 99% data loss melalui implementasi datalogger berbasis SD card dengan redundansi triple backup (Efendi dkk., 2023).

Dalam konteks environmental sensing, sistem ini merevolusi pemantauan jangka panjang parameter seperti indeks kualitas udara (PM2.5, NO_x), asidifikasi perairan (pH, ORP), dan microclimate melalui jaringan sensor nirkabel mesh. Kemampuan time-series analysis embedded memungkinkan deteksi dini anomali menggunakan algoritma machine learning

edge computing, mentransformasi data mentah menjadi actionable insight untuk mitigasi risiko ekologis (Efendi dkk., 2023).