

STUDI SIFAT TERMAL PADA BAHAN PARAFIN-GRAFIT SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN PANAS

*Christograta Immanuel Simbolon¹, Agus Suprihanto², Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: kristogrataimmanuel@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi sifat termal komposit parafin–*expanded graphite* (EG) sebagai material penyimpanan energi panas berbasis *phase change material* (PCM). Tujuan utama adalah menentukan pengaruh fraksi massa EG terhadap konduktivitas termal dan kestabilan siklus fasa komposit. Komposit dibuat dengan metode *melting and mixing* setelah EG direduksi ukurannya menjadi $\leq 2 \mu\text{m}$ untuk mengurangi sedimentasi; variasi fraksi massa yang diuji adalah 20%, 30%, dan 50% (massa). Spesimen berbentuk silinder ($\varnothing 20 \text{ mm}$) dipersiapkan dan diuji pada alat GUNT WL 420; pengukuran konduktivitas termal dianalisis menggunakan pendekatan transien lewat ekstraksi konstanta waktu sistem dari respons temperatur T_1 – T_2 . Karakterisasi mikro-struktur dilakukan dengan SEM untuk mengevaluasi morfologi dan distribusi partikel. Pengujian stabilitas siklus fasa dilakukan dengan 10 siklus pemanasan–pendinginan pada rentang suhu operasi yang ditentukan. Hasil menunjukkan bahwa EG memiliki morfologi *flake* berpori yang mendukung pembentukan jaringan perkolasi termal dalam matriks parafin. Peningkatan fraksi massa EG secara signifikan memodifikasi respons transien suhu dan meningkatkan kemampuan pengantaran panas komposit dibanding parafin murni, walaupun terjadi pengurangan kapasitas laten sebanding dengan fraksi EG. Komposit parafin–EG menunjukkan potensi aplikasi pada sistem *thermal energy storage* (TES) yang membutuhkan laju transfer panas lebih cepat.

Kata kunci: eg; konduktivitas termal; parafin; pcm; tes

Abstract

This study investigates the thermal properties of paraffin–expanded graphite (EG) composites as phase change material (PCM) based thermal energy storage (TES) media. The primary objective is to quantify how EG mass fraction affects effective thermal conductivity and phase-change cycle stability. Composites were produced by a melting-and-mixing method after reducing EG particle size to $\leq 2 \mu\text{m}$ to minimize sedimentation; tested mass fractions were 20%, 30%, and 50%. Cylindrical specimens ($\varnothing 20 \text{ mm}$) were evaluated using a GUNT WL 420 apparatus. Thermal conductivity was inferred from transient analysis by extracting the system time constant from top–bottom temperature responses (T_1 – T_2). Microstructural characterization via SEM assessed particle morphology and dispersion. Cycle-stability was examined over ten repeated melting–solidification cycles within the operating temperature range. SEM images reveal porous, flake-like EG structures conducive to forming thermal percolation networks in the paraffin matrix. Increasing EG fraction notably alters the transient thermal response and enhances heat transport compared to pure paraffin, at the expense of proportionally reduced latent storage capacity. The paraffin–EG composite demonstrates promise for TES applications that require faster charge/discharge rates.

Keywords: eg; paraffin; pcm; tes; thermal conductivity

1. Pendahuluan

Ketersediaan energi menjadi salah satu isu penting di era modern. Pertumbuhan penduduk yang pesat, perkembangan teknologi, serta meningkatnya aktivitas industri telah menyebabkan konsumsi energi global terus meningkat dari tahun ke tahun. Di sisi lain, sebagian besar kebutuhan energi dunia masih dipenuhi dari sumber energi fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara [1]. Ketergantungan pada sumber energi tersebut menimbulkan dua persoalan utama, yaitu semakin menipisnya cadangan energi fosil serta meningkatnya dampak lingkungan yang ditimbulkan, seperti emisi karbon dioksida (CO_2) yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengembangkan energi baru dan terbarukan (EBT) yang bersih, berkelanjutan, serta mampu mengurangi dampak lingkungan [2].

Salah satu pendekatan yang dapat meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan adalah melalui teknologi penyimpanan energi panas/*thermal energy storage* (TES). Teknologi ini berperan penting dalam menyimpan energi yang dihasilkan dari sumber terbarukan, misalnya energi surya, untuk kemudian dilepaskan kembali sesuai kebutuhan. Dengan demikian, sistem penyimpanan energi panas dapat mengatasi permasalahan ketidaksihinggaan antara ketersediaan energi terbarukan dengan pola konsumsi energi [3].

Secara umum, teknologi penyimpanan energi panas terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *sensible heat storage*, *latent heat storage*, dan *chemical heat storage*. Dari ketiganya, metode *latent heat storage* menarik perhatian banyak peneliti karena mampu menyimpan energi dalam jumlah besar pada volume yang relatif kecil. Sistem ini memanfaatkan material yang disebut *phase change material* (PCM), yaitu material yang menyerap dan melepaskan energi dalam bentuk kalor laten selama proses perubahan fase (umumnya dari padat ke cair dan sebaliknya). PCM memiliki keuntungan berupa kapasitas penyimpanan energi yang tinggi, temperatur operasi yang relatif konstan saat perubahan fase, serta stabilitas siklus yang baik [4].

Salah satu PCM yang banyak digunakan adalah parafin. Parafin dipilih karena memiliki titik leleh dalam rentang yang sesuai untuk berbagai aplikasi, kestabilan kimia yang baik, tidak beracun, serta mudah diperoleh. Namun, parafin memiliki kelemahan utama berupa konduktivitas termal yang rendah sekitar 0,2 W/m·K. Kondisi ini menyebabkan proses pengisian dan pelepasan energi panas menjadi lambat, sehingga membatasi performa penyimpanan energi. Oleh karena itu, berbagai penelitian dilakukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut, salah satunya dengan menambahkan material yang memiliki nilai konduktivitas tinggi sebagai aditif [5].

Grafit merupakan material karbon dengan struktur kristal heksagonal yang memiliki konduktivitas termal tinggi (dapat mencapai ratusan W/m·K) dan stabilitas kimia yang baik [6]. Penambahan grafit pada parafin dapat meningkatkan kemampuan pengantaran panas PCM tanpa mengurangi kapasitas kalor laten secara signifikan. Kombinasi keduanya menghasilkan material komposit parafin-grafit yang berpotensi digunakan sebagai material penyimpan panas yang efisien [7]. Selain itu, grafit memiliki kelebihan berupa ketersediaan yang melimpah serta harga yang relatif terjangkau dibandingkan material aditif lain seperti *nano tube carbon* atau logam mulia [8].

Pengaruh pencampuran parafin dengan *expanded graphite* sudah pernah diteliti sebelumnya dengan variabel rasio massa parafin terhadap *expanded graphite* 100:0, 95:5, 90:10, dan 85:15. Pada penelitian tersebut, konduktivitas termal grafit murni yang digunakan oleh tim peneliti adalah 0,361 W/m·K. Pencampuran parafin dengan grafit pada studi ini dilakukan dengan metode impregnasi. Hasil pengujian dengan penambahan 5%, 10%, dan 15% massa grafit terhadap massa parafin masing-masing adalah 1,571 W/m·K, 2,127 W/m·K, serta 2,337 W/m·K [9]. Berdasarkan hasil penemuan tersebut, penulis ingin mendalami studi tersebut untuk mengetahui apakah nilai konduktivitas termal tersebut dapat ditingkatkan lebih lanjut dengan menggunakan metode pelelehan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1. Persiapan Bahan Dasar

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah parafin murni dan *expanded graphite* (EG). Untuk tiap variasi komposisi dibuat minimal 3 (tiga) spesimen sebagai unit uji. Dimensi spesimen dipersiapkan berupa silinder dengan ukuran diameter 20 mm dan tinggi 50 mm. Semua bahan disimpan pada kondisi kering dan ditangani dengan sarung tangan serta masker untuk mencegah kontaminasi dan paparan debu karbon halus. Bahan EG yang digunakan pada penelitian ini adalah *Graphite Packing Style 5000* dari Swift Supplies dengan bentuk roll kepangan yang serat dasarnya terdiri dari 100% EG. Untuk keperluan penelitian yang menggunakan metode *melting and mixing*, bahan EG perlu terlebih dahulu diberikan perlakuan *size reduction* dengan target ukuran partikel mencapai $\leq 2 \mu\text{m}$. Hal ini perlu dilakukan untuk mencegah bahan EG mengendap pada saat bahan parafin berada pada fasa cairnya. Hal ini berdasarkan pada hukum Stokes ($Re \ll 1$) untuk kecepatan endap terminal partikel bola berjari-jari r dengan rumus sebagai berikut:

$$v = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gr^2}{9\mu} \quad (1)$$

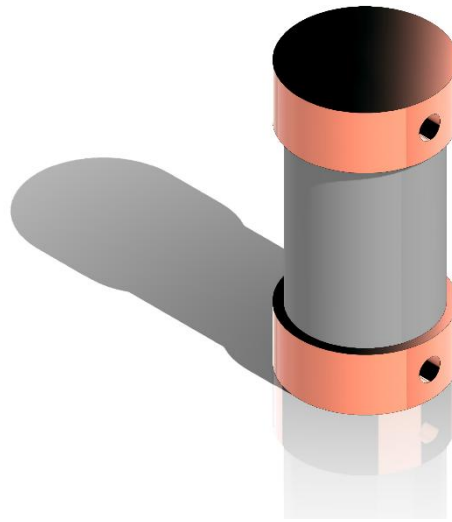
Di mana v adalah kecepatan endapan, ρ_p adalah massa jenis partikel, ρ_f adalah massa jenis partikel, g adalah percepatan gravitasi bumi, r adalah jari-jari partikel, dan μ adalah viskositas dinamis fluida. Untuk menetapkan batas ukuran partikel yang aman dengan laju endap partikel maksimal tertentu (v_{max}), maka batas ukuran diperoleh dengan persamaan berikut:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{9\mu v_{max}}{2\Delta\rho g}}; \Delta\rho = \rho_p - \rho_f, \quad d_{max} = 2r_{max} \quad (2)$$

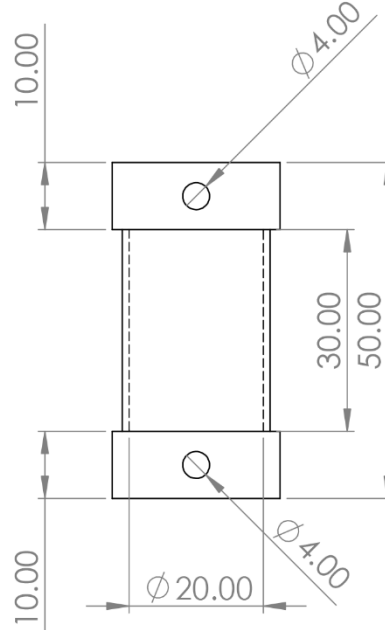
2.2. Desain Spesimen

Spesimen berbentuk silinder berbahan PVC dengan diameter 20 mm dan tinggi 30 mm. Campuran parafin-EG dimasukkan ke dalamnya kemudian pada kedua sisi silinder ditutup dengan menggunakan silinder tembaga yang nilai konduktivitas termalnya diketahui dengan diameter 20 mm dan tinggi masing-masing silinder tembaga berukuran 10 mm, sehingga tinggi dimensi spesimen keseluruhan berukuran 50 mm. Ukuran dimensi total ini disesuaikan dengan spesimen

uji yang merupakan bagian dari set alat GUNT WL 420 yang digunakan pada kegiatan praktikum fenomena dasar mesin. Desain spesimen ditunjukkan pada gambar 1 sedangkan detail dimensi spesimen ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 1. Desain Spesimen Uji



Gambar 2. Dimensi Spesimen Uji

2.3. Prosedur Pembuatan Spesimen

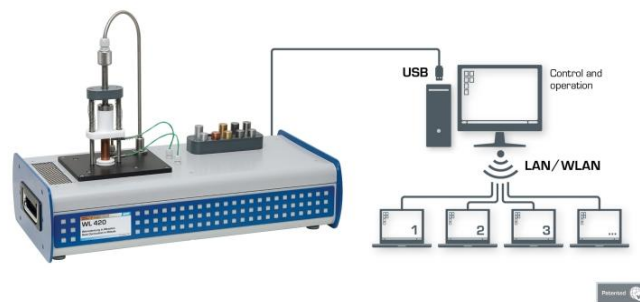
Metode pembuatan komposit parafin-EG dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *melting & mixing* karena metode tersebut sederhana, mudah dioperasikan pada skala laboratorium, dan efektif untuk memperoleh dispersi partikel EG yang homogen di dalam matriks parafin tanpa perlu peralatan vakum khusus. Proses dilaksanakan dengan melelehkan parafin di dalam isolator berbahan keramik berbentuk silinder yang berfungsi sebagai wadah termal yang inert dan memberikan isolasi panas yang baik. Kemudian, partikel EG hasil size reduction ditambahkan secara bertahap sambil diaduk sampai tercapai homogenitas yang diinginkan. Variasi fraksi massa EG yang diuji adalah 20%, 30%, serta 50% terhadap massa total komposit. Berikut langkah tahapan pembuatan komposit parafin-EG:

1. Siapkan kapsul isolator, dalam penelitian ini digunakan pipa PVC dan kompor elektrik untuk melelehkan parafin
2. Tutup bagian bawah kapsul PVC dengan menggunakan silinder yang tembaga yang telah dipotong hingga tinggi silinder tembaga hanya sebesar 10 mm. Gunakan *thermal paste* untuk merekatkan kapsul PVC dengan silinder tembaga.
3. Persiapkan timbangan digital. Letakkan kapsul PVC yang bagian bawahnya sudah ditutup tadi di atas timbangan.

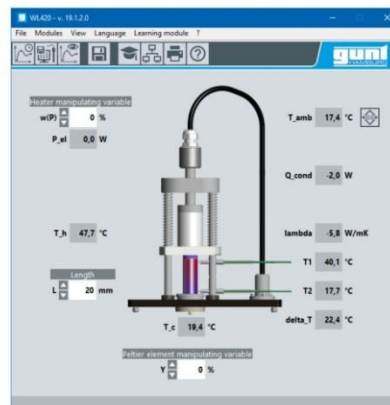
4. Tuang bubuk grafit ke dalam kapsul hingga fraksi massa yang telah ditentukan telah tercapai.
5. Panaskan parafin hingga mencapai titik lelehnya di dalam wadah yang telah diletakkan di atas kompor elektrik.
6. Setelah parafin telah sepenuhnya meleleh, tuangkan ke dalam kapsul PVC yang telah diisi dengan bubuk grafit. Perhatikan bacaan timbangan agar massa parafin yang dituangkan sesuai dengan fraksi massa yang telah ditetapkan sebelumnya. Kemudian, biarkan parafin membeku kembali.
7. Setelah parafin membeku, tutup sisi atas kapsul PVC dengan silinder tembaga yang tingginya sama dengan tembaga penutup sisi bawah.
8. Setelah kapsul selesai ditutup, simpan spesimen di tempat yang aman.

2.4. Pengujian Konduktivitas Termal

Pengukuran konduktivitas termal pada penelitian ini hanya dilakukan menggunakan alat GUNT WL 420 – *Heat conduction in metals*. WL 420 bekerja dengan pemanasan pada bagian atas spesimen (*electric heater*) dan pendinginan bagian bawah melalui elemen Peltier, sehingga aliran kalor berlangsung dari atas ke bawah dan konduktivitas termal λ dapat dihitung dari profil suhu *steady-state* dan daya *input*. Spesifikasi operasional penting yang relevan: pemanas terintegrasi hingga ≈ 30 W dan kapasitas pendinginan Peltier $\approx 56,6$ W; batas temperatur operasi unit hingga 150 °C.



Gambar 3. Modul GUNT WL 420 – Heat conduction in metals (Sumber: GUNT Hamburg)



Gambar 4. Tampilan perangkat lunak GUNT pada komputer (Sumber: GUNT Hamburg)

WL 420 dirancang untuk menerima spesimen berbentuk silinder dengan diameter nominal $\varnothing 20$ mm; panjang antara titik ukur tersedia dalam konfigurasi 20 mm dan 40 mm. Oleh karena itu, untuk memastikan kompatibilitas dan akurasi pengukuran, sampel komposit parafin–EG akan dicetak/dituang menjadi silinder dengan diameter 20 mm dan dua pilihan panjang: 20 mm dan 40 mm (jika memungkinkan, gunakan kedua panjang untuk melihat pengaruh panjang terhadap resistansi termal). Setiap komposisi diuji minimal 3 replikasi untuk keandalan statistik. Berikut langkah tahapan pengujian konduktivitas termal dengan menggunakan modul GUNT WL 420:

1. Pastikan WL 420 dan PC terhubung dan perangkat lunak GUNT siap. Hidupkan unit dan biarkan kondisi stabil.
2. Siapkan spesimen yang sudah selesai dibuat sebelumnya. Minimal 3 replikasi per komposisi. Catat massa & komposisi masing-masing.
3. Buka *holder* WL 420; pasang spesimen silinder pada posisi pusat dengan *spring-loaded holder* sehingga kontak atas & bawah rapat. Pastikan *thermocouple* internal berposisi sesuai titik ukur.
4. Gunakan konfigurasi panjang L 40 mm di *software*. Naikkan daya *heater* hingga P_{el} menunjukkan ± 5.0 W.
5. Pantau T_1 dan T_2 . Bila perlu, hidupkan daya elemen Peltier di kisaran 8-12% untuk menjaga suhu T_2 tetap stabil.

6. Setelah T_1 mencapai suhu 65°C , matikan pemanas. Biarkan suhu T_1 turun hingga mencapai suhu 45°C .
7. Ekspor data yang direkam oleh *software* ke dalam bentuk *text file* untuk nanti digunakan dalam pengolahan data.
8. Ulangi prosedur untuk pengujian setiap spesimen yang lainnya.

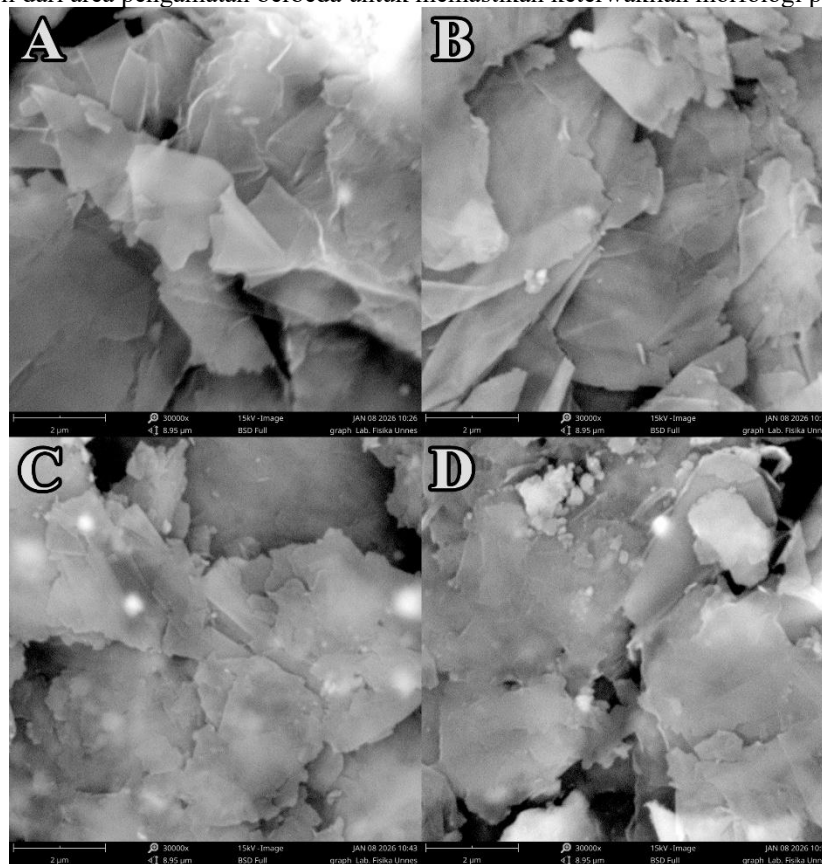
2.5. Pengujian Stabilitas Termal Fasa

Untuk menilai perubahan sifat setelah siklus termal, dilakukan pengujian berulang-ulang antara 45°C dan 68°C (1 siklus = Pemanasan ke 68°C kemudian pendinginan ke 25°C). Jumlah pengujian siklus dilakukan sebanyak 10 siklus. Setelahnya akan dilakukan pengujian konduktivitas termal ulang untuk menilai degradasi kapasitansi penyimpanan panasnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Mikro-struktur EG melalui Pengamatan SEM

Karakterisasi morfologi EG dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) pada pembesaran $30.000\times$ dengan tegangan akselerasi 15 kV. Hasil pengamatan disajikan dalam bentuk kolase empat citra pada Gambar 4.1(a–d) yang diambil dari area pengamatan berbeda untuk memastikan keterwakilan morfologi partikel.



Gambar 5. Citra SEM EG pada pembesaran $30.000\times$: (a) morfologi *flake* berlapis dengan orientasi acak; (b) struktur berpori dan celah antar lapisan; (c) distribusi ukuran partikel pada skala $\pm 2 \mu\text{m}$; (d) kecenderungan tumpang tindih dan pembentukan agregat tipis

Sebagaimana terlihat pada Gambar 5 (a), partikel EG memiliki geometri *flake* berlapis dengan orientasi acak dan struktur menyerupai lembaran tipis yang saling bertumpuk. Permukaan partikel tampak tidak rata dan berkerut, mengindikasikan terjadinya proses eksfoliasi selama ekspansi grafit. Morfologi ini khas untuk grafit ter-ekspansi yang memiliki rasio aspek tinggi dan luas permukaan spesifik besar.

Pada Gambar 5 (b) terlihat adanya celah antar lapisan dan struktur mikro-pori yang terbentuk akibat ekspansi termal. Keberadaan celah ini berimplikasi ganda terhadap sifat termal komposit. Di satu sisi, struktur berpori meningkatkan luas kontak potensial dengan matriks parafin. Di sisi lain, celah antar lapisan dapat menimbulkan resistansi kontak apabila distribusi partikel tidak homogen atau terjadi aglomerasi.

Distribusi ukuran partikel yang ditunjukkan pada Gambar 5 (c) memperlihatkan bahwa dimensi dominan berada pada rentang sub-mikrometer hingga sekitar $2 \mu\text{m}$, sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan dalam metodologi penelitian. Ukuran partikel dalam rentang ini secara teoritis mendukung pembentukan jaringan konduktif yang lebih merata dibandingkan partikel berukuran lebih besar, karena probabilitas interaksi antar partikel meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah partikel per satuan volume.

Pada Gambar 5 (d) tampak kecenderungan partikel untuk saling tumpang tindih membentuk struktur agregat tipis. Meskipun fenomena aglomerasi lokal terlihat, bentuk *flake* tetap mendominasi morfologi keseluruhan. Secara keseluruhan, morfologi *flake* berlapis dengan rasio aspek tinggi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 memiliki implikasi langsung terhadap mekanisme perpindahan panas dalam komposit parafin-EG.

Menurut Zhang dkk. [10], geometri partikel grafit berlapis meningkatkan peluang terbentuknya jaringan perkolasi termal pada fraksi massa tertentu, sehingga konduktivitas komposit dapat meningkat secara signifikan setelah ambang perkolasi terlampaui. Dengan demikian, hasil SEM yang diperoleh tidak hanya berfungsi sebagai verifikasi ukuran partikel, tetapi juga sebagai dasar mikro-struktural untuk memahami perilaku konduktivitas termal komposit yang akan dianalisis pada bagian berikutnya. Berdasarkan karakterisasi ini, dapat diasumsikan bahwa pada variasi massa tertentu, partikel EG berpotensi membentuk jalur konduktif kontinu dalam matriks parafin. Namun demikian, efektivitas jalur tersebut sangat dipengaruhi oleh fraksi massa, distribusi spasial, serta kualitas kontak antar partikel.

3.2. Analisis Konduktivitas Termal dengan Pendekatan Transien

Berangkat dari hasil karakterisasi mikro-struktur, analisis selanjutnya difokuskan pada evaluasi kuantitatif konduktivitas termal komposit parafin-EG pada tiga variasi rasio massa EG terhadap Parafin, yaitu 20:80, 30:70, dan 50:50. Tujuan utama analisis ini adalah untuk mengidentifikasi hubungan antara fraksi massa EG dan respons termal sistem, serta menguji apakah morfologi *flake* yang diamati benar-benar menghasilkan peningkatan konduktivitas sesuai prediksi teori perkolasi.

Pendekatan transien pada karakterisasi termal mengekstrak parameter material dari respons waktu terhadap gangguan panas. Dalam penelitian ini, respons waktu diukur sebagai fungsi temperatur pada penutup tembaga atas (T_1) dan bawah (T_2) dari susunan Cuatas – PCM – Cubawah. Karena metode menilai laju perubahan suhu (bukan keadaan tunak), maka parameter utama adalah konstanta waktu sistem τ , yang berkaitan langsung dengan kapasitas termal dan resistansi termal. Prinsip dasar dan justifikasi pendekatan ini didokumentasikan pada kajian metode transien untuk PCM dan material termal lainnya [11,12].

Secara fisik, untuk sistem yang secara makroskopik dapat dimodelkan sebagai elemen RC termal ekuivalen, konstanta waktu didefinisikan:

$$\tau = R_{dominan} C_{total} \quad (3)$$

Di mana $R_{dominan}$ adalah resistansi termal lapisan yang mengendalikan aliran panas (dalam konfigurasi ini diasumsikan oleh PCM) dan C_{total} adalah kapasitansi termal gabungan seluruh komponen yang menyimpan energi (PCM ditambah tutup tembaga). Untuk ekstraksi konduktivitas PCM digunakan persamaan terbalik:

$$k = \frac{K}{\tau} \text{ dengan } K = \frac{L(C_{PCM} + C_{Cu})}{A} \quad (4)$$

Di mana L merupakan tinggi PCM, A merupakan luas penampang, serta C_{PCM} dan C_{Cu} masing-masing merupakan kapasitansi termal PCM dan kedua penutup tembaga. K merupakan konstanta sistem yang bergantung pada geometri dan kapasitansi total, bukan properti material. Pendekatan serupa banyak dipakai pada studi karakterisasi termal PCM berbasis metode transien [11,13]. Persamaan 4.2 menyatakan bahwa konstanta waktu yang diukur tidak hanya berisi informasi resistif (yang terkait k), tetapi juga informasi kapasitif (yang terkait massa & kapasitas spesifik komponen). Prinsip ini dan praktik koreksi kapasitansi pada pendekatan transien dibahas pada literatur metode transien PCM dan pengukuran termal [12,13].

Pada penelitian ini, geometri spesimen dan parameter geometris lain dijadikan basis perhitungan kapasitansi dan konstanta sistem. Spesimen berbentuk silinder dengan diameter nominal 20 mm, sehingga luas penampang spesimen adalah:

$$A = \pi(0,01 \text{ m})^2 = 3,1416 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Dengan tinggi kapsul PCM 30 mm, maka didapatkan nilai volume sebesar:

$$V = (3,1416 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(0,03 \text{ m}) = 9,4248 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Perbandingan antara volume geometris dan massa aktual campuran menunjukkan densitas efektif komposit yang lebih rendah dibanding densitas parafin murni, yang mengindikasikan keberadaan porositas internal akibat struktur EG. Nilai ini tidak digunakan langsung dalam perhitungan kapasitansi karena massa aktual telah tersedia, namun tetap dicantumkan untuk memastikan konsistensi geometri model konduksi.

Kapsul PVC bersifat *hollow* dengan kedua ujung terbuka sehingga PCM kontak langsung dengan permukaan tembaga. Oleh sebab itu, PVC sebagai bahan isolator tidak dimasukkan ke dalam kapasitansi aksial yang dipertimbangkan dalam model

Massa campuran PCM (EG + Parafin) diukur sebelum pengisian. Nilai aktual yang dipakai pada perhitungan untuk masing-masing variasi massa EG terhadap parafin ialah, 3,61 gram untuk variasi 20:80, 2,91 gram untuk variasi 30:70, dan 2,10 gram untuk variasi 50:50. Karena tujuan analisis ialah untuk menghitung kapasitansi termal komponen, massa yang dimaksud selalu merujuk secara eksplisit pada massa campuran PCM ketika menghitung C_{PCM} (massa tembaga dihitung tersendiri dari geometri dan densitas tembaga).

Perhitungan kapasitas spesifik campuran dan kapasitansi PCM dilakukan berbasis fraksi massa dengan persamaan kapasitas spesifik campuran serta kapasitansi PCM masing-masing adalah:

$$C_{mix} = m_{EG} C_{EG} + m_p C_p / m_{PCM} \quad (5)$$

$$C_{PCM} = m_{PCM} C_{mix} = m_p C_p + m_{EG} C_{EG} \quad (6)$$

Untuk tujuan ini, dipakai nilai literatur/operasional $C_p = 2000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ dan $C_{EG} = 710 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Dengan menyubstitusikan kedua nilai ini ke dalam persamaan 4.3 dan 4.4, maka didapatkan nilai C_{mix} dan C_{PCM} masing-masing sebesar $1742,7 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ dan $6,291 \text{ J/K}$ untuk variasi 20:80, $1614,3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ dan $4,698 \text{ J/K}$ untuk variasi 30:70, serta $1355,0 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ dan $2,846 \text{ J/K}$ untuk variasi 50:50.

Kapasitansi penutup tembaga dihitung dari properti literatur dan volume silinder, sehingga menghasilkan persamaan:

$$C_{Cu} = \rho_{Cu} V_{Cu,tot} c_{Cu} \quad (7)$$

Untuk geometri tembaga yang digunakan pada spesimen, diperoleh nilai C_{Cu} sebesar $21,6745 \text{ J/K}$ (kontribusi ini signifikan terhadap kapasitansi total karena massa tembaga relatif besar terhadap massa PCM). Kapasitansi total sistem dirumuskan sebagai:

$$C_{tot} = C_{PCM} + C_{Cu} \quad (8)$$

Dengan menyubstitusikan nilai kapasitansi PCM dan tembaga yang sudah didapatkan sebelumnya, diperoleh nilai kapasitansi total sebesar $27,9657 \text{ J/K}$ untuk variasi 20:80, $26,3722 \text{ J/K}$ untuk variasi 30:70, serta $24,5200 \text{ J/K}$ untuk variasi 50:50. Konstanta sistem yang dipakai untuk mengekstrak konduktivitas didefinisikan sebagai:

$$K = LC_{tot}/A \quad (9)$$

Dengan menyubstitusikan nilai parameter geometri spesimen dan nilai kapasitansi total, diperoleh nilai numerik K sekitar $2670,525$ untuk variasi 20:80, $2518,357$ untuk variasi 30:70, serta $2341,485$ untuk variasi 50:50.

3.3. Hasil Eksperimental dan Analisis Konduktivitas Termal Multi-fase

Sebelumnya telah dijelaskan dasar teoretis analisis konduktivitas termal menggunakan pendekatan transien berbasis konstanta waktu sistem. Model tersebut diturunkan dari hukum Fourier untuk konduksi satu-dimensi yang dikombinasikan dengan neraca energi sistem berkapasitas panas terpusat. Dari penurunan matematis diperoleh bahwa respons temperatur sistem terhadap waktu mengikuti bentuk eksponensial orde satu, dengan konstanta waktu seperti yang didefinisikan pada persamaan 4.3. Maka hubungan konduktivitas termal efektifnya menjadi:

$$k = \frac{LC_{tot}}{A\tau} \quad (10)$$

Dengan demikian, parameter k tidak diukur secara langsung, melainkan diturunkan dari karakteristik dinamika sistem yang direpresentasikan oleh τ . Berdasarkan solusi eksponensial sistem orde satu, didapatkan:

$$T(t) = T_{88} - (T_{88} - T_0)e^{-t/\tau} \quad (11)$$

Dapat ditunjukkan bahwa ketika $t = \tau$, sistem telah mencapai $1 - e^{-1}$ dari perubahan total menuju kondisi tunak. Nilai ini secara matematis setara dengan 63,2%. Oleh karena itu, konstanta waktu dalam penelitian ini ditentukan sebagai waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai 63,2% dari perubahan selisih temperatur total pada domain temperatur yang dianalisis. Nilai tersebut bukan merupakan asumsi empiris, melainkan konsekuensi langsung dari bentuk eksponensial solusi diferensial yang telah dijabarkan sebelumnya.

Meskipun model dasar yang dijelaskan pada Sub-bab 4.2 berlaku untuk respons sistem secara umum, hasil eksperimen menunjukkan bahwa karakteristik respons termal berubah ketika material mengalami transisi fasa. Sifat termofisik komposit parafin-EG pada kondisi padat, selama proses pelelehan, dan setelah sepenuhnya mencair tidak identik, sehingga dinamika sistem juga berbeda.

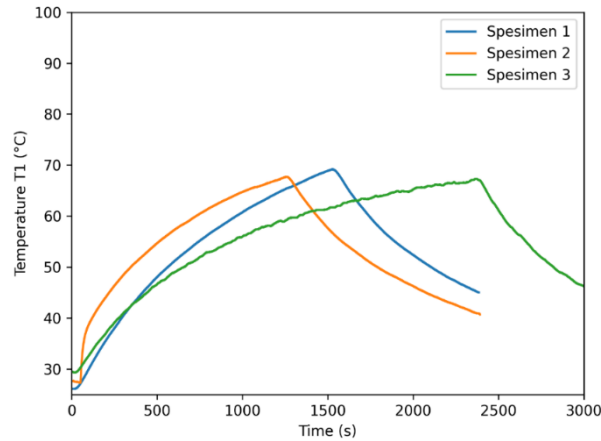
Atas dasar tersebut, analisis hasil eksperimen pada Sub-bab ini dilakukan dengan membagi data temperatur ke dalam tiga domain, yaitu:

1. **Fase padat (pra-leleh, $T < 55^\circ\text{C}$):** Pada domain ini material berada dalam kondisi padat dan jaringan partikel EG diasumsikan *rigid*.
2. **Daerah perubahan fasa ($55^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$):** Pada domain ini terjadi penyerapan kalor laten yang memengaruhi laju perubahan temperatur dan mengubah kapasitas panas efektif sistem.
3. **Fase cair ($T > 60^\circ\text{C}$):** Pada domain ini PCM telah sepenuhnya mencair dan struktur internal komposit mengalami perubahan konfigurasi.

Konstanta waktu dan konduktivitas termal dihitung secara terpisah untuk fase padat dan fase cair menggunakan relasi yang telah diturunkan sebelumnya, sedangkan pada daerah perubahan fasa dianalisis durasi *plateau* temperatur sebagai representasi proses penyerapan kalor laten.

3.3.1. Hasil Eksperimen pada Variasi Massa 20:80

Gambar 6 menampilkan kurva perubahan temperatur terhadap waktu untuk tiga pengulangan spesimen pada variasi massa 20:80.



Gambar 6. Kurva Perubahan Temperatur Spesimen 20:80 terhadap Waktu

Kurva menunjukkan pola eksponensial pada fase awal pemanasan. Pada temperatur di bawah 55°C, kenaikan berlangsung progresif dan relatif seragam antar pengulangan. Ketika temperatur mendekati 57,5°C, kurva melandai dan membentuk *plateau* yang merepresentasikan proses penyerapan kalor laten. Setelah temperatur melampaui 60°C, kenaikan kembali terjadi dengan gradien lebih kecil dibanding fase padat. Reprodusibilitas antar pengulangan menunjukkan kestabilan sistem eksperimen. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai konduktivitas termal seperti yang dijabarkan pada Tabel 1 hingga Tabel 3 berikut:

Tabel 1. Konduktivitas Termal Spesimen 20:80 pada Fase Solid

Spesimen	τ_{solid} (s)	k_{solid} (W/m·K)
1	161,0	16,587
2	158,5	16,849
3	158,5	16,849
Rata-rata	159,3	16,762

Konduktivitas meningkat signifikan dibanding parafin murni, meskipun jaringan perkolasi belum optimal.

Tabel 2. Analisis Perubahan Fasa Spesimen 20:80

Spesimen	Waktu Awal (s)	Waktu Akhir (s)	Durasi (s)
1	1830	3128	1298
2	1855	3187	1332
3	1842	3161	1319
		Rata-rata	1316

Durasi yang didapatkan pada proses perubahan fasa ini mencerminkan lamanya proses penyerapan kalor laten terjadi selama transisi padat–cair.

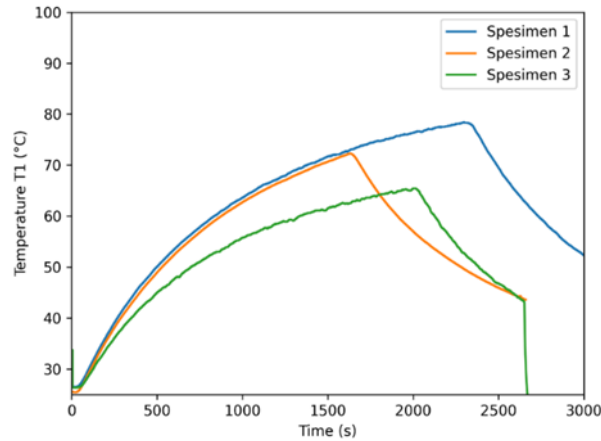
Tabel 3. Konduktivitas Termal Spesimen 20:80 pada Fase Cair

Spesimen	τ_{cair} (s)	k_{cair} (W/m·K)
1	1008	2,6493
2	1012	2,6389
3	1011	2,6415
Rata-rata	1010	2,6432

Penurunan konduktivitas menunjukkan efektivitas jaringan grafit berkurang setelah matriks mencair.

3.3.2. Hasil Eksperimen pada Variasi Massa 30:70

Gambar 7 menampilkan kurva perubahan temperatur terhadap waktu untuk tiga pengulangan spesimen pada variasi massa 30:70.



Gambar 7. Kurva Perubahan Temperatur Spesimen 30:70 terhadap Waktu

Respons fase padat menunjukkan kenaikan temperatur lebih cepat dibanding 20:80. *Plateau* perubahan fasa terlihat lebih panjang dan stabil, mengindikasikan distribusi panas yang lebih merata selama pelelehan. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai konduktivitas termal seperti yang dijabarkan pada Tabel 4 hingga Tabel 6 berikut:

Tabel 4. Konduktivitas Termal Spesimen 30:70 pada Fase Solid

Spesimen	τ_{solid} (s)	k_{solid} (W/m·K)
1	148,0	17,016
2	145,0	17,368
3	147,0	17,132
Rata-rata	146,7	17,172

Nilai ini merupakan konduktivitas tertinggi di antara seluruh variasi massa, menunjukkan fraksi ini mendekati kondisi perkolasi optimum.

Tabel 5. Analisis Perubahan Fasa Spesimen 30:70

Spesimen	Waktu Awal (s)	Waktu Akhir (s)	Durasi (s)
1	1702	3354	1652
2	1688	3312	1624
3	1699	3336	1637
		Rata-rata	1638

Durasi pelelehan terpanjang menunjukkan proses transisi berlangsung gradual.

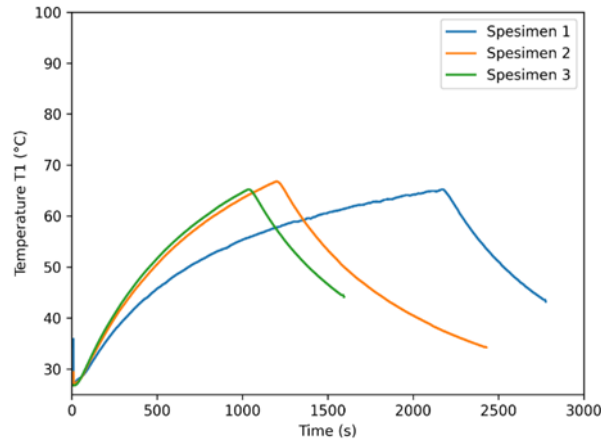
Tabel 6. Konduktivitas Termal Spesimen 30:70 pada Fase Cair

Spesimen	τ_{cair} (s)	k_{cair} (W/m·K)
1	1018	2,4738
2	1021	2,4666
3	1019	2,4714
Rata-rata	1019	2,4706

Dibandingkan variasi 20:80, nilai konduktivitas fase cair pada komposisi 30:70 menunjukkan penurunan lebih lanjut. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan fraksi massa EG tidak serta-merta meningkatkan konduktivitas efektif pada kondisi cair, melainkan cenderung mengurangi efektivitas jalur perpindahan panas akibat berkurangnya fraksi medium kontinu parafin serta melemahnya konektivitas partikel setelah matriks mencair.

3.3.3. Hasil Eksperimen pada Variasi Massa 50:50

Gambar 8 menampilkan kurva perubahan temperatur terhadap waktu untuk tiga pengulangan spesimen pada variasi massa 50:50.



Gambar 8. Kurva Perubahan Temperatur Spesimen 50:50 terhadap Waktu

Kenaikan temperatur fase padat lebih lambat dibanding 30:70. Plateau perubahan fasa lebih singkat, menunjukkan pelelehan berlangsung lebih cepat. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai konduktivitas termal seperti yang dijabarkan pada Tabel 7 hingga Tabel 9 berikut:

Tabel 7. Konduktivitas Termal Spesimen 50:50 pada Fase Solid

Spesimen	τ_{solid} (s)	k_{solid} (W/m·K)
1	195,0	12,007
2	201,0	11,6492
3	202,0	11,5915
Rata-rata	199,3	11,7494

Peningkatan fraksi EG tidak menghasilkan kenaikan konduktivitas linear, kemungkinan akibat aglomerasi atau resistansi kontak.

Tabel 8. Analisis Perubahan Fasa Spesimen 50:50

Spesimen	Waktu Awal (s)	Waktu Akhir (s)	Durasi (s)
1	1420	2400	980
2	1441	2399	958
3	1432	2391	959
		Rata-rata	966

Durasi terpendek menunjukkan distribusi panas lebih cepat selama pelelehan.

Tabel 9. Konduktivitas Termal Spesimen 50:50 pada Fase Cair

Spesimen	τ_{cair} (s)	k_{cair} (W/m·K)
1	1018	2,3001
2	1022	2,2911
3	1019	2,2978
Rata-rata	1020	2,2963

Tren penurunan konduktivitas fase cair berlanjut pada variasi 50:50, dengan nilai yang lebih rendah dibandingkan variasi 30:70. Fenomena ini memperkuat indikasi bahwa pada fraksi EG yang lebih tinggi, sistem tidak lagi didominasi oleh jaringan konduktif yang stabil, melainkan oleh distribusi partikel dalam medium cair yang kurang efektif mentransmisikan panas secara global, sehingga konduktivitas efektif terus menurun secara bertahap.

3.4. Hasil Eksperimental dan Analisis Konduktivitas Termal Multi-fase

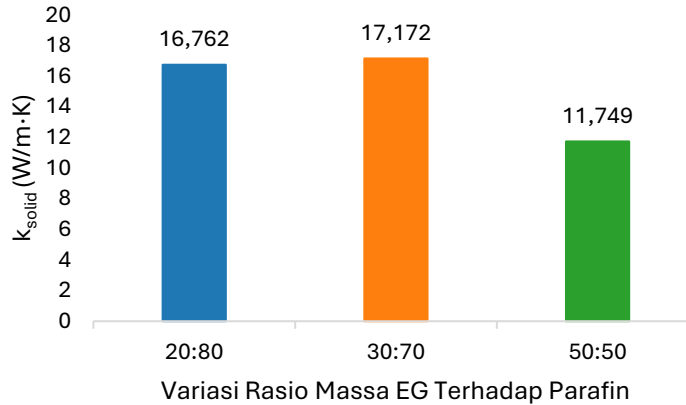
Berdasarkan hasil perhitungan konstanta waktu dan konduktivitas termal pada masing-masing variasi massa, diperoleh kecenderungan yang menunjukkan bahwa perilaku termal komposit parafin-EG tidak meningkat secara linear terhadap fraksi massa EG. Evaluasi komparatif dilakukan pada tiga domain temperatur, yaitu fase padat, daerah perubahan fasa, dan fase cair.

3.4.1. Perbandingan Konduktivitas Termal Fase Solid

Perbandingan rata-rata nilai konduktivitas termal pada fase solid antar variasi fraksi massa ditunjukkan pada Tabel 10 dan Gambar 9 sebagai berikut:

Tabel 10. Rekapitulasi Nilai Konduktivitas Termal Fase Solid

Variasi	k_{solid} (W/m·K)
20:80	16,762
30:70	17,172
50:50	11,749



Gambar 9. Grafik Perbandingan Konduktivitas Termal pada Fase Solid

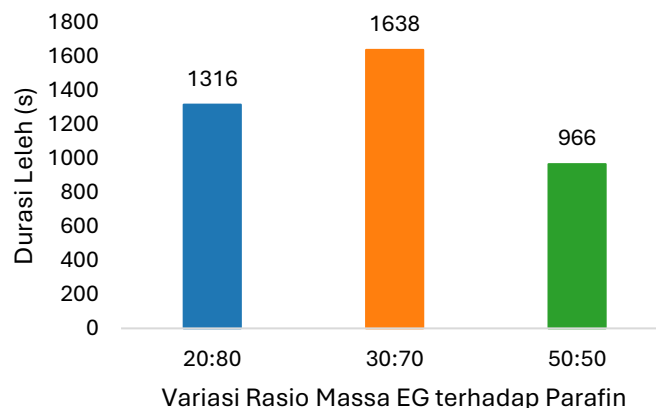
Nilai tertinggi diperoleh pada variasi 30:70. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi massa 30% EG menghasilkan konfigurasi mikro-struktur yang paling efektif dalam membentuk jaringan perkolasi termal. Pada fraksi 20%, jalur konduktif mulai terbentuk namun belum optimal. Sebaliknya, pada fraksi 50%, peningkatan kandungan EG tidak meningkatkan konduktivitas, bahkan terjadi penurunan. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui kemungkinan adanya aglomerasi partikel EG pada fraksi tinggi, peningkatan resistansi kontak antar partikel, dan juga distribusi partikel yang tidak homogen. Secara teoritis, perilaku ini konsisten dengan konsep ambang perkolasi (*percolation threshold*), di mana terdapat fraksi optimum untuk membentuk jaringan konduktif efektif. Penambahan partikel melampaui fraksi optimum tidak selalu meningkatkan konduktivitas secara proporsional.

3.4.2. Perbandingan Durasi Perubahan Fase

Perbandingan rata-rata durasi perubahan fase antar variasi fraksi massa ditunjukkan pada Tabel 11 dan Gambar 10 sebagai berikut:

Tabel 11. Rekapitulasi Nilai Durasi Perubahan Fase

Variasi	Durasi Leleh (s)
20:80	1316
30:70	1638
50:50	966



Gambar 10. Grafik Perbandingan Durasi Perubahan Fase

Variasi 30:70 memiliki durasi pelelehan terpanjang. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi panas berlangsung lebih merata selama transisi fasa, sehingga energi laten diserap secara gradual. Sebaliknya, variasi 50:50 menunjukkan durasi terpendek, yang mengindikasikan percepatan distribusi panas akibat kandungan grafit yang tinggi. Dengan

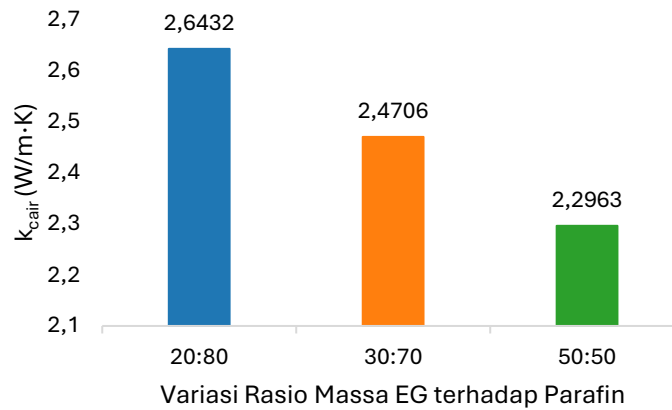
meningkatnya jalur konduksi internal, energi laten dapat disuplai lebih cepat ke seluruh volume material. Dengan demikian, peningkatan fraksi EG mempercepat kinetika pelelehan, meskipun tidak selalu meningkatkan konduktivitas fase padat secara linear.

3.4.3. Perbandingan Konduktivitas Termal Fase Cair

Perbandingan rata-rata nilai konduktivitas termal pada fase cair antar variasi fraksi massa ditunjukkan pada Tabel 12 dan Gambar 11 sebagai berikut:

Tabel 12. Rekapitulasi Nilai Konduktivitas Termal Fase Cair

Variasi	k_{cair} (W/m·K)
20:80	2,6432
30:70	2,4706
50:50	2,2963



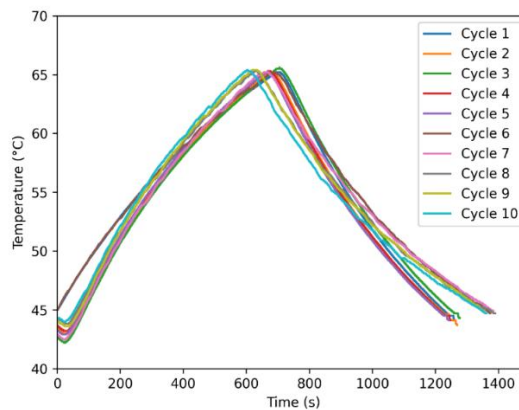
Gambar 11. Grafik Perbandingan Konduktivitas Termal pada Fase Cair

Secara komparatif, fenomena ini menunjukkan bahwa setelah parafin mencair, jaringan konduktif yang terbentuk pada fase padat kehilangan efektivitasnya. Pada fase cair, sistem lebih dipengaruhi oleh distribusi partikel dalam medium fluida dibandingkan oleh struktur perkolasi yang kaku. Akibatnya, peningkatan fraksi EG justru menurunkan kontribusi efektif terhadap perpindahan panas secara global. Dengan demikian, pengaruh fraksi massa EG terhadap konduktivitas paling dominan pada fase padat.

3.5. Analisis Kestabilan Fasa dan Konduktivitas Termal Spesimen

Salah satu objektif dari penelitian ini ialah melakukan evaluasi kestabilan fasa dilakukan untuk menilai konsistensi karakteristik termal komposit parafin–EG. Analisis kestabilan fasa ini dilakukan dengan menggunakan spesimen ketiga variasi massa 50:50 yang di mana spesimen diberi siklus pemanasan berulang. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan terjadinya degradasi material, segregasi partikel grafit, perubahan temperatur transisi, maupun penurunan performa konduktivitas akibat siklus termal berulang.

Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali pada rentang suhu 45–65°C. Analisis dilakukan dengan mengamati respons temperatur terhadap waktu. Gambar 12 menampilkan kurva perubahan temperatur terhadap waktu untuk lima siklus pemanasan pada spesimen 50:50.



Gambar 12. Grafik Perubahan Temperatur terhadap Waktu pada Spesimen 3 Variasi 50% setelah Diberi Perlakuan Berulang Sebanyak 10 Siklus

Secara visual, seluruh kurva menunjukkan pola yang sangat serupa. Pada rentang 45–55°C, kenaikan temperatur berlangsung dengan gradien yang relatif konsisten antar siklus. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme konduksi panas pada fase padat tidak mengalami perubahan signifikan akibat siklus termal berulang. Pada rentang sekitar 55–60°C, seluruh kurva memperlihatkan *plateau* yang jelas dan berulang secara konsisten. *Plateau* ini merepresentasikan proses penyerapan kalor laten selama transisi padat–cair. Tidak terlihat adanya pergeseran temperatur *plateau* secara sistematis hingga siklus ke-10. Setelah temperatur melampaui 60°C, kurva kembali menunjukkan kenaikan temperatur yang relatif seragam antar siklus. Secara kualitatif, hasil ini menunjukkan kestabilan perilaku termal komposit terhadap pemanasan berulang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai konduktivitas termal yang diekstrak dari respons transien setelah koreksi kapasitansi penutup menghasilkan estimasi k fase padat yang berada pada kisaran 11,75-17,17 W/m·K, tergantung komposisi massa EG terhadap parafin; nilai k fase cair berada pada kisaran 2,30-2,64 W/m·K.
2. Pola relatif antar variasi massa menunjukkan adanya kenaikan nilai konduktivitas termal pada fase solid ketika fraksi massa EG dinaikkan dari 20% ke 30%. Hal ini mengindikasikan terbentuknya jaringan konduktif yang lebih efektif (mendekati kondisi perkolasi). Namun, nilai konduktivitas termal pada fraksi massa 50% menunjukkan penurunan ke titik yang lebih rendah daripada fraksi massa EG 20%. Fenomena ini diduga terjadi akibat adanya aglomerasi partikel dan berkurangnya kontinuitas matriks parafin, sehingga jalur konduksi global menjadi kurang optimal.
3. Pada fase cair, konduktivitas termal menurun secara konsisten seiring peningkatan fraksi massa EG. Hal ini menunjukkan bahwa setelah matriks mencair, jaringan konduktif kehilangan efektivitasnya, sehingga peningkatan fraksi EG tidak lagi memberikan keuntungan konduktivitas.
4. Durasi perubahan fasa dipengaruhi oleh komposisi. Variasi 50:50 menunjukkan durasi pelelehan paling singkat, sedangkan 30:70 paling lama. Hal ini merupakan konsekuensi dari kombinasi konduktivitas efektif dan besarnya kalor laten total.
5. Kestabilan fasa (50:50) hingga 10 siklus menunjukkan titik leleh dan respons termal yang konsisten, tanpa indikasi degradasi signifikan, yang mengindikasikan stabilitas siklik PCM komposit dalam rentang siklus yang diuji.
6. Ketidakpastian relatif akhir pada k berada pada kisaran $\pm 3,0$ -3,6%, setelah propagasi dari ketidakpastian konstanta sistem K dan deviasi standar τ .

5. Daftar Pustaka

- [1] Muliawan R. PEMANFAATAN THERMAL ENERGY STORAGE NON-MEKANIK SEBAGAI PENDINGIN SINGKONG. Jurnal Teknologi Terapan | 2021;7.
- [2] Harjanto NT. DAMPAK LINGKUNGAN PUSAT LISTRIK TENAGA FOSIL DAN PROSPEK PLTN SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK NASIONAL. Majalah Ilmiah PIN 2008;1:39–50.
- [3] Venkatesan SP, Nagendra BR, Ram CR, Venkatesh S, Purusothaman M. The effect of expanded graphite on the performance of paraffin phase change materials used in thermal energy storage. J. Phys. Conf. Ser., vol. 2054, IOP Publishing Ltd; 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012071>.
- [4] Liu C, Cheng Q, Li B, Liu X, Rao Z. Recent advances of sugar alcohols phase change materials for thermal energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2023;188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113805>.
- [5] Zhao Y, Jin L, Zou B, Qiao G, Zhang T, Cong L, et al. Expanded graphite – Paraffin composite phase change materials: Effect of particle size on the composite structure and properties. Appl Therm Eng 2020;171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115015>.
- [6] Pandiangan T, Suwoto, Lasman AN. STUDI BAHAN GRAFIT SEBAGAI MODERATOR DAN REFLEKTOR PADA REAKTOR TEMPERATUR TINGGI. Prosiding Seminar ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Bandung: 2002, p. 355–62.
- [7] Yadav A, Samykano M, Pandey AK, Rajamony RK, Tyagi V V. Thermal characterization of shape-stable phase change material for efficient thermal energy storage and electric to thermal energy conversion. J Energy Storage 2024;103. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114368>.
- [8] Xia L, Zhang P, Wang RZ. Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material. Carbon N Y 2010;48:2538–48. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.03.030>.
- [9] Raza G, Shi Y, Deng Y. Expanded graphite as thermal conductivity enhancer for paraffin wax being used in thermal energy storage systems. Proceedings of 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), Islamabad: 2016, p. 1–12.
- [10] Zhang H, Wang F, He S, Cao B, Yao Q, Wang N. Smart thermal phase change materials with switchable morphology. J Energy Storage 2025;112. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115285>.

-
- [11] Khodadadi JM, Hosseinizadeh SF. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2007;34:534–43. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.005>.
- [12] Fan L, Khodadadi JM. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:24–46. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.007>.
- [13] Mehling H, Cabeza LF. *Heat and cold storage with PCM*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>.