

Pengembangan Komposit *Linear Low-Density Polyethylene* dengan Asam Palmitat Sebagai Material *Thermal Energy Storage*

¹⁾David Bayu Saputra, ²⁾Hisyam Ma'mun, ³⁾Muhammad Faesal Febriandyono,
⁴⁾Rifki Hermana

^{1,2,3,4)}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
¹⁾ muhammadfaesalfabriandyono@upgris.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 17 Juni 2026

Disetujui : 4 Juli 2026

Kata Kunci :

Thermal Energy Storage, LLDPE, asam palmitat, kalor laten, material komposit

ABSTRAK

Kebutuhan energi global yang terus meningkat mendorong pengembangan sistem penyimpanan energi termal yang efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan melakukan studi awal pengembangan material komposit berbasis *Linear Low-Density Polyethylene* (LLDPE) dan asam palmitat sebagai media *Thermal Energy Storage* (TES). Metode eksperimental digunakan dengan menguji tiga variasi komposisi yaitu S1 (85%:15%), S2 (75%:25%), dan S3 (65%:35%) melalui proses pemanasan (*charging*) dan pendinginan (*discharging*) terkontrol menggunakan alat TES berbahan *stainless steel* dengan *cartridge heater* 300 Watt dan termokopel digital TM902C. Hasil pengukuran menunjukkan distribusi temperatur tidak homogen, dimana T2 selalu lebih tinggi dari T1 akibat dominasi mekanisme konduksi. Komposisi S2 (75%:25%) menghasilkan total energi tertinggi sebesar 60,48 KJ dengan kalor laten 30,24 KJ dan durasi fase laten paling panjang. Komposisi S1 (85%:15%) menunjukkan kestabilan termal terbaik dengan distribusi panas merata dan permukaan material paling homogen secara visual. Sementara itu, komposisi S3 (65%:35%) menunjukkan fluktuasi suhu tidak stabil disertai retakan dan pemisahan fase pada struktur material. Penelitian ini membuktikan bahwa rasio komposisi LLDPE dan asam palmitat berpengaruh signifikan terhadap stabilitas termal, kalor laten, dan kualitas solidifikasi material PCM dalam sistem *Thermal Energy Storage*.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : Jun 17, 2026

Accepted : Jul 4, 2026

Keywords:

Thermal Energy Storage, LLDPE, palmitic acid, Latent heat, composite material

ABSTRACT

The growing global energy demand has driven the development of efficient and sustainable thermal energy storage systems. This study aims to conduct a preliminary investigation into composite materials based on *Linear Low-Density Polyethylene* (LLDPE) and palmitic acid as *Thermal Energy Storage* (TES) media. An experimental method was employed by testing three composition variations: S1 (85%:15%), S2 (75%:25%), and S3 (65%:35%) through controlled heating (*charging*) and cooling (*discharging*) cycles using a *stainless steel* TES apparatus equipped with a 300-Watt *cartridge heater* and TM902C digital thermocouple. Measurement results revealed a non-homogeneous temperature distribution, where T2 consistently exceeded T1 due to the dominance of conduction as the primary heat transfer mechanism. Composition S2 (75%:25%) produced the highest total energy of 60.48 KJ with a latent heat of 30.24 KJ and the longest latent phase duration.

Composition S1 (85%:15%) demonstrated the best thermal stability with a more uniform heat distribution and the most visually homogeneous material surface. Meanwhile, composition S3 (65%:35%) exhibited unstable temperature fluctuations accompanied by cracking and phase separation in the material structure. This study confirms that the LLDPE-to-palmitic acid composition ratio significantly affects thermal stability, latent heat capacity, and solidification quality of PCM-based composites in a Thermal Energy Storage system.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global yang terus meningkat secara eksponensial, diikuti desakan transisi menuju sumber energi terbarukan yang bersifat intermitten, menciptakan tantangan serius dalam hal keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi. *Thermal Energy Storage (TES)* berbasis penyimpanan kalor laten dan kalor sensible merupakan solusi yang telah matang secara teknologi dan terbukti memberikan dampak nyata dalam transisi energi global. TES bekerja dengan menyimpan dan melepaskan energi termal melalui mekanisme perubahan fasa material pada temperatur tertentu, sehingga mampu menjembatani ketidaksesuaian waktu antara produksi dan konsumsi energi (Maruf et al., 2022). Dalam konteks ini, *Phase Change Material (PCM)* menjadi komponen inti yang paling banyak dikaji karena kemampuannya menyimpan energi dalam densitas tinggi pada rentang temperatur yang relatif sempit.

Di antara berbagai kandidat *Phase Change Material* organik, asam palmitat (*palmitic acid*, C16:0) menempati posisi istimewa. Asam palmitat merupakan asam lemak berbasis bio yang memiliki kapasitas kalor laten tinggi, stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, dan tersedia dari sumber-sumber terbarukan seperti minyak nabati dan lemak hewani, menjadikannya pilihan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan PCM sintesis berbasis parafin. Titik leleh asam palmitat berada pada kisaran 60–62°C, yang sangat sesuai untuk aplikasi TES temperatur menengah seperti sistem pemanas bangunan, kolektor surya, dan manajemen panas industri ringan (Herrera et al., 2024; Ishikawa et al., 2026). Kalor laten asam palmitat berada di 2.20 kJ/kg.°C (F. R. Martinez et al., 2025). Lebih jauh, penyimpanan energi kalor laten merupakan teknologi yang mampu

meningkatkan utilisasi energi dan secara efektif mengurangi ketidaksesuaian antara pasokan dan perintah energi dalam dimensi waktu maupun ruang.

Meskipun demikian, asam palmitat murni menghadapi dua hambatan teknis fundamental yang membatasi implementasi praktisnya. Pertama, konduktivitas termalnya yang sangat rendah (~0,17 W/m.K) memperlambat laju pengisian (*charging*) dan pelepasan (*discharging*) energi secara signifikan. Kedua, PCM organik termasuk asam lemak cenderung mengalami kebocoran fase cair (*liquid leakage*) selama proses transisi fasa, yang merupakan tantangan utama yang membatasi aplikasi material ini secara luas. Akibatnya, asam palmitat tidak dapat digunakan secara langsung dalam sistem TES tanpa modifikasi struktur lebih lanjut (HUO et al., 2024).

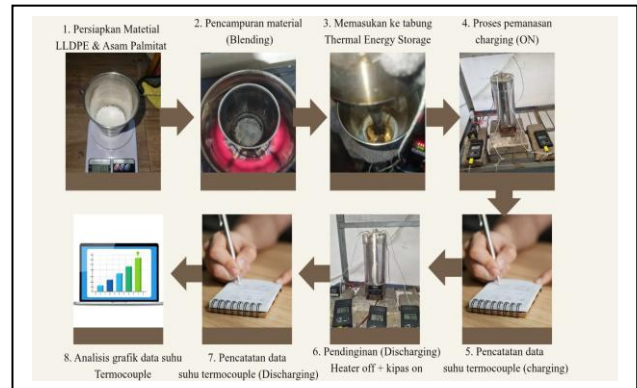
Pendekatan yang paling efektif untuk mengatasi kedua permasalahan tersebut adalah pengembangan *shape-stabilized Phase Change Material* (SS-PCM) dengan memanfaatkan matriks polimer sebagai penahan bentuk. Penelitian terkini memusatkan perhatian pada pembuatan SS-PCM berbasis polimer untuk mengatasi tantangan seperti konduktivitas termal rendah, kebocoran selama transisi fasa, degradasi termal, dan ketahanan siklus; SS-PCM berbasis polimer terbukti lebih fleksibel, ringan, dan tahan lama dibandingkan PCM konvensional serta dapat dikustomisasi sesuai kebutuhan aplikasi spesifik. Prinsipnya, polimer dengan titik leleh lebih tinggi dari PCM organik yang dikandungnya akan tetap dalam fasa padat saat PCM meleleh, sehingga mencegah kebocoran. Ketika PCM dan polimer dilelehkan bersama lalu didinginkan, polimer membentuk jaringan tiga dimensi yang menyelubungi PCM, sehingga saat PCM berubah dari padat ke cair, matriks polimer tetap solid dan mencegah kebocoran, meski dalam jangka panjang dapat

terjadi rembesan bertahap dari jaringan tersebut. *Linear Low-Density Polyethylene* (LLDPE) menjadi kandidat matriks yang sangat menarik dalam konteks ini. Studi terbaru pada komposit HDPE/PCM oleh Sacchet et al. (2025) membuktikan bahwa matriks poliolefin mampu menstabilkan bentuk PCM, mencegah kebocoran, sekaligus meningkatkan sifat mekanik material komposit secara keseluruhan. LLDPE, sebagai varian poliolefin dengan densitas lebih rendah dan fleksibilitas mekanik lebih tinggi dibanding HDPE, memiliki potensi besar sebagai matriks penahan untuk asam palmitat terutama karena titik lelehnya pada kisaran 120–130°C jauh melampaui temperatur leleh asam palmitat (~62°C), sehingga secara termodinamis kokoh sebagai matriks di seluruh rentang operasi TES (Ghasemi et al., 2026). Komposit PCM berbasis polimer yang dibuat melalui metode *hot melt extrusion* maupun *melt blending* terbukti menghasilkan distribusi PCM yang homogen pada skala mikro dengan stabilitas bentuk dan kapasitas kalor laten yang superior.

Meskipun komposit PCM berbasis HDPE dan LDPE telah cukup banyak dikaji (Sacchet et al., 2025; Trigui et al., 2022), penelitian yang secara khusus mengeksplorasi LLDPE sebagai matriks penahan asam palmitat dalam sistem TES masih sangat terbatas. LLDPE memiliki kalor jenis di 2,5 kJ/Kg (D. Kaineder et al., 2024). Kebaruan penelitian ini terletak pada kajian sistematis pengaruh variasi rasio komposisi LLDPE:asam palmitat dengan rasio perbandingan massa (85:15, 75:25, dan 65:35) terhadap karakteristik penyimpanan energi termal, dengan hipotesis bahwa terdapat rasio optimal yang menyeimbangkan kapasitas kalor laten maksimal dengan kestabilan termal dan integritas morfologi material. Penelitian ini bertujuan melakukan studi awal pengembangan material komposit berbasis LLDPE dan asam palmitat sebagai media TES, mencakup evaluasi proses blending, analisis kinerja LLDPE sebagai matriks penahan, serta penentuan komposisi awal berpotensi optimal melalui pengujian *charging-discharging* terkontrol.

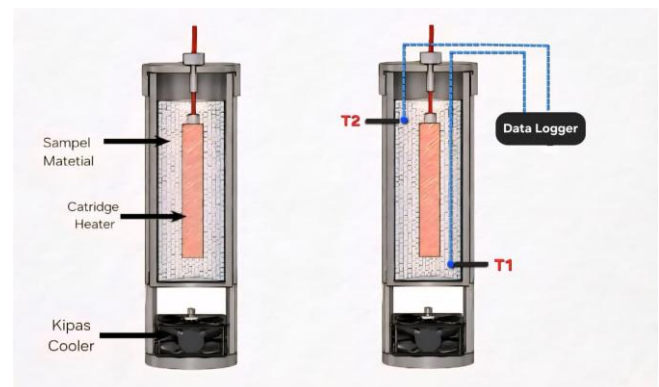
2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi karakteristik termal komposit berbasis *Linear Low-Density Polyethylene* (LLDPE) dan *Palmitic acid* sebagai kandidat *Thermal Energy Storage* (TES). Pendekatan eksperimen ini umum digunakan untuk mengkaji karakteristik proses



charging-discharging serta distribusi temperatur pada material penyimpan energi laten (Trigui et al., 2022; Maruf et al., 2022). Diagram alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1. Alur Penelitian



Gambar 2. Desain Skematis Termal Statis

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat yang dirancang khusus berbahan *stainless steel* untuk menahan energi panas dari material PCM. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan termokopel, yaitu T1 (dibagian bawah) dan T2 (bagian atas dekat sumber panas). Metode ini mengacu pada studi eksperimen PCM yang memanfaatkan *multi-point temperature measurement* untuk mengidentifikasi gradien termal selama proses perubahan fasa.

2.1 Alat dan Bahan

1. Alat yang digunakan:

- a. Tabung *Thermal Energy Storage* berbahan *stainless steel*



Gambar 3. Alat *Thermal Energy Storage*
Keterangan bagian alat: 1.) *Cartridge heater*, 2.) Tutup tabung *stainless steel*, 3.) Tabung *stainless steel*, 4.) Kipas pendingin, 5.) Power control heater (*Temperature Thermostat REX C100*).

- b. *Cartridge heater*



Gambar 4. *Cartridge heater* 220v, 300W

- c. Termometer TM902C Digital *Thermocouple*



Gambar 5. Termometer TM902C Digital *Thermocouple*

2. Bahan yang digunakan:

A.



B.



Gambar 6. A. LLDPE (*Linear Low-Density polyethylene*), B. *Palmitic Acid*

2.2 Variasi Komposisi Campuran

Tabel 1. Komposisi Variabel

Kode Sample	LLDPE (%)	Asam Palmitat (%)	LLDPE (gram)	Asam Palmitat (gram)
S1	85	15	85	15
S2	75	25	75	25
S3	65	35	65	35

Variasi komposisi LLDPE dan asam palmitat sebesar 85%:15%, 75%:25%, dan 65%:35% masing masing bermassa 100 gram, sebab itu dipilih untuk mengevaluasi pengaruh fraksi PCM terhadap performa termal dan stabilitas material. Peningkatan kandungan asam palmitat diketahui dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi laten, namun berpotensi menurunkan stabilitas bentuk akibat fenomena kebocoran pada fase cair. Oleh karena itu, variasi

komposisi dilakukan secara bertingkat untuk memperoleh rasio optimum antara kapasitas penyimpanan energi dan kestabilan mekanik material. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa komposisi PCM sangat mempengaruhi sifat termal dan batas stabilitas sistem, sehingga diperlukan optimasi fraksi untuk mencapai performa terbaik (Liu et al., 2023).

2.3 Prosedur Eksperimen

Pengujian dilakukan melalui dua tahap utama:

1. *Charging* (pemanasan/pengisian daya), material dipanaskan menggunakan heater hingga melewati titik leleh PCM. Selanjutnya Temperatur dicatat terhadap waktu pada T1 dan T2.
2. *Discharging* (pendinginan/pelepasan daya), saat melakukan pendinginan sumber panas dimatikan/*Off*, pendinginan dilakukan secara alami dengan bantuan kipas *cooler*, sembari waktu berjalan temperature dicatat hingga kondisi mendekati suhu lingkungan.

Metode ini sesuai dengan pendekatan *thermal cycling test* yang digunakan mengevaluasi performa energi PCM (X.K. Yu et al., 2023). Massa material didalam tabung *stainless* 100 gram dengan isi campuran LLDPE dengan asam palmitat (85%:15%, 75%:25%, dan 65%:35%) dominan LLDPE dari pada asam palmitat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan pengujian dengan menggunakan alat yang dirancang khusus untuk menahan energi panas dari material PCM. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan termokopel, yaitu T1 (dibagian bawah) dan T2 (bagian atas dekat sumber panas), diperoleh suhu pada sistem tidak homogen. Nilai T2 secara konsisten lebih tinggi dibandingkan T1 selama proses pemanasan berlangsung.

Perbedaan ini menunjukkan adanya gradien temperatur yang signifikan akibat posisi *cartridge heater*. Panas merambat secara radial dari pusat menuju bagian luar material melalui mekanisme konduksi.

3.1. Karakteristik Pelelehan Material

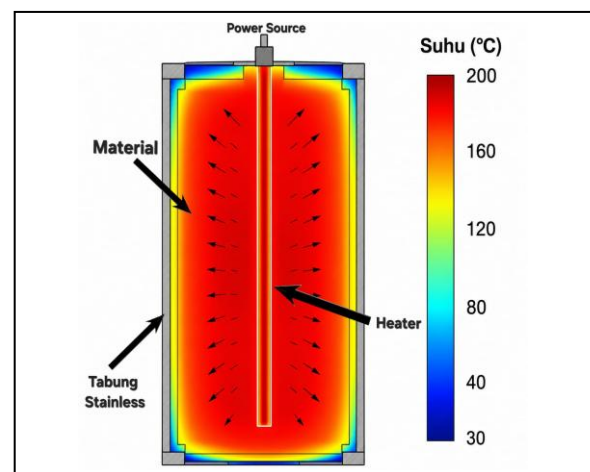
Proses pelelehan material menunjukkan pola bertahap yang tidak seragam. material yang berada di sekitar *cartridge heater* mengalami kenaikan suhu lebih cepat sehingga mencapai fase cair terlebih dahulu. Sementara itu, material yang berada didekat dinding tabung dan bagian bawah tabung (T1) mengalami keterlambatan dalam proses pelelehan/ proses *charging*.

3.2. Pengisian Daya dan Pelepasan daya

Perpindahan panas pada sistem ini didominasi oleh tiga mekanisme utama, yaitu:

a. Konduksi

Konduksi merupakan mekanisme utama yang terjadi dari permukaan *cartridge heater* menuju material disekitarnya. Laju perpindahan panas mengikuti hukum Fourier.



Gambar 7. Tabung TES dalam pengisian daya panas/*Charging*

b. Konveksi Alami

Ketika material mulai mencair, terjadi aliran fluida akibat perbedaan densitas. Namun, efek ini masih terbatas sehingga tidak mampu mendistribusikan panas secara merata ke seluruh volume.

c. Kehilangan Panas (*Heat Loss*)

Gambar 8. Tabung TES dalam pelepasan daya panas/*discharging*

Kehilangan panas terjadi melalui dinding tabung dan diperkuat oleh adanya kipas pendingin di bagian bawah sistem. Hal ini menyebabkan suhu pada titik T1 lebih rendah dibandingkan T2.

3.3. Grafik Pengisian Daya

Berdasarkan hasil penelitian ini dalam proses pengisian daya (*charging*) menunjukkan bahwa temperatur meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pemanasan. Pada tahap awal proses, kenaikan suhu terjadi secara signifikan akibat perbedaan temperatur yang besar antara *cartridge heater* dan material, sehingga laju perpindahan panas berlangsung cepat.

Tabel 2. *Charging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 85%:15%

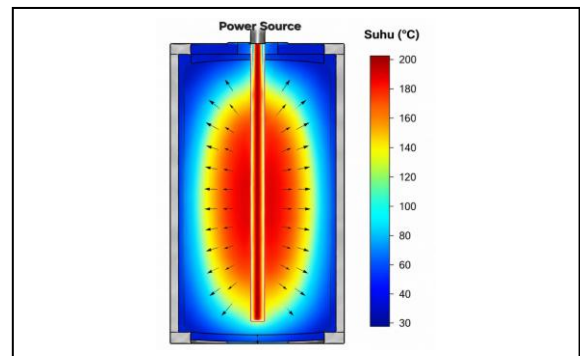
Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
10	42,8	50,4
100	86,8	90
200	106,2	104,2
300	152,4	108,7
400	144	128,9
450	158,7	133,2

Tabel 3. *Charging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 75%:25%

Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
10	74,1	69
100	103,5	113,2
200	110,4	142,5
300	129,9	203,6
340	179,2	194,5

Tabel 4. *Charging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 65%:35%

Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
10	40	37,7
100	118,2	85,7
200	135	105,4
300	137	120,8

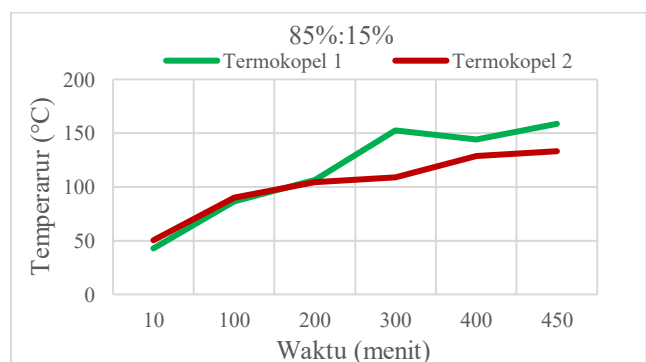


400	139	124,6
440	154	138,1

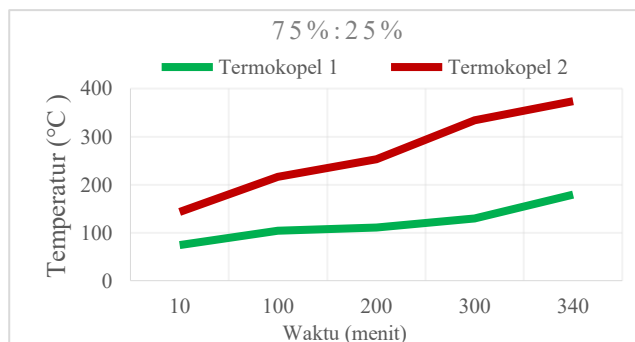
Hasil *charging* ketiga tabel ini sejalan dengan penelitian pada material *Phase Change Material* (PCM), dimana peningkatan fraksi PCM dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi, namun menurunkan konduktivitas termal sehingga memperlambat distribusi panas dalam sistem. Durasi waktu *charging* pada masing-masing rasio komposisi yaitu:

- 85%:15% dengan durasi waktu *charging* 450 menit.
- 75%:25% dengan durasi waktu *charging* 340 menit.
- 65%:35% dengan durasi waktu *charging* 440 menit.

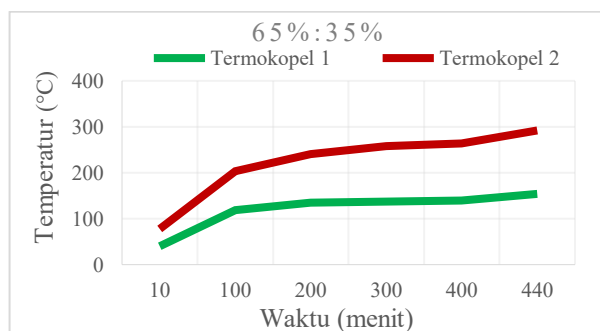
Durasi ke tiga rasio komposisi berbeda beda, karena diambil menurut material PCM 100% di fase leleh dan ketiga rasio menunjukkan perbedaan durasi *charging*.



Gambar 9. Grafik *charging* komposisi 85%:15%



Gambar 10. Grafik *charging* komposisi 75%:25%



Gambar 11. Grafik *charging* komposisi 65%:35%

Grafik menunjukkan bahwa peningkatan suhu terjadi secara bertahap pada seluruh variasi. Variasi 80%:15% memiliki kestabilan termal yang lebih baik dengan distribusi panas yang relatif merata. Variasi 75%:25% menunjukkan durasi fase laten yang lebih panjang, namun dengan perbedaan suhu yang signifikan antar titik pengukuran. Sementara itu, variasi 65%:35% menunjukkan fluktuasi suhu yang mengindikasikan ketidak stabilan dalam proses perpindahan panas.

3.4. Grafik Pelepasan Daya

Grafik pelepasan daya menunjukkan penurunan temperatur material terhadap waktu setelah sumber panas diberhentikan. Secara umum, ketiga komposisi memperlihatkan pola penurunan suhu yang relatif cepat pada awal proses, kemudian melambat seiring jalannya waktu. Hal ini disebabkan oleh perbedaan gradien temperatur antara material dan lingkungan yang semakin kecil.

Selain itu, pada rentang temperatur tertentu terlihat kecenderungan penurunan yang lebih landai, yang mengindikasikan adanya proses pelepasan kalor laten dari material. Fenomena ini menunjukkan bahwa material masih melepaskan energi dalam bentuk berubahan

fasa meskipun termeratur tidak berubah secara signifikan.

Tabel 5. *Discharging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 85%:15%

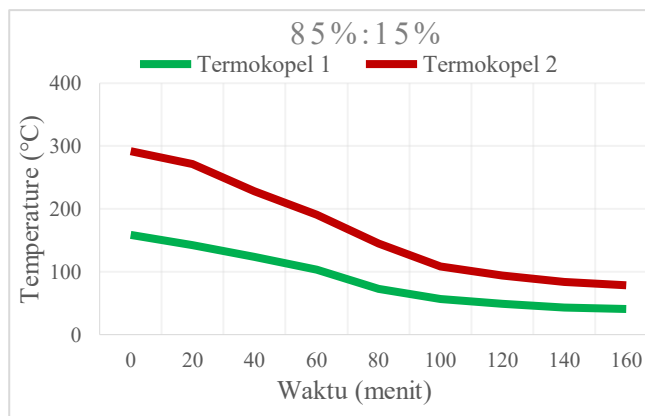
Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
0	158,7	133,2
20	142,6	129
40	123,4	105
60	103,5	86,9
80	73,2	72
100	56,4	52,4
120	48,8	45,6
140	43,4	40,2
160	40,8	37,7

Tabel 6. *Discharging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 75%:25%

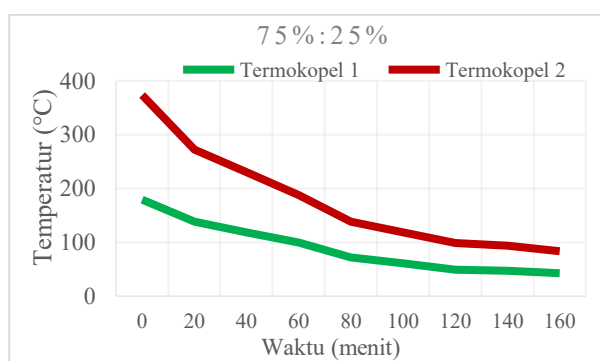
Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
0	179,2	194,5
20	138,4	133,3
40	118,7	111,9
60	99,4	88
80	72,2	66,3
100	60,8	57,3
120	49,4	48,8
140	47,1	46,3
160	42,5	40,9

Tabel 7. *Discharging* Perbandingan T1-T2, Komposisi 65%:35%

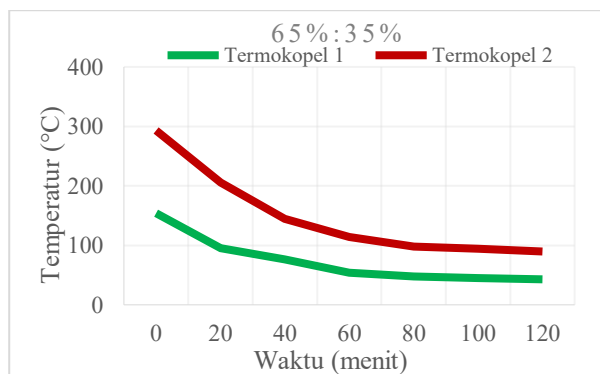
Waktu (menit)	Termokopel 1 (°C)	Termokopel 2 (°C)
0	154,1	139,1
20	94,8	110,5
40	76,8	67,6
60	54,1	60,1
80	47,4	50,4
100	45,4	48,7
120	42,9	46,8



Gambar 12. Grafik *discharging* komposisi 85%:15%



Gambar 13. Grafik *discharging* komposisi 75%:25%



Gambar 14. Grafik *discharging* komposisi 65%:35%

Peningkatan fraksi LLDPE dalam komposit PCM menyebabkan penurunan kapasitas penyimpanan energi laten akibat berkurangnya fraksi material aktif. Namun, peningkatan ini secara signifikan meningkatkan stabilitas bentuk melalui pembentukan jaringan polimer yang mampu menahan fase cair, meskipun berdampak pada pengaruh laju perpindahan panas dan memperpanjang waktu *charging-discharging*.

3.5. Tabel Parameter Sifat Termal

Berikut adalah data hasil parameter termal, parameter termal merupakan aspek fundamental dalam mengevaluasi kinerja material, khususnya pada sistem penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage*). Sifat termal mencerminkan kemampuan material dalam menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi panas selama proses pemanasan (*charging*) dan pendinginan (*discharging*). Dalam penelitian ini, analisis parameter sifat termal dilakukan untuk memahami karakteristik perpindahan panas serta stabilitas termal material yang digunakan. Parameter yang dianalisis titik leleh, kalor laten, dan kapasitas panas.

Tabel 8. Parameter Sifat Termal

Kode Sampel	$Q_{\text{sensibel padat}}$ (kJ)	Q_{laten} (kJ)	$Q_{\text{sensibel cair}}$ (kJ)	Q_{total} (kJ)
S1	19,81	27,93	8,088	55,8
S2	12,291	30,24	17,954	60,4
S3	18,552	27,93	9,36	55,8

Kapasitas panas jenis digunakan untuk mengetahui kemampuan material dalam menyerap energi panas. Perhitungan dilakukan berdasarkan energi panas, massa material, dan perubahan temperatur selama proses pemanasan.

Energi total:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{sensibel padat}} + Q_{\text{laten}} + Q_{\text{sensibel cair}} \quad (1)$$

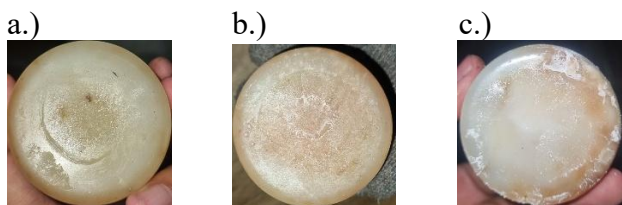
$$Q_{\text{sensibel padat}} = m \cdot C_p \cdot (T_m - T_i) \quad (2)$$

$$Q_{\text{laten}} = m \cdot \Delta H \quad (3)$$

$$Q_{\text{sensibel cair}} = m \cdot C_p \cdot (T_c - T_m) \quad (4)$$

Dengan melakukan perhitungan menggunakan rumus tersebut, rumus tersebut digunakan untuk menghitung total energi termal yang mampu diserap oleh material PCM (*Phase Change Material*) selama proses pemanasan (*charging*).

3.6. Bentuk Material Setelah Melewati Proses *Charging* dan *Discharging*



Gambar 15. Material *Thermal Energy Storage* (TES). Setelah Melewati Proses *Charging&Discharging*, Komposisi a.) 85%:15%, b.) 75%:25%, c.) 65%:35%.

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa variasi 85%:15% memiliki permukaan paling homogen dan stabil setelah siklus termal. Variasi 75%:25% mulai menunjukkan ketidakteraturan struktur, sedangkan variasi 65%:35% memperlihatkan adanya retakan dan pemisahan fase yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi material berpengaruh terhadap stabilitas termal dan kualitas solidifikasi PCM.

3.7. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Terimakasih juga saya ucapkan kepada bapak dosen pembimbing atas segala arahan, bimbingan, serta masukan ilmiah yang sangat berharga bagi proses penelitian dan penyusunan naskah ini.

Saya sampaikan juga apresiasi kepada pihak laboratorium atas dukungan fasilitas dan peralatan yang telah disediakan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Tidak lupa Terimakasih saya ucapkan juga kepada keluarga atas dukungan moral dan doa yang senantiasa diberikan selama proses penyelesaian penelitian ini.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa rasio campuran LLDPE dan asam palmitat sangat memengaruhi performa penyimpanan energi termal dan stabilitas material. Komposisi S2 (75%:25%) menjadi pilihan terbaik untuk kapasitas penyimpanan energi karena menghasilkan total energi tertinggi sebesar 60,4 kJ dengan kalor laten 30,24 kJ dan durasi fase laten terlama. Di sisi lain, komposisi S1

(85%:15%) memberikan kestabilan fisik dan termal terbaik dengan distribusi panas yang merata serta permukaan material yang paling homogen tanpa cacat. Sebaliknya, peningkatan kandungan asam palmitat yang terlalu tinggi pada S3 (65%:35%) berdampak buruk karena menyebabkan fluktuasi suhu yang tidak stabil, keretakan, dan pemisahan fase pada struktur material. Selain itu, alat TES yang digunakan menghasilkan distribusi panas yang tidak homogen karena proses perpindahan panasnya didominasi oleh mekanisme konduksi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Md. Nasiul Islam Maruf, G. Morales-Espana, J. Sijm, N. Helisto, J. Kiviluoma. 2022. "Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review." <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
- Paola Herrera, H. De la Hoz Siegler, M. Clarke. 2024. "Fatty Acids as Phase Change Materials for Building Applications: Drawbacks and Future Developments." <https://doi.org/10.3390/en17194880>
- Bhanu T. Nalla, G. Subbiah, Deepak K, S. Narayan Das, S. Kumar M, S. K. Swarnkar, N. Kaliappan, K. Priya K. 2025. "Bio-based phase change materials for thermal energy storage: Recent advance, challenges, and outlook." <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107087>
- Franklin R. Martinez, E. Borri, S. Mani Kala, S. Ushak, L. F. Cabeza. 2025. "Phase change materials for thermal energy storage in industrial applications." <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41025>
- Ying-Jie Huo, T. Yan, Shao-Fei Wu, Zi-Han Kuai, Wei-Guo Pan. 2024. "Preparation and thermal properties of palmitic acid/copper foam phase change materials." <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130629>

- Sereno Sacchet, F. Valentini, L. Fambri. 2025. "High Density Polyethylene with Phase Change Materials for Thermal Energy Management." <https://doi.org/10.20517/energymater.2024.112>
- Dominik Kaineder, C. Marschik, I. Trofin, S. Hild. 2024. "Predicting the Linear Low-Density Polyethylene Content of Custom Polypropylene Blends and Post-Consumer Materials Using Rheological Measurements." <https://doi.org/10.3390/polym16223169>
- Rahul Bidiyasar, R. Kumar, N. Jakhar. 2024. "A Critical Review of Polymer Support-Based SS-PCM for TES." <https://doi.org/10.1002/est2.639>
- Abdelwaheb Trigui, M. Abdelmouleh, C. Boudaya. 2022. "Performance Enhancement of TES using LDPE/hexadecane/SEBS Composite PCMs." <https://doi.org/10.1039/D2RA02437C>
- Mingshuo Liu, W. Yan, Z. Shi, Q. Ma, S. Wang, Y. Bao, P. Sheng, Y. Ding. 2025. "Long-Term Form-Stable PCM Based on Ionomers and Fatty Acid Eutectics." <https://doi.org/10.1002/pen.70085>
- Nurhanifa Aidy, T. Rihayat, Lindawati, Iqbal, Mahyudding. 2025. "Study of Thermal Behavior of PCM Based Fatty Acid Encapsulated PLA." <https://doi.org/10.31572/inotera.Vol10.Iss1.2025.ID450>
- Ali Ghasemi, N. Stavinski, C. M. Ferger, L. Baylon, L. Velarde, P. Alexandridis, M. Tsianou. 2026. "Dissolution of Semicrystalline Polyethylene." <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128478>
- Yuto Ishikawa, I. Shiiba, E. Kozakura, Y. Okamatsu-Ogura, R. Inatome, S. Yanagi. 2026. "Palmitic Acid Induces UCP1-Independent Mitochondrial Depolarization in Brown Adipose Tissue." <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2026.111177>
- Bo Liu, S. Wang, W. Jia, J. Xie, Z. Lu, H. Ying, Y. Sun. 2023. "The Influence of Composition Ratio on the Thermal Performance Parameters of Eutectic Phase Change Materials: Experimental Research and Theoretical Prediction," <https://doi.org/10.3390/buildings13123043>
- X.K. Yu, Y.B. Tao. 2023. "Improvement of thermal cycle stability of paraffin/expanded graphite composite phase change materials and its application in thermal management." <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107019>