

Pengaruh Jenis Material *Latent Thermal Energy Storage* pada Proses Pemasukan Energi melalui Konversi Termal Elektrik

Reza Abdu Rahman¹, Roida Camalia Hartantrie¹, Ridwan Nurdin²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, DKI Jakarta, 12640, Indonesia

² Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung Barat 40559, Indonesia
e-mail: reza.a@univpancasila.ac.id

Received 4 Agustus 2025 | Revised 2 September 2025 | Accepted 1 Juni 2026

ABSTRAK

Energi disimpan memungkinkan untuk pemanfaatan lanjutan dari sistem energi, khususnya yang menggunakan teknologi energi terbarukan. Hal ini bertujuan meminimalisir dampak intermitensi dari suplai sehingga kehandalan sistem tetap dapat terjadi. Studi ini melakukan analisis untuk thermal energy storage (TES) sebagai unit penyimpanan energi berdasarkan tipe material latent yang berbeda terhadap proses pemasukan energi dengan skenario konversi thermoelectric. Tiga jenis material diases melalui rangkaian proses dengan laju pemasukan panas sebesar 10 Watts. Asesmen awal dimulai melalui evaluasi kapasitas termal dengan scanning calorimetry, menunjukkan adanya perbedaan dari kapasitas kalor lebur dengan variasi antara 227,8–167,6 J/g dari material yang diuji. Perubahan fasa memiliki pengaruh terhadap pergeseran nilai kapasitas panas antara $9\text{--}13 \times 10^{-3} \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$. Dampak variasi tersebut terlihat berdasarkan pola pemasukan panas. Nilai laju pemasukan tertinggi dicapai pada nilai 10,02 °C/jam untuk jenis LTES wax. Jenis LTES acid dan sugar alcohol masing-masing memiliki nilai operasi pemasukan energi 8,9 °C/jam dan 7,76 °C/jam. Meskipun demikian, capaian rasio konversi maksimal dapat diperoleh oleh jenis LTES sugar alcohol dengan nilai 94,8%. Hal tersebut memperlihatkan proses konversi thermoelectric dapat menjadi lebih optimal berdasarkan jenis material LTES yang digunakan karena adanya pengaruh pola perubahan fasa dan juga kapasitas termal.

Kata kunci: TES, Perubahan fasa, kalor lebur, panas spesifik, charging

ABSTRACT

Energy storage allows for the continued utilization of energy systems, especially renewable energy. It minimizes the impact of intermittency supply and maintain system reliability. This study conducted an analysis for thermal energy storage (TES) using different types of latent materials and its relation of charging process with electric thermal conversion. Three types of materials are assessed through with input rate of 10 Watts. The initial assessment starts with evaluation of thermal capacity by using calorimetry, showing differences in the melting heat capacity with between 227.8 - 167.6 J/g of the tested materials. Phase changes have an effect on the shift in heat capacity values between $9 - 13 \times 10^{-3} \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$. The impact of these variations is seen based on the heat input pattern. The highest input rate value is achieved at 10.02 °C/hour for the LTES wax type. The acid and sugar alcohol LTES have operating energy input values of 8.9 °C/h and 7.76 °C/h, respectively. However, the sugar alcohol LTES type achieved a maximum conversion ratio of 94.8%. This demonstrates that the thermal-electric conversion process can be optimized based on the type of LTES material used due to the influence of phase change patterns and thermal capacity.

Keywords: TES, phase change, melting enthalpy, specific heat, charging

1. Pendahuluan

Teknologi berkembang dengan sangat signifikan untuk mengatasi beragam tantangan kehidupan dan juga sebagai indikasi kemajuan dari peradaban maju. Usaha tersebut banyak dilakukan untuk mengembangkan proses produksi melalui rekayasa manufaktur [1] dan juga proses pemanfaatan ragam sumber energi yang lebih bervariasi [2]. Pemanfaatan energi dijadikan sebagai prioritas utama terkait dengan tuntutan untuk transisi ke sumber energi yang lebih bersih dan melepaskan ketergantungan dari sumber tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil [3]–[5]. Energi bersih umumnya diasosiasikan melalui pemanfaatan energi angin dan juga matahari untuk proses pembangkitan listrik [6]–[8].

Ketersediaan yang melimpah dari sumber energi bersih dengan indikasi jejak karbon yang lebih sedikit menjadi motivasi utama untuk memberikan fungsi pemakaian yang lebih maksimal. Tantangan terjadi ketika menghadapi sifat intermiten dari sumber tersebut karena adanya pola siklus alam dan pergantian waktu [9]. Upaya untuk mengatasi tantangan tersebut dilakukan melalui berbagai macam cara seperti peningkatan proses konversi dari unit maupun penerapan unit penyimpanan energi [10]–[12]. Penyimpanan energi umumnya dilakukan dalam bentuk listrik menggunakan baterai. Permasalahannya adalah biaya baterai yang relatif mahal dengan usia pakai yang relatif sebentar. Peneliti mengembangkan berbagai opsi tambahan untuk memungkinkan penyimpanan energi, misalnya dalam bentuk energi termal menggunakan *thermal energy storage* (TES).

Kebutuhan energi termal secara prinsip banyak ditemui pada dunia industri yang banyak melibatkan kebutuhan termal. D. Liu dkk memanfaatkan skenario *waste heat recovery* (WCR) dari *flue gas* industri menggunakan unit TES [13]. Optimasi yang dilakukan fokus pada aspek desain unit dari alat penukar kalor tipe *shell and tube* untuk penyimpanan material *latent* TES (LTES). Studi tersebut memperlihatkan kenaikan rasio durasi peleburan LTES pada model desain yang optimal hingga 66,8%. N. Georgousis dkk fokus untuk WCR dari unit *kiln* menggunakan kombinasi TES dengan alat penukar kalor spesifik [14]. Model terbaik dari skenario kombinasi yang ditawarkan dapat memberikan nilai pemanfaatan energi terbuang secara maksimal dengan nilai 15,8 GJ. S. Sokakini dkk melakukan penguatan dari model operasi LTES melalui penyesuaian fluida kerja selama operasional sistem [15]. Hasil studi menunjukkan adanya penurunan durasi peleburan dan pemadatan sebesar 24,5% dan 45,5% yang menguatkan peran modifikasi untuk meningkatkan fungsi perpindahan energi.

Sistem TES juga berguna untuk keperluan termal pada aplikasi agrobisnis yang umumnya dibutuhkan untuk keperluan pengeringan. S. Madhankumar dkk menggunakan LTES jenis *lauric acid* untuk dijadikan sebagai media TES dalam proses pengeringan [16]. Evaluasi memperlihatkan kenaikan efisiensi dari sistem ketika menggunakan LTES dengan indikasi nilai 35,7%. A. Joseph dkk mengembangkan sistem pengeringan lebih kompleks yang mengkombinasikan dengan kolektor surya dan LTES [17]. Kombinasi sistem yang baik dapat meningkatkan pemakaian energi untuk proses pengeringan yang naik menjadi 48,6% dibandingkan dengan model konvensional, khususnya tanpa LTES. Analisis operasional dari proses pengeringan dengan LTES dilakukan oleh I. Wolde dkk [18] dimana terdapat faktor penting untuk memaksimalkan operasional sistem dengan potensi penurunan biaya sebesar 40,5% dengan menggunakan konfigurasi yang sesuai. Konfigurasi tersebut dikhususkan untuk pertimbangan dari sisi LTES.

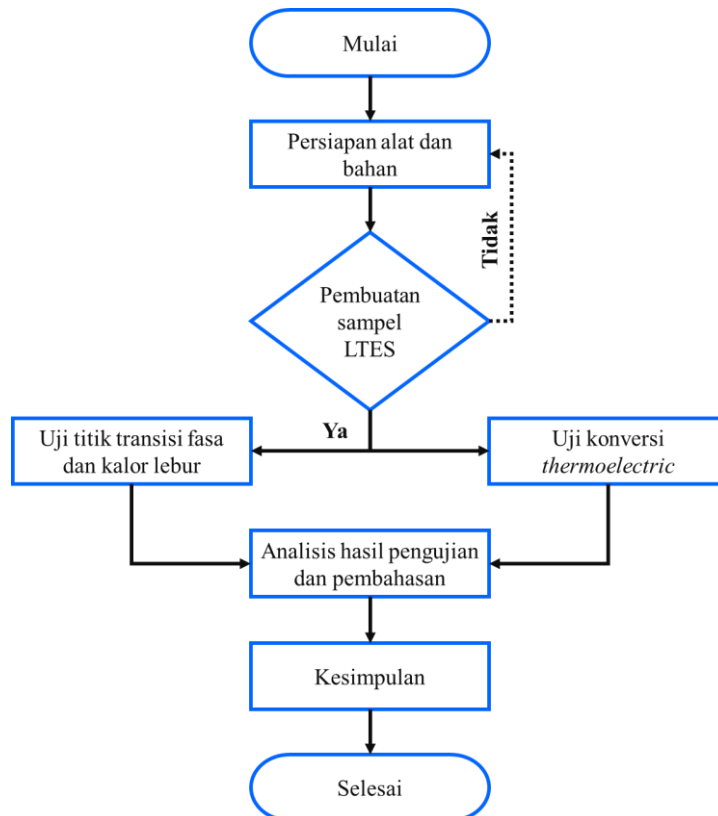
LTES beroperasi dengan memasukan panas ke material yang digunakan. Terdapat beberapa kelompok material yang umumnya digunakan seperti jenis *wax* [19], *fatty acid* [20], *salt* [21] dan *sugar alcohol* [22]. Proses pemasukan energi dilakukan melalui konveksi paksa menggunakan fluida kerja sehingga terjadi perpindahan panas. Pengembangan yang lebih baik dapat dijadikan sebagai opsi dari sistem operasi melalui pemanfaatan *thermoelectric* [23]. Unit ini memungkinkan konversi listrik menjadi panas. Panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk keperluan pengisian dari LTES. Konversi *thermoelectric* dalam hal ini menggunakan elemen pemanas

(*electric heater*) telah mencapai taraf komersial dengan efisiensi sistem yang tinggi [24]. Hal tersebut karena proses konversi dari energi listrik menjadi panas melalui prinsip *resistive heating*. Kombinasi sistem *thermoelectric* dengan pemanas tenaga matahari mampu mencapai taraf operasional dan efisiensi yang lebih baik berdasarkan prinsip operasi gabungan [25]. Hal ini membawa peluang tersendiri bagi penerapan konsep tersebut untuk operasi dari LTES. Tantangannya adalah jenis LTES memungkinkan adanya pengaruh khusus pada proses konversi tersebut. Panas yang masuk dapat terganggu karena adanya proses peleburan dari material LTES ketika tahap pemasukan energi. Sehingga, perlu dilakukan studi spesifik untuk melakukan asesmen dari jenis LTES dan pengaruhnya terhadap sifat operasi dan proses konversi.

2. Bahan dan Metodologi

2.1. Diagram Proses Penelitian

Gambar 1 menyajikan detail dari tahapan penelitian pada studi ini. Proses mendasar dilakukan pada tahapan penyiapan alat dan bahan yang dilanjutkan dengan pembuatan sampel. Kriteria sampel yang sesuai diproses lebih lanjut untuk uji transisi fasa dan konversi *thermoelectric*. Hasil yang diperoleh kemudian disajikan serta dianalisis dan dibahas sehingga dapat dibuat menjadi kesimpulan yang utuh.



Gambar 1. Tahapan proses penelitian

2.2. Alat, Bahan dan Penyiapan Sampel

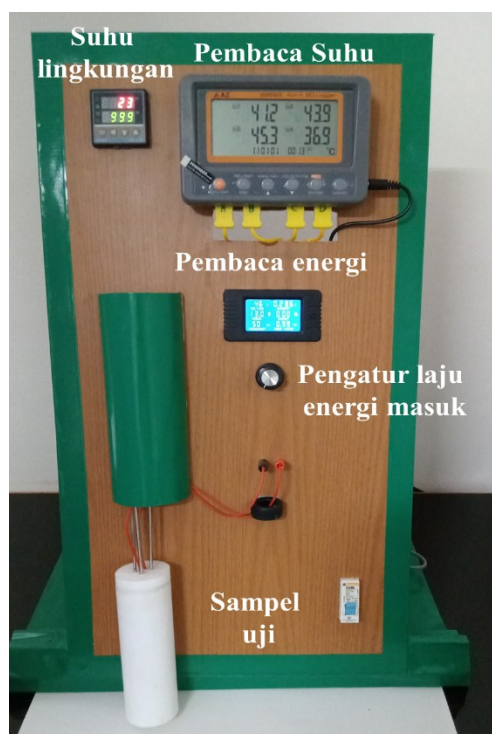
Studi ini menggunakan tiga jenis LTES yakni *xylitol* dari grup *sugar alcohol* (LTES₁), *palmitic acid* dari grup *fatty acid* (LTES₂) dan parafin dari grup *wax* (LTES₃). Tiga jenis LTES tersebut diperoleh pada tingkat komersial tanpa ada modifikasi apapun. Bahan tersebut kemudian dilebur menggunakan *heating pan* pada kisaran suhu 120 °C untuk LTES₁ dan 80 °C untuk LTES₂ dan LTES₃. Sampel dibiarkan pada suhu ruang hingga suhu turun pada 30 °C untuk kemudian diamati dari potensi penggumpalan maupun terbakar. Setelah sampel dinyatakan sesuai, sampel kembali dicairkan kemudian dituangkan pada tabung ukur yang terbuat dari bahan PTFE. Sebagian kecil sampel diambil untuk proses pengujian titik transisi fasa dan kalor lebur menggunakan teknik *calorimetry*. Tabel 1 merangkum detail dari bahan dan alat yang digunakan.

Tabel 1. Rangkuman alat dan bahan

Bahan	
<i>Xylitol</i> (bubuk)	Kelas komersial
<i>Palmitic acid</i> (bubuk)	Kelas komersial
Parafin wax (padatan)	Kelas komersial
Alat	
<i>Heating pan</i>	Maksimal 380 °C jenis SH-2
<i>Differential scanning calorimetry</i> (DSC)	Mettler Toledo (MT+1)
<i>Multilogger temperature</i>	Umum, empat saluran
<i>AC power regulator</i>	Umum, maksimal 2000 Watts
Elemen pemanas	350 Watts, tipe <i>tubular</i>
<i>Power reader</i>	Tegangan AC

2.3. Pengujian Konversi *Thermoelectric*

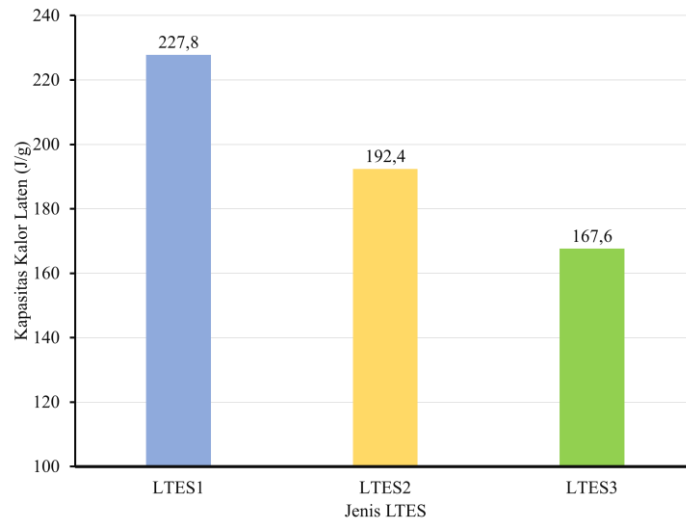
Sistem TES sangat bergantung terhadap aspek kapasitas termal yang ditentukan berdasarkan kapasitas panas spesifik dari material, baik pada fasa padat dan cair, serta total kalor laten yang dapat diserap selama proses perubahan fasa. Parameter tersebut dapat diperoleh melalui proses karakterisasi menggunakan DSC. Nilai dasar tersebut kemudian dijadikan sebagai referensi untuk menentukan tingkat efektifitas perpindahan energi melalui skenario *thermoelectric* [26].

**Gambar 2.** Media karakterisasi konversi thermoelectric LTES

Evaluasi konversi *thermoelectric* dilakukan dengan prinsip *hybrid energy temperature method* (HETM) [26]. Proses ini dilakukan menggunakan rangkaian unit alat yang disajikan pada Gambar 1. Sampel cair dimasukkan ke dalam tabung uji. Pada saat tersebut, elemen pemanas (*tubular*) ditempatkan di dalam tabung uji pada posisi yang sesuai. Empat termometer langsung bersentuhan dengan sampel uji. Sampel dibiarkan dingin hingga mencapai suhu ruang. Kemudian, evaluasi dilakukan dengan menyuplai energi listrik ke elemen pemanas pada nilai 10 Watts. Fungsi tersebut dilakukan dengan bantuan *power regulator*. Kenaikan suhu dan energi yang masuk direkam oleh sistem. Perubahan suhu dari sampel yang diuji dan nilai energi yang masuk dapat teramati dengan baik sehingga pengaruh spesifik dari jenis material dapat terlihat dengan lebih jelas. Batas atas suhu material yang diuji adalah 120 °C.

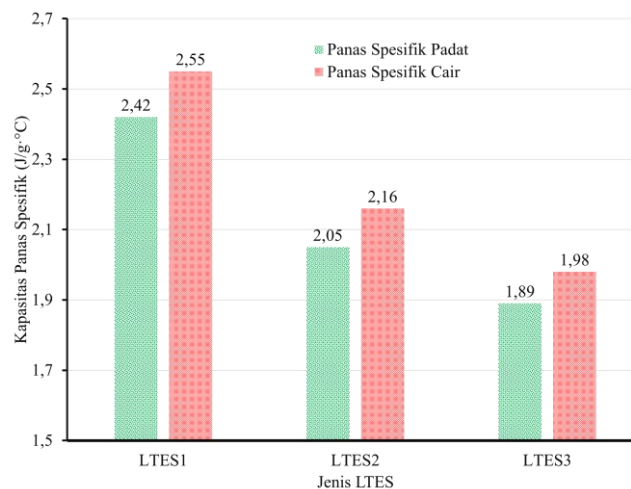
3. Hasil dan Pembahasan

Penggunaan TES sangat bergantung pada besarnya kapasitas kalor lebur laten dari material yang digunakan. Indikator ini yang menjadi justifikasi terpenting dalam evaluasi dasar untuk penggunaan LTES pada sistem operasi TES. Perbandingan kapasitas kalor lebur tiga jenis LTES dari grup yang berbeda disajikan pada Gambar 3. Masing-masing LTES menunjukkan indikasi nilai yang berbeda sebagai dampak dari perbedaan material pembentuknya. Perbedaan ini yang menjadi justifikasi awal dalam membentuk kelompok LTES yang biasanya dikategorikan dalam kelompok *wax*, *fatty acid*, *inorganic salt*, dan *sugar alcohol*. Modifikasi dan pencampuran mungkin dilakukan dengan pertimbangan spesifik tertentu dan juga perhatian pada indikasi pembentukan campuran eutektik.



Gambar 3. Kapasitas kalor laten lebur dari LTES yang dievaluasi

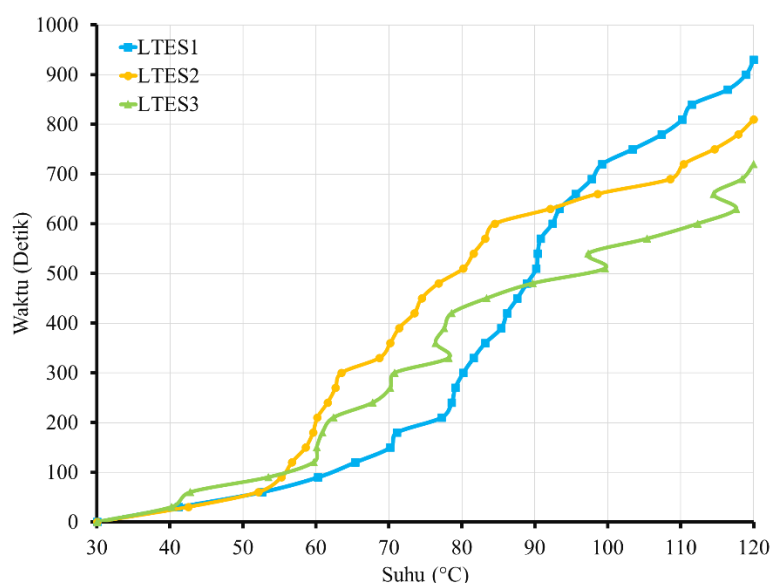
Gambar 3 memperlihatkan variasi nilai kalor laten dari tiga jenis LTES. LTES₁ merupakan jenis *sugar alcohol* yang menggunakan tipe *xylitol*. Capaian tertinggi diperoleh untuk LTES tersebut dengan nilai kapasitas kalor lebur hingga 227,8 J/g. Nilai kapasitas turun ketika menggunakan jenis *fatty acid* untuk LTES₂ dengan tipe *palmitic acid*. Penurunan ini juga didasari pada pertimbangan densitas yang lebih rendah sehingga total kepadatan energi sistem juga akan turun. Capaian kalor lebur untuk LTES₂ hanya sebesar 192,4 J/g. Evaluasi untuk LTES₃ menggunakan jenis *wax* dengan tipe parafin. Jenis ini umum digunakan pada beberapa aplikasi TES, namun sayangnya indikasi kapasitas termal untuk jenis ini paling rendah dibandingkan dengan LTES₂ dan LTES₁ dengan nilai kalor lebur hanya 167,6 J/g.



Gambar 4. Perbandingan nilai panas spesifik dari LTES pada fasa padat dan cair

Proses pemasukan energi untuk TES selalu diawali pada kondisi material dalam fasa padat. Kondisi tersebut yang menjadi indikator penting untuk menentukan nilai panas spesifik dari material pada fasa padat. Ketika sudah mencair, proses pemanasan umumnya masih berlanjut, sehingga nilai kapasitas panas spesifik pada fasa cair juga harus diperoleh. Tiga elemen tersebut (panas spesifik padat, cair dan kalor lebur) menjadi indikator penentuan nilai energi total yang mungkin dapat masuk ke material berdasarkan rentang operasi spesifik yang ditentukan (batasan suhu bawah dan atas dari sistem). Perhatian khusus perlu diberikan karena berdasarkan Gambar 4 terjadi variasi nilai panas spesifik seiring dengan berubahnya fasa material tersebut. Perubahan ini menjadi bukti penting dari kebanyakan material TES, khususnya untuk LTES, yang memiliki variasi nilai panas spesifik seiring dengan berubahnya fasa dan kenaikan suhu dari material.

Pola seluruh LTES memperlihatkan kenaikan nilai kapasitas panas ketika sudah memasuki fasa cair. Kondisi tersebut mengindikasikan semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu dari material ketika sudah memasuki fasa cair. Nilai kapasitas panas tertinggi diperoleh untuk LTES₁ yang memiliki nilai $2,44 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ pada fasa padat dan naik menjadi $2,55 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ untuk fasa cair. LTES₂ memiliki nilai $2,05 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ untuk fasa awal (padat) dan kembali meningkat hingga $2,16 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ketika sudah menjadi fasa cair. Terakhir untuk LTES₃ nilai panas spesifik padat adalah $1,89 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ yang kemudian naik menjadi $1,98 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ketika sudah masuk ke fasa cair. Masing-masing LTES umumnya memiliki nilai variasi yang tidak terlalu berbeda, namun perlu dipertimbangkan secara khusus untuk memungkinkan operasional yang lebih baik dari proses operasi TES.



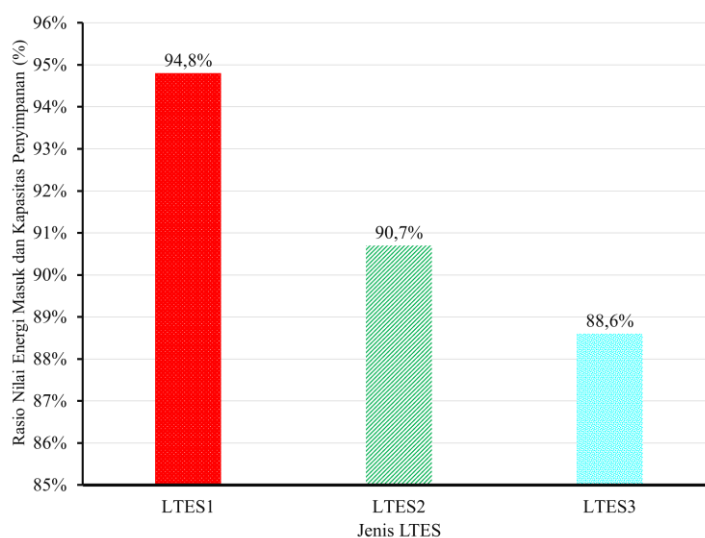
Gambar 5. Kurva operasi proses *charging* untuk LTES dengan laju input konstan

Gambar 5 memperlihatkan pola operasi pemasukan energi untuk tiap LTES yang dibentuk dalam hubungan suhu terhadap waktu. Untuk LTES₁, kenaikan suhu yang relatif landai pada kondisi awal menunjukkan operasi sepenuhnya dipengaruhi oleh sifat sensibel dari LTES tersebut, yang terlihat jelas antara suhu $30\text{--}71,1^\circ\text{C}$. Proses pemasukan panas konstan melalui prinsip konversi *thermoelectric* memperlihatkan pembacaan nilai yang lebih spesifik, khususnya ketika terjadi pada area perubahan fasa dengan indikasi perlambatan kenaikan suhu mulai dari $71,1^\circ\text{C}$ hingga $92,2^\circ\text{C}$. Wilayah tersebut merupakan area transisi dari padat ke cair untuk LTES₁. Pemanasan berlanjut dan mulai menunjukkan pola kenaikan yang identik pada area awal karena sifat sensibel material dalam fasa cair telah mendominasi proses ini.

Penggunaan jenis LTES berbeda memberikan bentuk profil pemasukan energi yang bervariasi berdasarkan pola yang terlihat pada Gambar 5. Wilayah sensibel padat terjadi pada rentang yang

lebih pendek untuk LTES₂ dibandingkan dengan LTES₃ dengan titik puncak pada kisaran 60,1 °C. Selanjutnya, pola kenaikan memperlihatkan dua area kenaikan suhu yang relatif lambat antara 60,1 °C hingga 63,5 °C dan 68,7 °C hingga 84,5 °C. Pemisahan dua area tersebut umumnya terjadi karena adanya proses peleburan dari LTES₂, menandakan aspek ini menjadi indikasi penting dalam penentuan tipe yang sesuai untuk pertimbangan pemakaian di TES unit. Selanjutnya profil kenaikan suhu menandakan kenaikan yang relatif konstan sebagai indikasi LTES₂ telah memasuki wilayah fasa cair selama proses pemasukan energi tersebut.

Kurva *charging* untuk LTES₃ menunjukkan profil yang relatif tidak stabil dibandingkan LTES₁ dan LTES₂. Justifikasi ini terlihat berdasarkan pola kenaikan suhu yang disajikan pada Gambar 5. Indikasi wilayah sensibel padat terjadi pada waktu yang sangat singkat, dilanjutkan untuk area transisi yang umumnya mengalami fluktuasi. Wilayah sensibel cair sendiri cenderung sulit diamati karena adanya variasi perubahan suhu, khususnya ketika di atas 110 °C. Pola ini menjadikan catatan penting dalam penggunaan *wax* untuk operasi TES unit karena kenaikan suhu yang terlalu tidak stabil dapat berdampak pada efektifitas pemasukan energi.

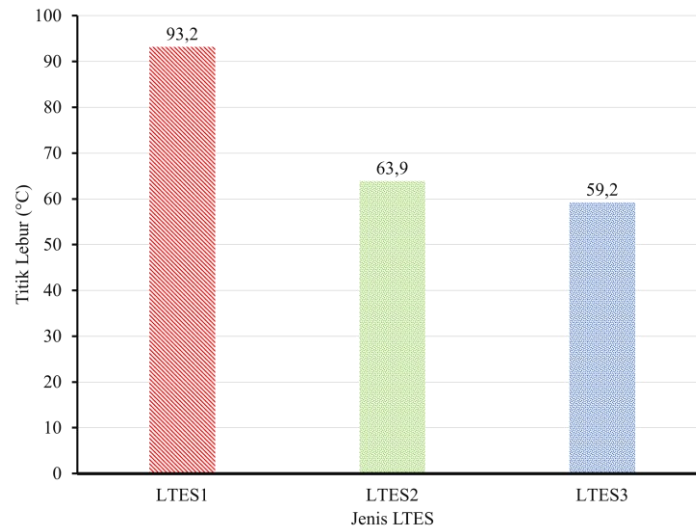


Gambar 6. Perbandingan rasio input energi terhadap kapasitas penyimpanan

Pengaruh jenis LTES yang digunakan terhadap metode thermoelectric untuk proses pemasukan panas berdampak signifikan terhadap rasio pemasukan energi dan kapasitas yang dapat diakomodir oleh LTES. Terlihat pada Gambar 6, indikasi pemasukan energi di bawah 100% karena adanya kerugian selama proses konversi terjadi. Penggunaan jenis LTES₁ memberikan dampak positif terhadap pencapaian rasio konversi optimal, dengan nilai hingga 94,8%. Namun demikian, penggunaan LTES₂ dan LTES₃ membawa dampak kurang maksimal pada proses konversi karena kedua jenis LTES memiliki rasio konversi hanya sebesar 90,7% dan 88,6%. Aspek ini sangat berhubungan dengan pola pemasukan energi dari seluruh material yang dievaluasi, memberikan indikasi penting bahwa proses pemasukan yang stabil membawa dampak pada rasio input yang lebih optimal sehingga indikasi kerugian proses dapat dibuat menjadi lebih rendah.

Gambar 7 memperlihatkan perbandingan titik lebur antar jenis LTES yang digunakan. LTES₁ memiliki titik lebur tertinggi yang mengakibatkan area sensibel padat pada kurva *charging* menjadi lebih panjang dan teramati dengan jelas tanpa menunjukkan adanya penurunan kalor. Kondisi yang relatif identik terkait sifat stabil pemasukan panas juga dicapai untuk LTES₂ dengan titik lebur di kisaran 63,9 °C. Catatan khusus diberikan untuk LTES₃ yang memiliki titik lebur paling rendah. Kondisi ini juga mempengaruhi proses transformasi fasa selama pemasukan panas yang teramati pada kurva *charging* (Gambar 5) yang menandakan penurunan suhu meskipun adanya kalor yang masuk. Kondisi ini terjadi karena sifat peleburan yang buruk dari parafin [27]

sehingga mempengaruhi distribusi energi selama proses pemasukan kalor. Faktor tersebut juga yang menyebabkan pentingnya stabilisasi fasa agar menjamin proses pemasukan kalor tetap optimal [28].



Gambar 7. Perbandingan titik lebur antar LTES

Proses konversi *thermoelectric* untuk LTES sangat dipengaruhi oleh sifat dasar dari material yang digunakan. Kondisi ini yang mengakibatkan sistem mengalami perbedaan durasi *charging* meskipun operasional laju pemasukan kalor pada nilai yang sama. Faktor dari segi sifat termal dan juga mekanisme peleburan yang dialami oleh material tersebut termasuk pada faktor penting untuk dipertimbangkan dalam mencapai fungsi konversi yang optimal. Dengan demikian, proses konversi *thermoelectric* akan lebih baik untuk digunakan pada material yang memiliki sifat termal yang sesuai dengan pola peleburan yang baik, menghasilkan nilai rasio konversi terbaik sebagaimana tercapai untuk LTES₁.

4. Kesimpulan

Evaluasi jenis LTES terhadap proses konversi *thermoelectric* memperlihatkan pengaruh yang signifikan terhadap jenis material dan kapasitas penyerapan energi. Penggunaan tiga jenis LTES memberikan gambaran jelas bahwa mekanisme perubahan fasa dan stabilitas yang baik akan memberikan pengaruh positif terhadap rasio pemasukan energi pada sistem. Indikasi operasional yang baik untuk jenis *xylitol* memungkinkan rasio pemasukan energi efektif mencapai 94,8%. Hal ini tercapai karena kurva operasi juga memperlihatkan transisi yang identik lebih stabil pada proses pemasukan panas. Sebaliknya, perubahan fasa yang tidak efektif mengganggu pemasukan energi dari unit pemanas dan berdampak pada penurunan nilai pemasukan energi yang menjadi hanya 88,6%. Variasi jenis LTES juga menunjukkan adanya perbedaan kapasitas termal yang direpresentasikan dalam bentuk nilai kalor lebur dan kapasitas panas spesifik. Secara khusus, panas spesifik juga dipengaruhi oleh perubahan suhu sehingga adanya perubahan kontinu yang mungkin terjadi selama proses pemasukan energi. Secara prinsip, studi ini menunjukkan penggunaan *sugar alcohol* tipe *xylitol* menunjukkan operasional yang lebih baik sebagai TES dibandingkan dengan jenis *fatty acid* dan *wax* berdasarkan rasio konversi energi.

Daftar Pustaka

- [1] A. Sciacovelli *et al.*, “High density polyethylene (HDPE) — Graphite composite manufactured by extrusion: A novel way to fabricate phase change materials for thermal energy storage,” *Particuology*, vol. 40, pp. 131–140, 2018.
- [2] X. Zhang, X. Zhang, S. Ge, and B. Zhang, “Multi-criteria decision analysis and experimental study on heat pipe thermoelectric generator for waste heat recovery,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, no. July, p. 123930, 2024.

- [3] S. M. Vahidhosseini, S. Rashidi, S. H. Hsu, W. M. Yan, and A. Rashidi, "Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand reduction: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 95, no. April, p. 112568, 2024.
- [4] M. Abdollahimoghadam and M. Rahimi, "New hybrid nano- and bio-based phase change material containing graphene-copper particles hosting beeswax-coconut oil for solar thermal energy storage: Predictive modeling and evaluation using machine learning," *Energy*, vol. 307, no. July, p. 132604, 2024.
- [5] B. M. Suyitno, Ismail, and R. A. Rahman, "Improving the performance of a small-scale cascade latent heat storage system by using gradual melting temperature storage tank," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, no. October 2022, p. 103034, 2023.
- [6] R. A. Rahman, S. Sulisty, M. S. K. T. S. Utomo, D. Ragil, and B. M. Suyitno, "Experimental evaluation on the power characteristic of direct-photovoltaic charging for thermal storage equipment," *Mechanical Engineering for Society and Industry*, vol. 4, no. 1, pp. 115–122, 2024.
- [7] D. L. Zariatn and A. Suwandi, "Advanced Design of a Small-Scale Mini Gerotor Pump in a High-Temperature and High-Viscosity Fluid Thermal System," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 8(121), pp. 30–39, 2023.
- [8] J. C. A. Ham *et al.*, "A multi-scale analysis on electrohydrodynamic drying technology for bio-based & food products," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 151, no. May, p. 104634, 2024.
- [9] W. Wang, C. Li, X. Zeng, J. Chen, and R. Sun, "Application of polymer-based phase change materials in thermal safety management of power batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, no. PC, p. 105646, 2022.
- [10] G. Hekimoğlu, A. Sari, O. Gencel, V. V. Tyagi, and R. K. Sharma, "Activated carbon/expanded graphite hybrid structure for development of nonadecane based composite PCM with excellent shape stability, enhanced thermal conductivity and heat charging-discharging performance," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 44, no. June, 2023.
- [11] T. Weber, A. Blakers, D. Firnando Silalahi, K. Catchpole, and A. Nadolny, "Grids dominated by solar and pumped hydro in wind-constrained sunbelt countries," *Energy Conversion and Management*, vol. 308, no. April, p. 118354, 2024.
- [12] U.S. Department of Energy, "Technology Strategy Assessment - Findings from Storage Innovations 2030 - Thermal Energy Storage," 2023.
- [13] D. Liu, J. Shen, J. Li, H. Zheng, Y. Zhang, and X. Chen, "Performance analysis and structural optimization of shell and tube phase change thermal storage devices based on industrial flue gas waste heat recovery," *Journal of Energy Storage*, vol. 131, no. PB, p. 117576, 2025.
- [14] N. Georgousis, J. Diriken, M. Speetjens, and C. Rindt, "System configurations for shuttle kiln waste heat recovery: comparing and combining a packed-bed thermal storage system and a heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, vol. 278, no. PA, p. 127124, 2025.
- [15] S. Sokakini, J. V. Simo Tala, L. Nadau, A. Ilinca, and D. Bougeard, "Heat transfer enhancement in shell and tube Latent Heat Thermal Energy Storage units for waste heat recovery applications: A 3D numerical study on melting–solidification kinetics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 274, no. PB, p. 126564, 2025.
- [16] S. Madhankumar, V. R. Lenin, V. Suresh Kannan, A. Khalatkar, A. K. Singh, and N. V. S. S. Chinamilli, "Exergy and environmental impact assessment of forced convection indirect solar drying system with Lauric acid thermal energy storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 131, no. PB, p. 117599, 2025.
- [17] A. Joseph, S. Ataya, M. Ismail, and S. W. Sharshir, "Innovative system for enhancing tomato drying performance using evacuated tube solar collectors, thermal storage materials, and reflectors," *Solar Energy*, vol. 299, no. July, p. 113745, 2025.
- [18] I. Wolde, I. Calderón-vásquez, M. Molina, N. Pailahueque, and J. M. Cardemil, "Parametric analysis of a modular solar drying and packed bed thermal energy storage

- system,” *Solar Energy*, vol. 300, no. July, p. 113764, 2025.
- [19] C. Liu *et al.*, “Polymer engineering in phase change thermal storage materials,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, no. January, p. 113814, 2023.
 - [20] B. Brahma, A. K. Shukla, and D. C. Baruah, “Design and performance analysis of solar air heater with phase change materials,” *Journal of Energy Storage*, vol. 61, no. September 2022, p. 106809, 2023.
 - [21] M. A. Orozco, K. Acurio, F. Vásquez-Aza, J. Martínez-Gómez, and A. Chico-Proano, “Thermal storage of nitrate salts as phase change materials (PCMs),” *Materials*, vol. 14, no. 23, 2021.
 - [22] S. Tomassetti *et al.*, “A review on thermophysical properties and thermal stability of sugar alcohols as phase change materials,” *Journal of Energy Storage*, vol. 55, no. PB, p. 105456, 2022.
 - [23] R. Y. Nuwayhid, M. S. Rahal, Y. Z. Makarem, and R. R. Achkar, “Thermal analysis of photovoltaic-thermoelectric hybrids,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 1149–1163, 2024.
 - [24] H. Bastida, I. De la Cruz-Loredo, P. Saikia, and C. E. Ugalde-Loo, “Discrete-time state-of-charge estimator for latent heat thermal energy storage units based on a recurrent neural network,” *Applied Energy*, vol. 371, no. April, p. 123526, 2024.
 - [25] R. Jiang, X. Zhi, G. Qian, Z. Li, and X. Yu, “Design and techno-economic analysis of a thermal battery for residential hot water supply under different charging modes,” *Journal of Energy Storage*, vol. 94, no. November 2023, p. 112578, 2024.
 - [26] L. Ode, M. Firman, D. Rahmalina, and R. A. Rahman, “Hybrid energy-temperature method (HETM): A low-cost apparatus and reliable method for estimating the thermal capacity of solid – liquid phase change material for heat storage system,” *HardwareX*, vol. 16, no. December, p. e00496, 2023.
 - [27] D. Rahmalina, A. R. Zada, H. Soefihandini, Ismail, and B. M. Suyitno, “Analysis of the Thermal Characteristics of the Paraffin Wax/High-Density Polyethylene (Hdpe) Composite As a Form-Stable Phase Change Material (Fspcm) for Thermal Energy Storage,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 6(121), pp. 6–15, 2023.
 - [28] T. Al-Gunaid *et al.*, “Phase change materials designed from Tetra Pak waste and paraffin wax as unique thermal energy storage systems,” *Journal of Energy Storage*, vol. 64, no. February, 2023.