



INVESTIGASI PENGARUH PIPA PARAFFIN TERHADAP APLIKASI *THERMAL STORAGE*

Muhammad Yunus^{1*} dan Raka Andrew Rachmanto²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan

E-mail : dosen03077@unpam.ac.id

Masuk : 20 Agustus 2025

Direvisi : 22 September 2025

Disetujui : 29 September 2025

Abstrak: Panel fotovoltaik surya memiliki peran yang sangat besar dalam pengembangan pembangkit energi terbarukan. Namun, hingga saat ini, perkembangan teknologi fotovoltaik hanya mampu mencapai efisiensi tertinggi sekitar 15–20%. Selain itu, bagian dari penyinaran yang tidak dikonversi menjadi listrik meningkatkan suhu panel fotovoltaik dan efisiensinya menurun seiring dengan peningkatan suhu. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian lebih lanjut mengenai penggunaan *phase change material* (PCM) dalam sistem penyerapan panas. Konfigurasi sistem penyerap panas terdiri dari pipa tembaga sebagai tempat paraffin dan air yang dipanaskan yang mengalir dalam tabung akrilik. Dalam penelitian ini divariasikan debit air 1,5 lpm dan 3 lpm serta jumlah lekukan pipa. Dalam penelitian ini akan diperoleh data untuk mengetahui proses perubahan temperatur dan *freezing* pada paraffin, perubahan fasa *melting* paraffin, serta mengetahui perbandingan temperatur masukan (T_{input}) dan temperatur keluaran (T_{output}) air. Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimen. Dari hasil penelitian eksperimen, pengaruh bentuk pipa penyimpanan paraffin dengan peningkatan aliran debit menghasilkan kenaikan durasi dari keadaan padat hingga paraffin mengalami keadaan *melting* di pipa bentuk 2, 3, dan 4 siku, yaitu diperoleh waktu sebesar 70 detik, 90 detik, dan 130 detik.

Kata kunci: *Thermal Energy Storage (TES)*, Paraffin, *Phase Change Materials (PCM)*.

Abstract: Solar photovoltaic panels play a significant role in the development of renewable power generation. However, current photovoltaic technology has only achieved a maximum efficiency of approximately 15–20%. In addition, the portion of irradiance that is not converted into electricity increases the temperature of the photovoltaic panel, causing its efficiency to decline as the temperature rises. This study conducts a further investigation of the use of phase change materials (PCM) in heat absorption systems. The heat absorber system configuration consists of copper pipes used to contain paraffin, as well as heated water flowing through an acrylic tube. In this study, the water flow rates were varied at 1.5 lpm and 3 lpm, along with the number of pipe bends. The study aims to examine the temperature variation and freezing process of paraffin, the phase change during paraffin melting, and the comparison between the inlet and outlet temperatures of the water. The research method employed is experimental. The experimental results show that the geometry of the paraffin storage pipe, combined with an increase in flow rate, leads to an extended duration from the solid state until the paraffin reaches the melting phase. For pipes with 2, 3, and 4 bends, the melting onset times obtained were 70 seconds, 90 seconds, and 130 seconds, respectively.

Keywords: *Thermal Energy Storage (TES)*, Paraffin, *Phase Change Materials (PCM)*.

PENDAHULUAN

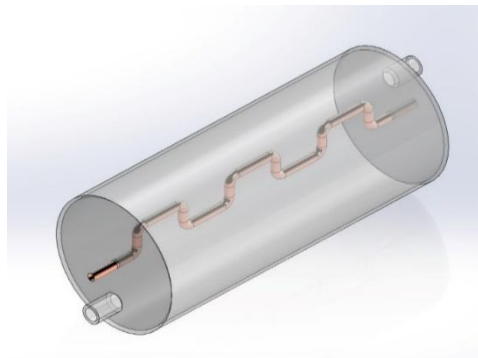
Pemanfaatan teknologi *Thermal Energy Storage* (TES) semakin penting dalam berbagai aplikasi yang membutuhkan stabilisasi temperatur dan peningkatan efisiensi termal, seperti sistem pemanas–pendingin, penyimpanan energi terbarukan, serta proses industri bersuhu menengah [1], [2]. Salah satu teknologi TES yang banyak dikembangkan adalah penyimpanan panas laten (*latent heat storage*) menggunakan *phase change materials* (PCM) [3]. Keunggulan PCM terletak pada kemampuannya menyerap dan melepas energi dalam jumlah besar pada kisaran temperatur transisi fase, sehingga memungkinkan penyimpanan panas yang lebih kompak dan efisien. Di antara berbagai jenis PCM, paraffin menjadi salah satu kandidat utama karena kestabilan kimia, sifat tidak korosif, keamanan tinggi, serta temperatur leleh yang sesuai untuk berbagai aplikasi rekayasa [4].

Meskipun paraffin memiliki potensi besar sebagai media penyimpanan panas, konduktivitas termalnya yang relatif rendah menjadi kendala utama dalam penerapan skala besar. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan laju transfer panas pada PCM, seperti penambahan material berkonduktivitas tinggi, penggunaan *fin*, hingga integrasi struktur pipa di dalam media PCM [5]–[7]. Salah satu strategi yang semakin menarik perhatian adalah penggunaan pipa paraffin atau pipa berisi PCM yang disusun dalam konfigurasi tertentu untuk meningkatkan distribusi panas serta mempercepat proses pelelehan dan pembekuan. Integrasi pipa ini berpotensi menghasilkan jalur konduksi yang lebih efektif sehingga meningkatkan respons termal sistem TES [4], [8].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konfigurasi geometris, jumlah pipa, material pipa, serta posisi relatif terhadap fluida kerja sangat memengaruhi kinerja *thermal storage*. Namun, kajian yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh pipa paraffin terhadap efisiensi penyimpanan panas, kestabilan termal, dan dinamika fase PCM masih terbatas [9]. Selain itu, masih terdapat celah penelitian terkait bagaimana desain pipa dapat dioptimalkan untuk meningkatkan keseimbangan antara kapasitas penyimpanan panas dan kecepatan perpindahan panas. Dengan demikian, studi lebih lanjut diperlukan untuk memahami peran pipa paraffin sebagai elemen struktural sekaligus media penyimpanan panas dalam sistem TES [6], [10].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penggunaan pipa paraffin terhadap karakteristik kinerja *thermal storage*, termasuk proses pelelehan, pembekuan, distribusi temperatur, serta kapasitas penyimpanan energi. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting bagi pengembangan desain TES berbasis PCM yang lebih efisien dan aplikatif. Selain itu, hasilnya juga dapat menjadi referensi untuk pengembangan sistem penyimpanan panas pada aplikasi energi terbarukan, sistem pendingin industri, dan teknologi pemanfaatan energi buangan.

METODOLOGI



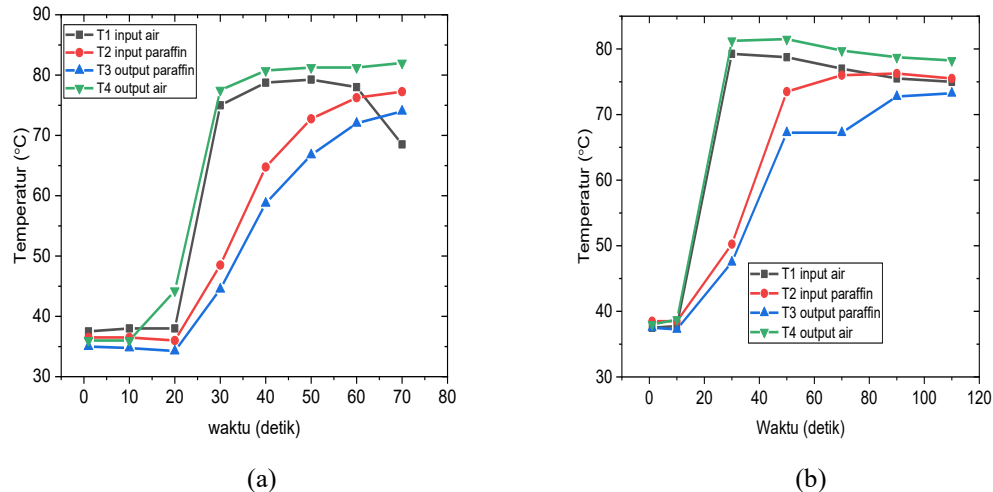
Gambar 1. Desain *Heat Pipe*

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain pipa akrilik sebagai penampung fluida panas, pipa tembaga sebagai tempat penyimpanan paraffin, *heater* sebagai pemanas air, bak air sebagai penampung air, kabel termokopel sebagai pembaca suhu leleh dan beku paraffin, pompa celup untuk mengalirkan air, serta *Arduino* untuk menampilkan hasil suhu eksperimen pada laptop.

Proses pengambilan data dilakukan secara uji eksperimen dengan memanaskan air hingga mencapai 80°C. Variasi debit aliran air terdiri atas dua macam, yaitu 1,5 lpm dan 3 lpm. Pada pengujian ini pipa tembaga divariasikan menjadi tiga bentuk, yaitu 2 siku, 3 siku, dan 4 siku. Setelah itu paraffin dimasukkan ke dalam pipa tembaga, kemudian air yang telah dipanaskan hingga 80°C dialirkan ke dalam pipa akrilik menggunakan pompa celup. Setelah air panas dialirkan, suhu langsung terbaca melalui kabel termokopel dan ditampilkan pada laptop menggunakan aplikasi Tera Term.

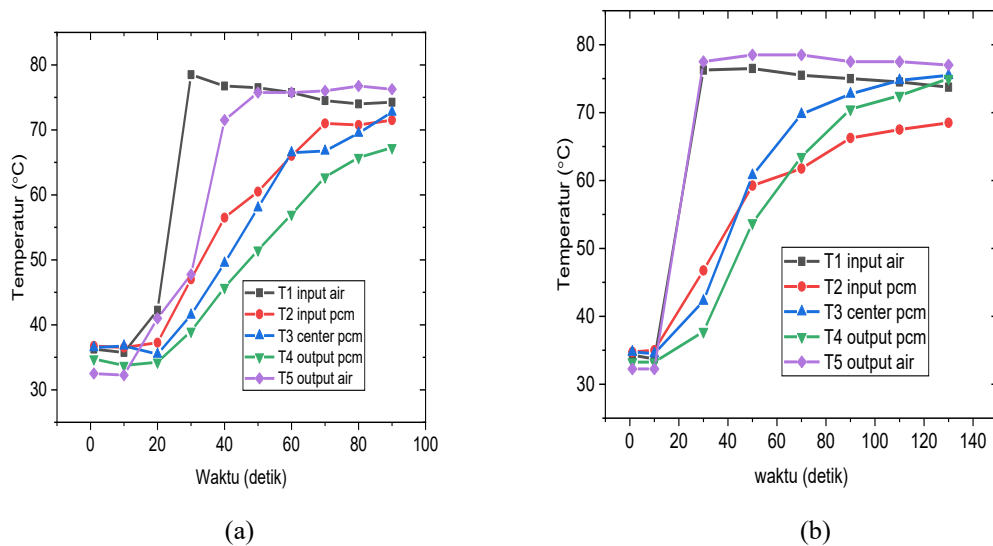
HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah eksperimen dilakukan, hasil *melting* telah terlihat pada gambar grafik di bawah. Pada Gambar 2 terlihat bahwa pengujian ini dilakukan dengan tiga buah pipa akrilik dan tembaga. Pada Grafik 2(a), *melting* 1,5 lpm menjelaskan bahwa proses *melting* pada pipa penyimpanan paraffin dengan 2 siku di dalam tabung akrilik, dengan suhu awal 30°C, kemudian pada suhu 40°C mengalami peningkatan secara konstan. Sebelum eksperimen *melting* dilakukan, air dipanaskan hingga mencapai 85°C. Pada Grafik 2(b), proses *melting* pada pipa penyimpanan paraffin 2 siku dengan debit 3 liter/menit terlihat mengalami perbedaan suhu, di mana T3 mengalami peningkatan suhu secara lebih lambat ketika air panas dialirkan yang mencapai suhu sekitar 83°C.

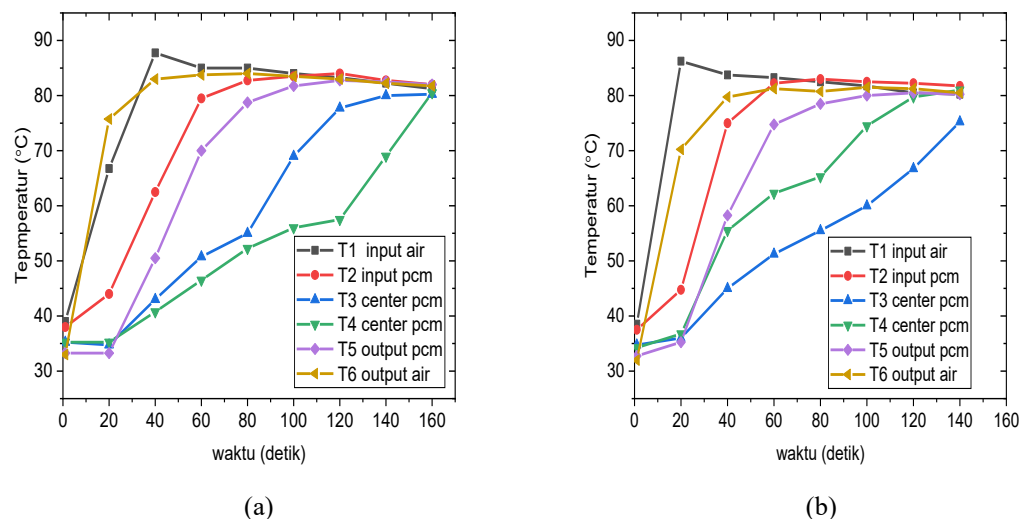


Gambar 2. Grafik (a) *Melting* 1,5 lpm dan Grafik (b) *Melting* 3 lpm Pipa 2 Siku

Proses *melting* pada Gambar 3, Grafik 3(a), menerangkan bahwa *melting* pipa penyimpanan paraffin 3 siku dengan suhu kerja awal 30°C menunjukkan bahwa suhu paraffin mulai meningkat pada titik pengukuran masing-masing. Suhu paraffin pada T3 mengalami kenaikan yang naik turun, hal ini terjadi karena keterlambatan termokopel dalam membaca suhu *melting* dibandingkan bagian paraffin pada T2 dan T4. Pengamatan ini diperoleh dari titik masuk panas pada T2, T3, dan T4. Pada Grafik 3(b), terlihat perbedaan suhu panas yang diterima paraffin selama proses *melting* setelah dilakukan pemanasan air hingga 85°C sebelum pengujian dilakukan. Suhu pada T2 mengalami keterlambatan peningkatan dibandingkan T3 dan T4.

Gambar 3. Grafik (a) *Melting* 1,5 lpm dan Grafik (b) *Melting* 3 lpm Pipa 3 Siku

Sedangkan pada proses *melting* pipa 4 siku yang ditunjukkan pada Gambar 4, Grafik 4(a) memperlihatkan perubahan temperatur dengan suhu kerja awal 30°C, kemudian suhu paraffin mulai meningkat satu sama lain pada titik pengamatannya. Suhu pada T4 meningkat lebih lambat dibandingkan T3 meskipun air telah dipanaskan hingga 85°C. Hal tersebut berkaitan dengan titik masuk panas pada T2, T3, dan T4. Pada Grafik 4(b), proses *melting* memperlihatkan bahwa suhu panas yang ditransfer diterima secara lebih merata oleh paraffin, meskipun T3 dan T4 mengalami sedikit keterlambatan kenaikan suhu.

Gambar 4. Grafik (a) *Melting* 1,5 lpm dan Grafik (b) *Melting* 3 lpm Pipa 4 Siku

KESIMPULAN

Data hasil pengujian pada proses *melting* pada tiga sampel, yaitu perubahan fasa pada pipa tembaga yang menggunakan paraffin sebagai material penyimpanan energi, telah dilakukan secara eksperimen dari kondisi 35°C hingga 85°C, dan pengujian kondisi *freezing* dari 85°C hingga 47°C. Nilai durasi terbaik pada *thermal storage* berada pada debit 1,5 liter/menit pada pipa penyimpanan paraffin dengan 2 siku, yang menghasilkan waktu *melting* sebesar 70 detik dan waktu kembali ke keadaan solid selama 1700 detik. Kecepatan proses pemanasan dan pendinginan pada percobaan ini dipengaruhi oleh jarak serta jumlah siku pada pipa penyimpanan paraffin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Sarbu and C. Sebarhievici, "A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage," *Sustainability*, vol. 10, no. 1. p. 191, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
- [2] D. Gibb *et al.*, "Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition," *IEA Technol. Collab. Program. Energy Conserv. through Energy Storage*, p. 154, 2018.
- [3] M. Zare and K. S. Mikkonen, "Phase Change Materials for Life Science Applications," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 33, p. 2213455, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202213455>.
- [4] X.-M. Yang, T. Shi, X. Wang, H. Liu, D.-Y. Wang, and G.-Z. Yin, "Typical Applications and Flame-Retardant Strategies for Organic Phase-Change Materials," *Carbon Energy*, vol. 7, no. 11, p. e70079, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/cey2.70079>.
- [5] W. Ye, D. Jamshideasli, and J. M. Khodadadi, "Improved Performance of Latent Heat Energy Storage Systems in Response to Utilization of High Thermal Conductivity Fins," *Energies*, vol. 16, no. 3. p. 1277, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16031277>.
- [6] S. Chavan, R. Rudrapati, and S. Manickam, "A comprehensive review on current advances of thermal energy storage and its applications," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 7, pp. 5455–5463, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.003>.
- [7] A. Das, M. M. H. Apu, A. Akter, M. M. Al Reza, and R. Mia, "An overview of phase change materials, their production, and applications in textiles," *Results Eng.*, vol. 25, p. 103603, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103603>.
- [8] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, "Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 36, p. 102122, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102122>.
- [9] M. Fauzi, B. Kurniawan, A. Fachredzy, M. A. H. Nabawi, and A. P. Tetuko, "Paraffin-Based Phase Change Materials (PCM) with Enhanced Thermal Conductivity Through Particle Addition and Encapsulation Techniques for Thermal Energy Storage: A Critical Review of Materials Science," *Trends Sci.*, vol. 22, no. 9, p. 10308, 2025, doi: <https://doi.org/10.48048/tis.2025.10308>.
- [10] A. S. S. Bilal *et al.*, "Enhancing thermo-physical properties of paraffin wax phase change material with MXene nanoflakes for improved energy storage and heat transfer applications," *Results Eng.*, vol. 25, p. 104557, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104557>.