

ANALISIS PENERAPAN *PHASE CHANGING MATERIAL (PCM)* DALAM PENDINGINAN PANEL SURYA SERTA PENGGUNAANNYA UNTUK MEMANASKAN AIR DENGAN ENERGI SURYA

Akasia Ellyansyah Dimyati¹, Nazarudin Sinaga², Mohammad Tauviqirrahman²

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: akasiaellyansyah@gmail.com

Abstrak

Peningkatan suhu operasional pada panel surya fotovoltaik (PV) akibat radiasi matahari menyebabkan penurunan efisiensi listrik secara signifikan. Sistem pendinginan pasif menggunakan Phase Change Material (PCM) menawarkan solusi tanpa memerlukan konsumsi energi tambahan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pendinginan pasif berbasis PCM parafin dalam menurunkan temperatur permukaan panel surya. Metode penelitian menggunakan simulasi numerik Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan perangkat lunak Ansys Fluent 2023 R1, yang divalidasi terhadap data eksperimen. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur permukaan panel pada dua kondisi utama, yaitu panel PV tanpa pendingin dan panel PV yang dilengkapi dengan lapisan PCM parafin dengan variasi ketebalan 12 mm hingga 33 mm. Melalui simulasi ini, diharapkan diperoleh pemahaman tentang efektivitas PCM dalam menyerap panas berlebih melalui mekanisme perubahan fasa serta pengaruh ketebalan lapisan terhadap kemampuan pendinginan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan acuan desain sistem pendinginan pasif yang optimal untuk meningkatkan kinerja panel surya fotovoltaik.

Kata kunci: grafit sfg75; panel surya; pendinginan; phase change material (pcm); simulasi numerik

Abstract

The increase in operating temperature of photovoltaic (PV) solar panels due to solar radiation causes a significant decrease in electrical efficiency. Passive cooling systems using Phase Change Material (PCM) offer a solution without requiring additional energy consumption. This study aims to analyze the performance of a passive cooling system based on paraffin PCM in reducing the surface temperature of solar panels. The research method employs Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulations using Ansys Fluent 2023 R1, validated against experimental data. The parameters analyzed include the panel surface temperature under two main conditions: PV panels without cooling and PV panels equipped with a paraffin PCM layer with thickness variations ranging from 12 mm to 33 mm. Through these simulations, it is expected to gain an understanding of the effectiveness of PCM in absorbing excess heat through the phase change mechanism as well as the effect of layer thickness on cooling performance. This research is expected to provide design references for optimal passive cooling systems to improve the performance of photovoltaic solar panels.

Keywords: cooling; numerical simulation; phase change material (pcm); sfg75 graphite; solar panel

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

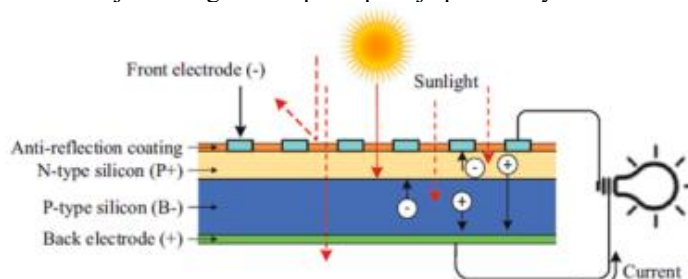
Kebutuhan energi global terus meningkat akibat industrialisasi dan urbanisasi. Indonesia yang berada di khatulistiwa memiliki potensi energi surya besar dengan rata-rata radiasi 4,5 kWh/m²/hari, namun pemanfaatannya masih rendah. Sekitar 80–85% konsumsi energi global masih bergantung pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan menghasilkan emisi CO₂ [1]. Teknologi fotovoltaik (PV) merupakan metode utama konversi energi surya, tetapi kenaikan suhu panel sebesar 1°C dapat menurunkan efisiensi listrik hingga 0,45% [2]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan seperti photovoltaic thermal (PV/T) yang mengintegrasikan Phase Change Material (PCM). PV/T-PCM dengan parafin mampu menurunkan suhu panel hingga 9°C dan meningkatkan pembangkitan listrik tahunan sebesar 4,3%. Namun, parafin memiliki konduktivitas termal rendah sebesar 0,2–0,26 W/m·K yang membatasi kinerja pendinginan [6].

Selain konduktivitas termal, ketebalan lapisan PCM juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja pendinginan. Lapisan PCM yang lebih tebal memiliki massa dan kapasitas panas laten yang lebih besar, sehingga mampu menyerap lebih banyak panas sebelum suhunya naik. Sebaliknya, lapisan PCM yang terlalu tipis akan cepat jenuh, menyebabkan panas lebih mudah menerobos ke panel dan menaikkan suhu operasionalnya. Oleh karena itu, pemilihan ketebalan PCM yang tepat menjadi kunci dalam desain sistem PV-PCM yang efisien.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pendinginan pasif berbasis PCM parafin dalam menurunkan temperatur permukaan panel surya. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur permukaan panel pada dua kondisi utama: panel PV tanpa pendingin dan panel PV yang dilengkapi dengan lapisan PCM dengan variasi ketebalan 12 mm hingga 33 mm. Analisis dilakukan melalui simulasi numerik Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan Ansys Fluent 2023 R1 yang telah divalidasi terhadap data eksperimen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan acuan dalam desain sistem pendinginan pasif yang efektif untuk meningkatkan kinerja panel surya fotovoltaik.

1.2 Panel Surya

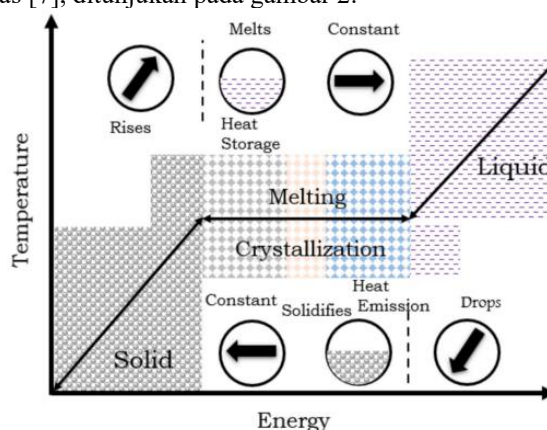
Panel surya fotovoltaik mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik dan populer karena hemat biaya, perawatan rendah, serta tidak memiliki bagian bergerak. Namun, kelemahan utamanya adalah efisiensi konversi energi yang rendah dan sensitivitas terhadap suhu operasional [5]. Untuk mengatasi hal ini, para peneliti terus berupaya meningkatkan efisiensi modul PV, termasuk mengatasi masalah sensitivitas suhu. Studi ini secara khusus berfokus pada eksplorasi berbagai metode pasif untuk mendinginkan sistem fotovoltaik, dengan mempertimbangkan teknik aktif sebagai pembandingan[4]. Gambar 1 menunjukkan bagaimana prinsip kerja panel surya.



Gambar 1. Prinsip Kerja Panel Surya [3]

1.3 Phase Change Material

Phase Change Material (PCM) adalah bahan yang mampu menyimpan dan melepaskan energi panas laten saat terjadi perubahan fase (padat-cair atau sebaliknya). PCM memberikan respons suhu cepat, efektif menurunkan kenaikan suhu sel fotovoltaik (PV), menjaga keseragaman suhu, dan tidak memerlukan sumber daya eksternal. Konsep PV-PCM pertama kali diusulkan oleh Stultz dan Wen pada tahun 1977, di mana wadah berisi PCM diletakkan di bagian belakang panel PV untuk menyerap panas melalui proses pencairan. Sejak saat itu, berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas teknologi ini secara luas [7], ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Prinsip Kerja Panel Surya [3]

PCM diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama, yaitu:

1. PCM Organik: Tersusun dari hidrokarbon (parafin, asam lemak). Bersifat non-korosif, stabil secara kimia, dan memiliki kapasitas panas laten tinggi.
2. PCM Anorganik: Umumnya garam hidrat. Memiliki konduktivitas termal lebih tinggi, namun rentan korosi dan pemisahan fase.

3. PCM Eutektik: Campuran dua atau lebih PCM (organik, anorganik, atau kombinasi) yang dirancang untuk mencapai suhu lebur tertentu.

Perkembangan terkini menunjukkan bahwa penelitian bergeser dari PCM tunggal menuju PCM eutektik karena kemampuannya menghasilkan sifat termal yang lebih sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Selain itu, peningkatan kinerja PCM juga dilakukan melalui penambahan nanopartikel, yang dikenal sebagai nano-enhanced phase change material (NePCM) [9].

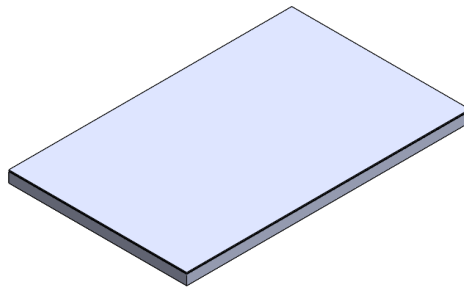
1.4 CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah bidang ilmu rekayasa yang menggunakan metode komputasi untuk menganalisis dan memodelkan aliran fluida serta fenomena terkait seperti perpindahan panas, reaksi kimia, dan interaksi fluida-benda. CFD menggunakan persamaan matematika (misalnya persamaan Navier-Stokes) yang menggambarkan gerakan fluida. Karena persamaan ini sulit diselesaikan secara analitis, CFD menggunakan metode numerik dengan mendiskretisasi persamaan menjadi sistem aljabar yang dapat dipecahkan menggunakan komputer. CFD diterapkan di berbagai bidang rekayasa (mekanik, proses, kimia, sipil, lingkungan) serta ilmu atmosfer (ramalan cuaca, perubahan iklim). CFD dapat memperkirakan pola aliran fluida, mengoptimalkan desain, mengurangi biaya operasional, serta meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem yang berkaitan dengan aliran fluida [8].

2. Metodologi Penelitian

2.1 Geometri Panel Surya ditambah PCM

Model geometri panel + PCM dimodelkan menggunakan SolidWorks 2023 berdasarkan pengukuran langsung, mencakup dimensi panel serta dimensi PCM. Modifikasi geometri komputasi pada penelitian ini dilakukan dengan menyesuaikan parameter ketebalan PCM pada model tiga dimensi, sehingga mampu merepresentasikan perubahan geometri yang menjadi objek analisis yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Tampilan Desain Panel Surya + PCM

2.2 Tahap Simulasi

Simulasi elemen hingga dilaksanakan dengan memanfaatkan ANSYS Workbench melalui modul ANSYS Fluent. Langkah-langkah proseduralnya adalah sebagai berikut. Pertama, geometri hasil pemodelan dari Solidworks diimpor ke ANSYS DesignModeler, kemudian setiap komponen diberikan penamaan khusus. Kedua, dilakukan proses *meshing* (pembagian geometri menjadi sel-sel kecil), di mana setiap *wall* juga diberi penamaan untuk mempermudah pengaturan kondisi batas pada tahap *setup*. Ketiga, setelah *meshing* rampung, dilanjutkan dengan tahap *setup*, yaitu serangkaian pengaturan awal yang mencakup pengisian data kondisi batas untuk setiap komponen geometri sebelum simulasi dijalankan.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi, panel PV tanpa pendingin mencapai temperatur permukaan 118,15°C. Aplikasi Phase Change Material (PCM) terbukti mampu menurunkan temperatur panel secara signifikan, dengan parafin menunjukkan kinerja terbaik menjadi 69,40°C dengan penurunan 41,3%, diikuti oleh soywax yang menjadi 71,81°C dengan penurunan 39,2%, dan beeswax yang menjadi 78,10°C dengan penurunan 33,9%. Fenomena ini terjadi karena PCM menyerap panas berlebih melalui proses perubahan fasa dari padat ke cair tanpa peningkatan suhu yang signifikan selama peleburan [10]. Keunggulan parafin dalam penelitian ini sejalan dengan temuan studi pemilihan PCM menggunakan metode VIKOR yang menempatkan parafin di peringkat teratas untuk aplikasi penyimpanan energi termal suhu rendah, karena stabilitas termal dan kapasitas panas latennya yang optimal [11]. Sementara itu, soywax menunjukkan kinerja yang kompetitif sebagai alternatif ramah lingkungan. Soywax efektif sebagai material penyimpan energi dalam sistem pemanas udara surya karena sifatnya yang biodegradable dan berasal dari sumber terbarukan [12].

Penerapan soywax pada pendinginan pasif panel surya di daerah tropis dapat menurunkan temperatur panel hingga 10°C pada jam puncak [13]. Adapun beeswax, meskipun memiliki kapasitas panas laten yang tinggi sekitar 170

hingga 190 kJ/kg, kinerjanya paling rendah dalam penelitian ini. Yaitu pada beeswax murni memiliki titik leleh antara 60-67°C, yang lebih tinggi dibandingkan parafin dan soywax, sehingga proses absorpsi panas laten baru terjadi secara optimal pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini membuat beeswax kurang ideal untuk aplikasi pendinginan panel surya yang beroperasi pada rentang suhu 60-80°C[14].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis kinerja tiga jenis PCM yaitu parafin, soywax, dan beeswax pada pendinginan pasif panel surya menggunakan simulasi CFD yang telah divalidasi. Hasil menunjukkan bahwa parafin memiliki kinerja terbaik dengan penurunan temperatur panel sebesar 41,3% menjadi 69,40°C, diikuti soywax sebesar 39,2% menjadi 71,81°C dan beeswax sebesar 33,9% menjadi 78,10°C. Keunggulan parafin disebabkan oleh stabilitas termal dan kapasitas panas latennya yang optimal, sementara beeswax memiliki kinerja terendah karena titik lelehnya yang lebih tinggi sehingga kurang ideal untuk rentang suhu operasional panel surya 60-80°C. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan melakukan validasi eksperimental agar memastikan kesesuaian hasil numerik dengan kondisi nyata, serta eksplorasi modifikasi PCM seperti penambahan nanopartikel atau pembentukan PCM eutektik untuk meningkatkan konduktivitas termal.

5. Daftar Pustaka

- [1] Asmelash, E. dan Gorini, R. (2021). *International Oil Companies and The Energy Transition*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).
- [2] Lachheb, M., Karkri, M., Albouchi, F., Mzali, F. dan Ben Nasrallah, S. (2014). Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method. *Energy Conversion and Management*, 82, pp.229-237.
- [3] Bilen, K. dan Erdogan, I. (2023). Effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal (PV/T) solar panels: A comprehensive review. *Solar Energy*, 262, p.111829.
- [4] Mahdavi, A., Farhadi, M., Gorji-Bandpy, M. dan Mahmoudi, A. (2024). A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins. *Applied Thermal Engineering*, 236, p.121760.
- [5] Peng, Z., Herfatmanesh, M.R. dan Liu, Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy Conversion and Management*, 150, pp.949-955.
- [6] Venkatesan, S.P., Ravi Nagendra, B., Raghu Ram, C., Venkatesh, S. dan Purusothaman, M. (2021). The effect of expanded graphite on the performance of paraffin phase change materials used in thermal energy storage. *Journal of Physics: Conference Series*, 2054, p.012071.
- [7] Wu, T., Mo, L., Ye, G., Hu, Y., Fan, C., Zeng, M., Cai, S. dan Song, M. (2025). Thermal management of photovoltaic systems using cascade phase change material module. *Building and Environment*, 282, p.113270.
- [8] Ferziger, J.H., Perić, M. dan Street, R.L. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 4th ed. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- [9] Aziz, A., Waheed, W., Mourad, A., Aissa, A., Younis, O., Abu-Nada, E. dan Alazzam, A. (2024). Contemporary nano enhanced phase change materials: Classification and applications in thermal energy management systems. *Journal of Energy Storage*, 75, p.109579.
- [10] Moradvandi, M. dan Shahsavar, A. (2026). Performance enhancement of a PCM-cooled photovoltaic panel using intermittent ultrasonic piezoelectric cool-mist generation: An experimental study. *Results in Engineering*, 30, p.110220.
- [11] Balasundaram, P., Baranidharan, B. dan Sivaram, N.M. (2023). A VIKOR based selection of phase change material for thermal energy storage in solar dryer system. *Materials Today: Proceedings*, 2023, pp.245-249.
- [12] Gunawan, Y., Trisnadewi, T., Putra, N., Akhriyanto, N. dan Trylucky, D.N. (2023). Performance of natural wax as phase change material for intermittent solar energy storage in agricultural drying: An experimental study. *Solar Energy*, 251, pp.158-170.
- [13] Puspongoro, F., Fathoni, A.M., Agustina, D., Mahlia, T.M.I. dan Putra, N. (2025). Thermal performance and techno-economic analysis of passive cooling for photovoltaic panel using Phase Change Material (PCM) in the tropics. *Results in Engineering*, 25, p.107547.
- [14] Ben Belgacem, S., Trigui, A., Zghal, S., Jedidi, I., Loukil, M.S., Calmunger, M. dan Abdelmouhel, M. (2026). Beeswax/LDPE/carbon graphite composites for thermal energy storage applications: Impact of CNTs on thermophysical performance and stability. *Composites Communications*, 61, p.102661.