

STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUDUT SIRIP PIPA PADA PHOTOVOLTAIC-THERMAL

Naufal Daffa' Hanaan Nuhaa¹, Nazaruddin Sinaga², Mohammad Tauviquirrahman²

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: naufaldaffahn02@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan energi yang terus berkembang akibat pertumbuhan populasi dan industrialisasi mendorong pencarian sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Energi surya, sebagai salah satu solusi terbarukan, menawarkan potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi dunia. Teknologi fotovoltaik (PV/T) telah berkembang pesat, namun efisiensi konversi energi masih terhambat oleh peningkatan suhu panel surya yang dapat menurunkan kinerjanya. Penelitian ini fokus pada penggunaan Material Berubah Fasa (MBF) untuk mengatasi permasalahan suhu tinggi pada panel surya. MBF dapat menyerap panas laten selama perubahan fase dan menstabilkan suhu panel, meningkatkan efisiensinya. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi pengaruh variasi sudut sirip pipa dalam sistem pendinginan hibrida yang menggabungkan MBF dan pipa pendingin. Penelitian dilakukan dengan menggunakan MBF jenis *palm wax* dan menganalisis pengaruh berbagai konfigurasi pipa terhadap temperatur panel surya dan suhu outlet pipa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan MBF *palm wax* dapat menurunkan suhu panel surya hingga 78,77°C. Variasi terbaik untuk menurunkan temperatur panel dan meningkatkan suhu outlet ditemukan pada sudut sirip 80° dengan Reynold 10000.

Kata kunci: hibrida; mbf; *palm wax*; pv/t; reynolds; sirip pipa

Abstract

The ever-increasing energy needs due to population growth and industrialization encourage the search for sustainable alternative energy sources. Solar energy, as one of the renewable solutions, offers great potential to meet the world's energy needs. Photovoltaic (PV/T) technology has developed rapidly, but energy conversion efficiency is still hampered by the increasing temperature of solar panels which can reduce their performance. This study focuses on using Phase Change Materials (PCM) to overcome the problem of high temperatures in solar panels. PCM can absorb latent heat during phase changes and stabilize the panel temperature, increasing efficiency. In addition, this study also explores the effect of variations in the fin angle of the pipe in a hybrid cooling system that combines PCM and cooling pipes. The study was conducted using palm wax PCM and the effect of various pipe configurations on the temperature of the solar panel and the outlet temperature of the pipe was analyzed. The results showed that the use of palm wax PCM can reduce the temperature of the solar panel by up to 78.77°C. The best variation to reduce the panel temperature and increase the outlet temperature was found at a fin angle of 80° with Reynolds 10000.

Keywords: *fin pipe; hybrid; palm wax; pcm; pv/t; reynolds*

1. Pendahuluan

Peningkatan populasi dan industrialisasi dunia telah mendorong permintaan energi yang semakin tinggi. Ketergantungan pada sumber energi fosil seperti minyak dan gas bumi yang terbatas serta berdampak buruk pada lingkungan mendorong pencarian alternatif energi yang berkelanjutan [1]. Energi matahari, yang dapat dikonversi menjadi listrik melalui teknologi fotovoltaik, menawarkan solusi yang menjanjikan. Selain berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim, energi surya juga memberikan manfaat bagi lingkungan dan masyarakat dengan mengurangi polusi udara dan air.

Teknologi fotovoltaik (PV) merupakan tulang punggung dalam pemanfaatan energi matahari, namun efisiensi konversinya masih terbatas. Kenaikan suhu panel surya akibat radiasi matahari yang intens dan suhu lingkungan yang tinggi dapat menurunkan efisiensi secara signifikan. Setiap kenaikan suhu 1°C dapat mengurangi efisiensi hingga 0,5% [2]. Hal ini disebabkan oleh penurunan tegangan sirkuit terbuka dan peningkatan arus hubung singkat pada panel surya. Selain itu, panel surya hanya mampu mengubah sebagian kecil energi matahari menjadi listrik, sisanya menjadi panas yang meningkatkan suhu panel [3]. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai metode pendinginan panel surya terus dikembangkan guna menjaga suhu operasional panel tetap stabil dan meningkatkan efisiensi konversi energi.

Material berubah fasa (MBF) telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi panel surya. Dengan kemampuannya menyerap panas laten saat beralih fasa, MBF dapat menjaga suhu panel tetap stabil. Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa penggunaan MBF pada sistem fotovoltaik termal (PV-T) mampu menurunkan suhu panel secara signifikan, hingga $35,6^{\circ}\text{C}$ dalam satu hari, dan meningkatkan efisiensi hingga 7,3% per tahun. Selain itu, studi lain juga menunjukkan penurunan suhu hingga $51,8^{\circ}\text{C}$ dan peningkatan efisiensi 5,3% dengan menggunakan MBF jenis lain [4]. Hasil-hasil ini menguatkan potensi MBF sebagai solusi efektif untuk meningkatkan kinerja panel surya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi komputasi dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis performa termal sistem Photovoltaic Thermal (PVT) yang dilengkapi dengan Material Berubah Fasa (MBF). Desain penelitian ini berfokus pada evaluasi perpindahan panas dan kehilangan tekanan yang dihasilkan oleh penggunaan pipa sirip longitudinal. Simulasi ini bertujuan untuk memodelkan perilaku perpindahan panas di dalam sistem PVT, terutama ketika panel surya menghasilkan panas yang kemudian dikelola oleh MBF dan air yang mengalir melalui pipa yang dilengkapi dengan sirip. Metode CFD dipilih karena memungkinkan simulasi aliran fluida dan perpindahan panas yang akurat dalam sistem yang kompleks, seperti sistem PVT-MBF, yang melibatkan perpaduan antara konduksi, konveksi, dan radiasi. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Ansys Fluent*, di mana kondisi aliran dan termal dalam sistem dapat dianalisis secara mendetail, termasuk distribusi suhu, profil aliran fluida, dan perpindahan panas di sekitar twisted tape serta interaksi antara MBF dan panel surya.

2.2 Alur Studi Numerik

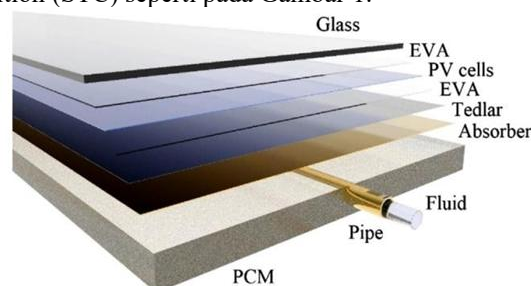
Studi numerik dilakukan menjadi 4 tahap utama yaitu; Modeling geometry, meshing, setup, dan Running simulation. Selain tahapan tersebut pada studi numerik diperlukan adanya uji grid independen dan validasi. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami konsep dan teori terkait sistem PV-T panel yang menggunakan MBF serta pendekatan numerik yang relevan. Langkah ini mencakup pengumpulan informasi dari penelitian-penelitian sebelumnya, serta pemahaman tentang penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dalam analisis performa termal dan aliran fluida.

Selanjutnya, dilakukan uji grid dan validasi simulasi untuk memastikan bahwa mesh atau grid yang digunakan dalam simulasi mampu merepresentasikan sistem dengan akurat. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi sejalan dengan data eksperimen atau hasil penelitian terdahulu. Setelah validasi, dilakukan pengujian perbedaan suhu outlet di mana grid dianggap memadai jika perbedaan suhu outlet antar grid kurang dari 5%. Jika perbedaan lebih dari 5%, maka mesh perlu diperhalus atau diuji kembali. Setelah grid dianggap independen, atau tidak memengaruhi hasil simulasi secara signifikan, penelitian dilanjutkan dengan pembuatan variasi geometri yang akan diuji. Variasi geometri ini adalah sudut sirip pipa.

Setelah parameter dan kondisi batas ditetapkan, simulasi variasi geometri dijalankan untuk mempelajari pengaruh setiap variasi terhadap performa sistem. Hasil simulasi dianalisis dalam tahap analisis hasil simulasi untuk memahami bagaimana perubahan geometris mempengaruhi distribusi suhu, efisiensi termal, dan karakteristik aliran fluida pada sistem PV-T. Tahapan akhir dari penelitian ini adalah penyusunan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil analisis. Kesimpulan ini mencerminkan pengaruh penggunaan variasi geometri terhadap kinerja sistem, dan saran diberikan untuk pengembangan lebih lanjut atau aplikasi praktis dari hasil penelitian ini. Dengan mengikuti alur ini, simulasi yang dilakukan diharapkan dapat memberikan hasil yang akurat dan valid, serta memberikan kontribusi yang berarti dalam pengembangan teknologi PV-T panel yang lebih efisien.

2.3 Permodelan Geometri

Model geometri dibuat dengan design modeler pada software ANSYS. Model dibuat merujuk pada studi terdahulu [6] untuk melakukan validasi terlebih dahulu. Model panel surya referensi memiliki daya 120 WP dengan efisiensi 12 % pada pengujian Standard Test Condition (STC) seperti pada Gambar 1.



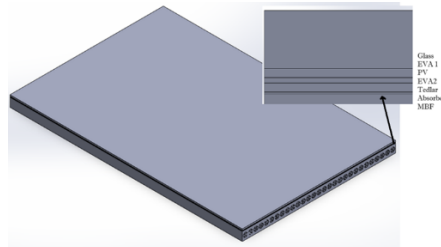
Gambar 1. Model Lapisan Panel Surya Referensi.

Sedangkan untuk panel surya yang akan diteliti mengambil model panel surya merek Inscom memiliki daya 20 WP dengan efisiensi 11 % pada pengujian Standard Test Condition (STC). Panel surya dari produsen secara umum memiliki model dan dimensi seperti pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Panel Surya

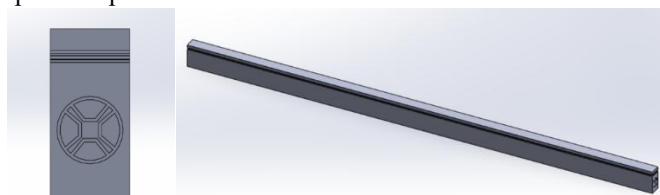
Hasil permodelan dari panel surya referensi dapat dilihat pada Gambar 3 dibawah, dimana susunan seperti terlihat pada Gambar 1 di atas.



Gambar 3. Pemodelan Simulasi Isometri

Model simulasi diuji menggunakan satu pipa untuk mempermudah perbandingan dengan hasil dari literatur atau jurnal yang memiliki konfigurasi serupa. Validasi dengan 1 pipa ini dilakukan untuk memverifikasi akurasi dari model numerik yang digunakan, khususnya dalam hal mekanisme perpindahan panas dan aliran fluida. Setelah tervalidasi, model tersebut dikembangkan ke dalam sistem yang lebih kompleks dengan 29 pipa dan penambahan sirip. Meskipun jumlah pipa bertambah dan ada penambahan sirip, mekanisme dasar yang mengatur perpindahan panas dalam pipa polos tetap berlaku, sehingga hasil validasi tetap relevan. Penambahan pipa dan sirip bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal panel PV-T dengan memperbesar area perpindahan panas dan meningkatkan kapasitas pendinginan sistem. Berikut merupakan hasil permodelan panel PV-T dengan menggunakan PCM dan 29 pipa pada Gambar 3.

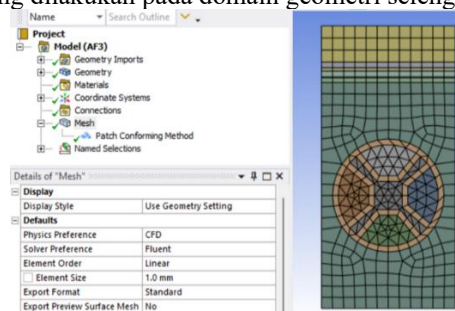
Untuk mengurangi kompleksitas komputasi, simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan mengambil 1/29 bagian dari panel PV-T dan menerapkan kondisi batas periodic. Sistem ini memungkinkan hanya satu bagian panel yang disimulasikan, sementara hasil dari simulasi tersebut dapat dianggap mewakili untuk seluruh sistem yang memiliki 29 pipa. Dengan menggunakan kondisi batas periodic, mekanisme perpindahan panas dan aliran fluida yang terjadi pada 1/29 bagian panel tetap sejalan dengan apa yang akan terjadi jika seluruh panel disimulasikan. Berikut hasil permodelan dari penerapan kondisi batas periodic pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pemodelan Panel Surya 29 pipa dengan kondisi batas periodik

2.4 Proses Meshing

Meshing dilakukan untuk membagi masing-masing bagian geometri menjadi lebih kecil dengan ukuran sel tertentu agar dapat disimulasikan. Meshing yang dilakukan pada domain geometri selengkapnya pada Gambar 5. berikut.

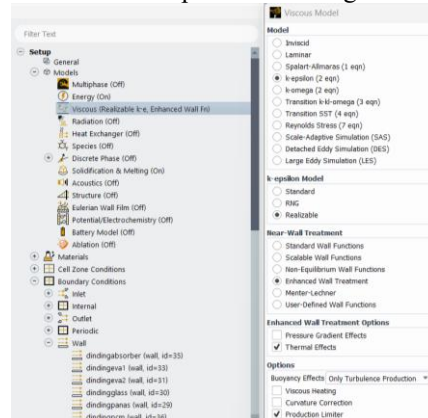


Gambar 5. Proses Meshing Model Geometri

Berdasarkan Gambar 5 proses meshing dilakukan terhadap masing masing part geometri dari model yang dibuat. Terdapat 9 part dari model geometri panel surya referensi. Part tersebut meliputi; Glass, Eva 1, PV Cell, Eva 2, Tedlar, Absorber, PCM, Pipa, dan Fluida. Pada model Panel surya referensi hanya terdapat 9 part tanpa adanya pipa sirip. Part geometri tersebut selanjutnya dibuat meshing dengan metode body sizing. Setiap part body diberikan ukuran sesuai dengan jumlah grid cell element yang dikehendaki. Pada tahap pembuatan meshing dibuat dengan berbagai jumlah cell element untuk kepentingan uji grid independen. Jumlah Cell element yang digunakan dengan ukuran antara lain; 180.000, 200.000, 250.000, 450.000, dan 600.000. Cell element dengan error terkecil dan jumlah yang sedikit akan dipilih menjadi grid yang disimulasikan untuk seluruh variasi pendinginan. . Pemberian nama pada surface face yang berhubungan langsung dengan lingkungan dilakukan dengan create named selections. Tujuan pemberian nama pada surface face untuk memudahkan memasukkan nilai kondisi batas.

2.5 Setup dan Solusi

Setup merupakan proses penyetelan sebelum proses simulasi dijalankan. Pada tampilan overview fluent penyetelan dimulai dengan setelan umum, models, materials, cell zone conditions, dan boundary conditions. Proses setup dilakukandengan memilih opsi atau memasukkan nilai parameters dengan rincian yang disajikan sebagai berikut.



Gambar 6. Setup – General & Model

Berdasarkan Gambar 6 Setup general meliputi ; Type solver – pressure based, Time solver - transient, dan Gravitational Acceleration bernilai (-9,81) pada arah vektor Y. *Setup model* meliputi; *Energy – On*, *Viscous – RNG k-epsilon*, *Solidification & Melting – On*. *Energy equation* harus diaktifkan karena model yang sedang dianalisis melibatkan perpindahan panas, baik di dalam fluida, panel *PV-T*, maupun di lapisan MBF, Model *RNG k-epsilon Realizable* (Renormalization Group k-epsilon) [8] dipilih untuk memodelkan aliran turbulen karena memberikan hasil yang paling diterima menurut studi literatur yang dilakukan karena Model ini cocok untuk aliran yang memiliki *shear* tinggi, seperti aliran fluida di dalam pipa dengan kehadiran tape berputar yang menghasilkan turbulensi, Fitur *Solidification & Melting* diaktifkan untuk menangani perubahan fasa pada MBF. Ketika MBF menyerap panas, ia akan mencair (melting), dan ketika melepaskan panas, ia akan membeku kembali (solidification).

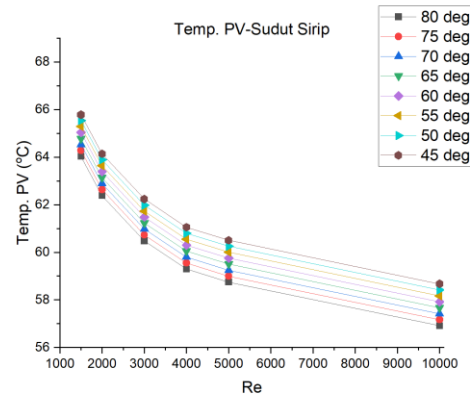
Tabel 1. MBF Properties.

PCM Properties	
Density (kg.m^{-3})	1145
Cp (SPECific Heat Capacity) ($\text{W.m}^{-1}. \text{k}^{-1}$)	at 15 C, 2802 at 46 C, 2892
Thermal Conductivity ($\text{W.m}^{-1}. \text{k}^{-1}$)	at 15 C, 0.28 at 46 C, 0.25
Viscosity ($\text{kg.m}^{-1}. \text{s}^{-1}$)	0.0045
Pure Solvent Melting Heat (J.kg^{-1})	122180
Solidus Temperature (C)	46
Liquidus Temperature (C)	46

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Panel PV

Pengaturan sudut sirip pipa pada sistem PV-T merupakan faktor penting yang dapat memengaruhi distribusi suhu dan efisiensi perpindahan panas dalam sistem. Sudut yang tepat dapat meningkatkan kontak antara pipa dan MBF, sehingga memungkinkan transfer panas yang lebih baik. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana variasi sudut sirip berpengaruh terhadap distribusi suhu pada panel PV-T. Berikut pada Gambar 7 di bawah merupakan perbandingan suhu permukaan panel PV-T variasi sudut sirip.

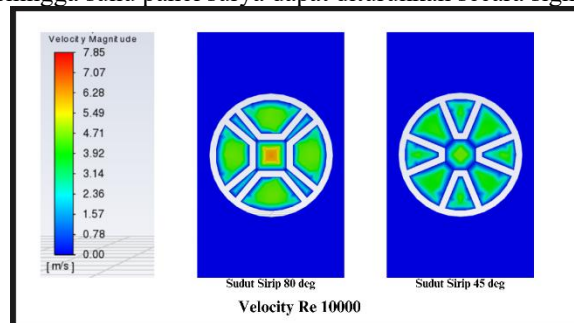


Gambar 7. Pengaruh Jumlah *Pitch* terhadap Suhu Panel Surya

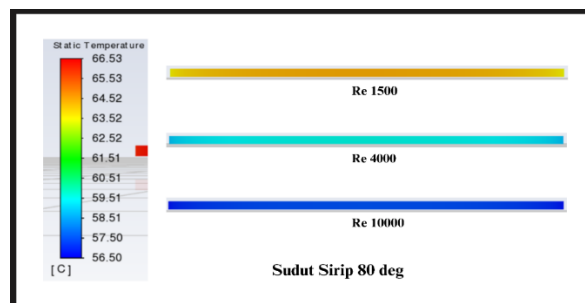
Berdasarkan grafik pada Gambar 7 diketahui bahwa setelah 1 jam, sudut sirip 80° merupakan sudut yang paling baik dalam penurunan suhu PV. Jika dibandingkan dengan suhu PV tanpa pendingin (129.25°C), PV mengalami penurunan suhu menjadi 64.03°C pada $\text{Re } 1500$, 62.38°C pada $\text{Re } 2000$, 60.48°C pada $\text{Re } 3000$, 59.30°C pada $\text{Re } 4000$, 58.75°C pada $\text{Re } 5000$, dan 56.92°C pada $\text{Re } 10000$.

3.2 Analisa dan Pembahasan Pengaruh Sudut Sirip terhadap Suhu Panel

Analisis data pada grafik Gambar 8 serta kontur pada Gambar 9 mengindikasikan bahwa sudut sirip sebesar 80° memberikan kinerja pendinginan optimal pada panel surya pada variasi ini. Hal ini disebabkan karena pipa memiliki luas bidang sentuh terbesar, dimana semakin besarnya luas bidang sentuh antara fluida dengan permukaan sirip berdampak pada peningkatan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan distribusi suhu pipa menjadi lebih seragam [6]. Ketika panel surya menyerap radiasi matahari, MBF yang berada di dekatnya akan menyerap panas dan mengalami perubahan fase. Panas laten yang tersimpan dalam MBF kemudian akan ditransfer ke dinding pipa melalui proses konduksi, yang dipercepat oleh koefisien perpindahan panas yang tinggi. Panas tersebut akan dialirkan ke fluida pendingin (air) di dalam pipa, sehingga suhu panel surya dapat diturunkan secara signifikan [7]



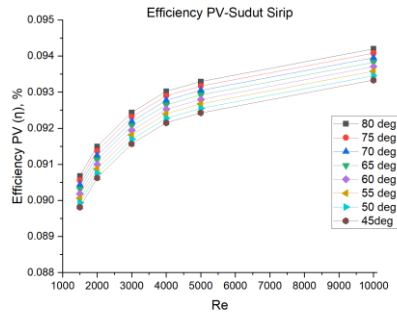
Gambar 8. Countour Turbulent Intensity



Gambar 9. Kontur Suhu PV Sudut Sirip 80°

3.3 Effisiensi PV

Hasil perhitungan efisiensi panel surya merupakan efisiensi panel pada kurun waktu 1 jam simulasi dengan *heat flux* seragam di 1000 W/m^2 . Hasil perhitungan efisiensi panel surya + MBF + Pipa Variasi Sudut Sirip dapat dilihat pada Gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10. Grafik Effisiensi PV+ MBF + Pipa Variasi Sudut Sirip

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi PV yang diproyeksikan pada Gambar 10 diketahui bahwa, sudut sirip 80° merupakan sudut yang paling baik dalam peningkatan efisiensi PV. Jika dibandingkan dengan suhu PV tanpa pendingin (5.84%), PV mengalami peningkatan efisiensi menjadi 9.07% pada Re 1500, 9.15% pada Re 2000, 9.24% pada Re 3000, 9.30% pada Re 4000, 9.33% pada Re 5000, dan 9.42% pada Re 10000 (Lampiran 8). Sudut ini dipilih karena mampu menurunkan suhu panel secara optimal. Suhu PV yang lebih rendah mengurangi hambatan listrik dalam sel surya, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi. Hal ini disebabkan oleh mobilitas elektron yang lebih tinggi pada suhu rendah [10].

4 Kesimpulan

Sebuah investigasi numerik telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh sudut sirip pada sistem PV/T. Pada penelitian ini, sistem yang dimodelkan adalah panel PV-T dengan dimensi 530 mm x 350 mm. Panel ini dilengkapi dengan lapisan MBF di bawahnya serta pipa-pipa yang mengalirkan fluida untuk menangkap panas sisa dari panel. Di dalam pipa, digunakan dengan variasi sudut sirip untuk meningkatkan perpindahan panas melalui peningkatan turbulensi aliran fluida. Simulasi dilakukan menggunakan *Ansys Fluent* dengan model turbulensi RNG k- ϵ , pengaturan solidification & melting untuk memodelkan perubahan fasa pada PCM, irradiansi matahari 1000 W/m², serta berbagai kondisi batas termasuk periodic boundary condition untuk menangani pola aliran yang berulang. Pada variasi sudut sirip, sudut 80° pada Re 1000 merupakan variasi terbaik yang dapat menurunkan temperatur panel surya menjadi 56.92 °C.

5. Daftar Pustaka

- [1] Huihui, W., Alharthi, M., Ozturk, I., Sharif, A., Hanif, I., & Dong, X. (2024). A strategy for the promotion of renewable energy for cleaner production in G7 economies: By means of economic and institutional progress. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140323>
- [2] Libra, M., Petrik, T., Poulek, V., Tyukhov, I. I., & Kourim, P. (2021). Changes in the Efficiency of Photovoltaic Energy Conversion in Temperature Range With Extreme Limits. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(6), 1479–1484. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2021.3108484>
- [3] Stropnik, R., & Stritih, U. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.011>
- [4] Wongwuttanasatien, T., Sarikarin, T., & Sukri, A. (2020). Performance enhancement of a photovoltaic module by passive cooling using phase change material in a finned container heat sink. *Solar Energy*, 195, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.053>
- [5] Salari, A., Kazemian, A., Ma, T., Hakkaki-Fard, A., & Peng, J. (2020). Nanofluid based photovoltaic thermal systems integrated with phase change materials: Numerical simulation and thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management*, 205, 112384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112384>
- [6] Tripty, T. A., & R Nasrin. (2024). Efficiency upgrading of solar PVT finned hybrid system in Bangladesh: Flow rate and temperature influences. *Heliyon*, e28323–e28323. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28323>
- [7] Merzah, B. N., Almakhyoul, Z. M., Abdullah, A. R., Ayed, S. K., & Hasan Shakir Majdi. (2024). Enhancing Solar Panel Cooling and Thermal Efficiency Using Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials. *Mathematical Modelling and Engineering Problems*, 11(6), 1547–1557. <https://doi.org/10.18280/mmep.110615>
- [8] El-Sebaey, M. S., El-Din, Sh. S., & El-Kholy, M. Kh. (2024). Heat transfer and fluid flow performance of an internally longitudinal finned tube: Numerical study and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences*, 201, 109025. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109025>
- [9] Senthil Kumar, K., Ashwin Kumar, H., Gowtham, P., Hari Selva Kumar, S., & Hari Sudhan, R. (2021). Experimental analysis and increasing the energy efficiency of PV cell with nano-PCM (calcium carbonate, silicon carbide, copper). *Materials Today: Proceedings*, 37, 1221–1225. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.430>
- [10] Yildirim, M. A., & Cebula, A. (2023). A numerical and experimental analysis of a novel highly-efficient water-based PV/T system. *Energy*, 289, 129875–129875. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129875>