

Evaluasi Termal Heatsink dengan Variasi Arah Aliran pada Sirip Vertikal dan Sirip Bersegmen untuk Pendinginan Pasif Photovoltaic

Ahmad Yonanda^{1*}, Amrizal¹, Muhammad Irsyad¹, Qithfirul Aziz¹, Akhmad Riszal²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

²Program Studi D4 Teknik Rekayasa Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Corresponding author: ahmad.yonanda@eng.unila.ac.id

Abstract

The performance degradation of Photovoltaic (PV) modules due to increasing surface temperature remains a major challenge that limits electrical energy conversion efficiency. One potential solution is the addition of a heatsink on the back side of the module to enhance heat dissipation. This study aims to analyze and compare the thermal performance of heatsinks with vertical-fin and segmented-fin configurations under different airflow directions. Numerical simulations were carried out using ANSYS Fluent (CFD) through several stages, including the design of the PV and heatsink geometry, mesh generation, specification of boundary conditions, and testing of airflow angle variations of 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, and 90° at a velocity of 2 m/s. The results show that the segmented-fin heatsink is capable of reducing the maximum surface temperature of the PV by up to 3 °C (5.6%) compared with the vertical-fin configuration at an airflow angle of 0°. In addition, changes in airflow angle have a greater influence on the vertical fins, with an average temperature difference of 1.7 °C, whereas the segmented fins show only 0.5 °C. These findings indicate that the segmented-fin configuration is more adaptive to variations in airflow direction and therefore has strong potential for application in real environmental conditions with dynamic wind behavior. The novelty of this work lies in the numerical modeling that directly compares the performance of vertical and segmented fins under varying airflow directions — a topic that has been rarely reported in previous passive PV cooling studies.

Keywords: Photovoltaic (PV), Passive cooling, Heatsink, Segmented fins, CFD (ANSYS Fluent)

Abstrak

Penurunan kinerja modul Photovoltaic (PV) akibat meningkatnya temperatur permukaan masih menjadi tantangan utama yang membatasi efisiensi konversi energi listrik. Salah satu solusi yang potensial adalah menambahkan heatsink pada bagian bawah modul sebagai media pelepas panas. Penelitian ini bertujuan menganalisis sekaligus membandingkan kinerja termal heatsink dengan konfigurasi sirip vertikal dan sirip bersegmen terhadap variasi arah aliran udara. Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS Fluent (CFD) melalui beberapa tahapan: perancangan geometri PV dan heatsink, pembuatan mesh, penentuan boundary condition, serta pengujian variasi sudut aliran udara sebesar 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, dan 90° dengan kecepatan 2 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa heatsink dengan sirip bersegmen mampu menurunkan temperatur maksimum permukaan PV hingga 3 °C (5,6%) dibandingkan sirip vertikal pada sudut aliran 0°. Selain itu, perubahan sudut aliran memberikan pengaruh lebih besar pada sirip vertikal dengan selisih temperatur rata-rata 1,7 °C, sementara pada sirip bersegmen hanya 0,5 °C. Temuan ini menegaskan bahwa konfigurasi sirip bersegmen lebih adaptif terhadap dinamika arah aliran udara, sehingga berpotensi diterapkan pada kondisi nyata dengan karakteristik angin berubah-ubah. Nilai kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pemodelan numerik yang secara langsung membandingkan kinerja sirip vertikal dan sirip bersegmen terhadap variasi arah aliran — topik yang masih jarang dilaporkan dalam studi pendinginan pasif PV.

Kata kunci: Photovoltaic (PV), Pendinginan pasif, *heatsink*, Sirip bersegmen, CFD (ANSYS Fluent)

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi matahari berupa gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik dengan bantuan teknologi Photovoltaic (PV) atau Photovoltaic thermal (PV/T) [1]-[3]. Photovoltaic sendiri adalah teknologi yang dapat merubah gelombang elektromagnetik

matahari menjadi energi listrik. Photovoltaic terletak di dalam sel surya yang kemudian disusun dengan kombinasi rangkaian seri dan parallel agar menghasilkan tegangan dan arus listrik sesuai dengan kebutuhan [4]. Kumpulan atau susunan dari beberapa sel surya ini disebut dengan panel surya. Dalam penggunaannya panel surya memiliki kekurangan, salah satunya yaitu panas.

Panas di permukaan panel surya harus dilepas secepat mungkin ke udara lingkungan sekitar karena akan mengakibatkan penurunan efisiensi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tersebut [5]-[7]. Oleh karena itu dilakukan upaya untuk menurunkan temperatur permukaannya dengan metode pendinginan. Secara global terdapat dua metode pendinginan yang sudah dikenal yaitu pasif dan aktif. Metode pendinginan pasif memanfaatkan penyebaran panas melalui heatsink untuk memaksimalkan perpindahan panas radiasi dan konveksi sehingga memiliki keunggulan pada efisiensi dan biaya finansial yang lebih rendah. Metode pasif ini bekerja berdasarkan tiga mekanisme dasar perpindahan panas: konveksi, konduksi, dan radiasi [8]. Berdasarkan penelitian dari Sjahrudin [9] yang meneliti tentang pemasangan heatsink pada panel surya, salah satu upaya untuk menstabilkan termal permukaan panel surya adalah dengan menambahkan sirip pendingin berbahan aluminium untuk memperluas permukaan perpindahan panas yang terjadi. Hasil dari penelitian tersebut pendinginan menggunakan sirip dapat menurunkan temperatur panel surya sebesar 3,78%. Berdasarkan penelitian dari Perez [4] yang meneliti tentang pemasangan sirip pendingin putus-putus (bersegmen), adanya pengaruh arah aliran udara terhadap performa penurunan panas Photovoltaic surya. Didapatkan temperatur permukaan Photovoltaic dengan arah aliran udara 45° lebih baik dibandingkan arah aliran udara lainnya. Kemudian berdasarkan penelitian sebelumnya yang meneliti tentang simulasi unjuk kerja Photovoltaic sirip lapping dengan simulasi CFD Ansys fluent, arah aliran dapat mempengaruhi penurunan tekanan ketika aliran udara sejajar dengan sirip (90°), penurunan tekanan sangat minimal disemua jenis sirip yang dilakukan uji coba. Kemudian simulasi dipilih untuk mengurangi biaya penelitian dan mempermudah penelitian itu sendiri, sehingga penelitian yang dilakukan lebih fleksibel. Metode CFD Ansys fluent digunakan untuk menjalankan perhitungan sekaligus pemodelan dalam penelitian tersebut [10]-[12].

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dengan penambahan pelat penyerap panas (fins) dibagian bawah

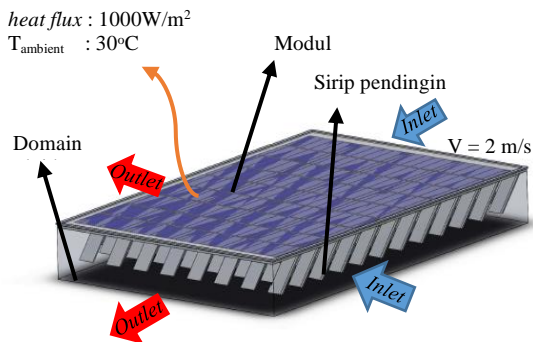
modul surya dapat menurunkan temperatur permukaan panel sehingga berkontribusi pada peningkatan efisiensi konversi listrik. Efektivitas pendinginan sangat dipengaruhi oleh desain dan konfigurasi sirip, karena bentuk sirip menentukan laju perpindahan panas yang dapat dilepaskan ke lingkungan. Dalam banyak kasus, rancangan sirip perlu di optimalkan agar mampu beroperasi secara efektif pada kondisi ruang terbatas maupun variasi operasi tertentu, baik melalui mekanisme konveksi alami, paksa, maupun kombinasi keduanya [13]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada perbandingan kinerja termal heatsink dengan sirip bersegmen dan sirip vertikal pada modul Photovoltaic. Analisis dilakukan dengan memvariasikan sudut arah aliran udara masuk, yaitu 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, dan 90°, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi temperatur permukaan panel. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai desain sirip yang paling efektif untuk mendukung pendinginan pasif modul Photovoltaic dalam kondisi lingkungan dengan arah aliran udara yang dinamis.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis sirip yang berbeda yaitu sirip konvensional (sirip linear) dan sirip bersegmen dengan harapan dapat mempertahankan performa yang konsisten pada kondisi dimana aliran udara berubah-ubah. Untuk menganalisis kinerja kedua sirip tersebut menggunakan metode numerik yaitu *Computation Fluid Dynamic (CFD)* dengan bantuan *software Ansys fluent*.

Gambar 1 memperlihatkan kondisi batas pada simulasi yang telah diteliti menggunakan *Ansys fluent*, dimana terdapat dua arah aliran udara masuk dan keluar yang nantinya divariasikan berdasarkan sudut arah aliran udara masuk. Pada pengujian ini *heat flux* sebagai pengganti radiasi matahari dengan 1000W/m². Modul PV terdiri 5 lapisan material dan ketebalan yang berbeda yakni: kaca, *cell*, *EVA*, *tedlar* dan

aluminium, untuk lebih jelasnya disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Sistem pendingin modul PV

Tabel 1. Propertis bahan lapisan modul PV [13].

Domain	Ketebalan (mm)	Konduktivitas Termal (W/m ² K)	Massa Jenis (kg/m ³)	Panas Spesifik (J/kg°C)
Kaca	3	1.8	3000	500
Cell	0.31	148	2331	677
EVA	0.52	0.353	960	2090
Tedlar	0.13	0.21	1200	1250
Aluminium	0.71	202.41	2719	817

2.1 Computation Fluid Dinamic (CFD)

Computation fluid dynamic (CFD) adalah suatu aplikasi dinamika fluida komputasi yang digunakan untuk melakukan simulasi sifat-sifat aliran fluida serta perpindahan panas. CFD adalah suatu aplikasi cabang dinamika fluida yang menggunakan pengembangan metode numerik, teknik komputasi dan studi kasus dalam aplikasi termodinamika dan mekanika fluida. Dalam implementasi CFD, menggunakan metode iterasi sehingga dapat menggambarkan langkah dalam proses CFD dan memberikan solusi ketika menggunakan analisis CFD dalam memahami fenomena aliran, khususnya dalam penelitian ini menggunakan *software ANSYS Fluent* versi 2025. Pada umumnya proses perhitungan fenomena aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan kontinuitas dan energi. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes [14]-[15]. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut :

Kontinuitas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

Momentum:

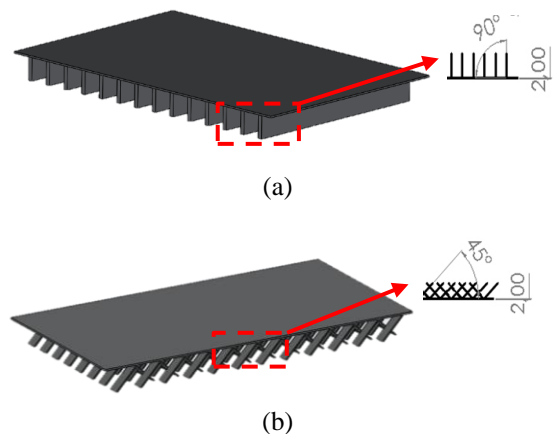
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g \quad (2)$$

Energi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (v (\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\sum_j h_j j_j) \quad (3)$$

CFD dapat membentuk virtual prototype dari suatu sistem atau perangkat dari wujud asli dengan memaparkan gambar data serta memprediksi unjuk kerja dari desain yang dibuat. Menurut penelitian Ikhsan [16] simulasi CFD terdiri dari 3 tahapan yaitu pre-processing, proses solver dan proses post-processing.

2.2 Geometri sirip pendingin



Gambar 2. Konfigurasi sirip (a) vertikal (b) bersegmen

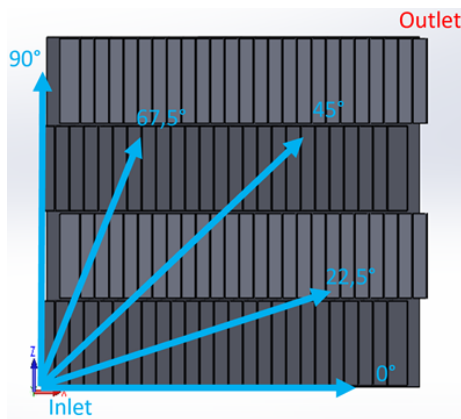
Ketebalan sirip dibuat 2 mm baik itu sirip konvensional maupun sirip bersegmen. Jarak antara sirip satu dan lainnya dibuat sebesar 27,79 mm, kemudian sirip bersegmen divariasikan menjadi 4 variasi. Lebar yang digunakan untuk sirip bersegmen yaitu 250 mm, 125 mm, 62,5 mm dan 31,25 mm dengan sudut kemiringan 45° terhadap sumbu X.

2.3 Konfigurasi Mesh dan Setup Simulasi

Setelah geometri dibuat langkah selanjutnya adalah proses meshing. Meshing pada benda kerja dilakukan dengan jenis *mesh poly-hexcore*. Mesh jenis ini digunakan karena memiliki keuntungan yang lebih fleksibel untuk mengisi bagian yang sulit diisi oleh tipe mesh lainnya [17]. Bidang antara fluida dan sirip diberikan lapisan batas untuk memaksimalkan meshing yang dilakukan. Pengujian ini dilakukan dengan model *steady state*, selain itu beberapa kondisi batas digunakan dalam penelitian ini. Kondisi batas tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi batas simulasi

Kondisi batas	Nilai
Heat flux	1000 W/m ²
Temperatur lingkungan	30°C
Kecepatan udara	2 m/s
Ketebalan sirip	2 mm
Material sirip	aluminium
Variasi sudut arah aliran	0°, 22,5°, 45°, 67,5°, dan 90°



Gambar 3. Arah aliran udara

Model penelitian ini menggunakan heatsink sirip bersegmen dengan tujuan untuk mempertahankan kinerja yang konsisten dalam kondisi dimana aliran dan arah angin bervariasi terus menerus sesuai dengan kondisi lingkungan sebenarnya. Selanjutnya hasil simulasi tersebut akan dibandingkan dengan heatsink sirip vertikal yang dimana jenis sirip ini merupakan sirip konvensional.

Pada konfigurasi sirip vertikal, aliran udara cenderung bergerak lurus mengikuti arah datangnya aliran. Ketika sudut aliran berubah, sebagian besar udara hanya melewati bagian atas sirip tanpa banyak mengalami gangguan aliran (*flow disturbance*). Kondisi ini menyebabkan perpindahan panas tidak optimal pada beberapa area, terutama pada bagian tengah dan dasar sirip, sehingga peningkatan sudut aliran memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap distribusi temperatur.

Sementara itu, pada sirip bersegmen, variasi lebar segmen yang berbeda-beda menyebabkan aliran udara mengalami pemecahan (*air splitting*) dan perubahan

arah lokal ketika melewati celah antar segmen. Fenomena ini menimbulkan vorteks kecil serta peningkatan turbulensi lokal yang mampu memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi. Oleh karena itu, meskipun arah aliran udara divariasikan pada sudut 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, hingga 90°, distribusi temperatur pada sirip bersegmen cenderung lebih merata dan tidak terlalu sensitif terhadap perubahan sudut aliran. Dengan demikian, kombinasi sudut aliran udara dan variasi segmen pada heatsink bersegmen memberikan keuntungan berupa pola aliran yang lebih kompleks namun stabil, sehingga kinerja pendinginan dapat dipertahankan pada berbagai kondisi arah angin.

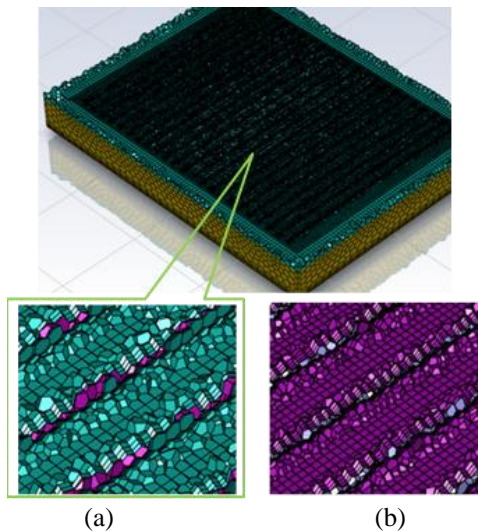
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Mesh Independence Test (MIT)

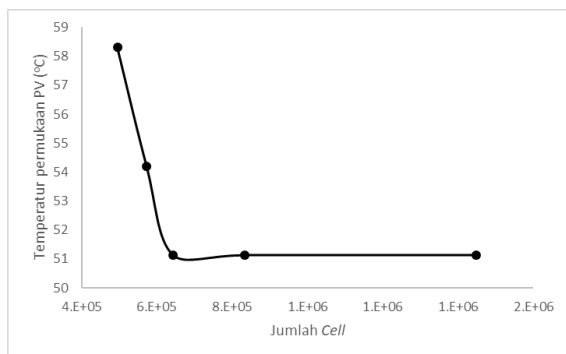
Merupakan salah satu metode yang cukup umum digunakan dalam memverifikasi ukuran dan jumlah mesh tidak akan mempengaruhi hasil dari simulasi. Setiap cell hasil meshing akan dilakukan perhitungan dengan persamaan kontinuitas, momentum dan energy, sehingga nantinya akan menghasilkan solusi yang diinginkan. Semakin kecil proses diskritisasi domain, maka hasil luas permukaan yang diperoleh akan semakin akurat bergantung dengan kasus yang ingin diselesaikan. Namun jika diskritisasi domain ini terlalu banyak, maka persamaan yang dihasilkan akan semakin banyak dan membutuhkan proses komputasi yang terlalu lama. Oleh karena itu ukuran dan jumlah mesh tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis^[18]. Hal ini terjadi karena bentuk dari geometri heatsink cukup rumit dan sangat tipis. Dalam kasus ini digunakan lima parameter ukuran meshing yang berbeda sehingga menghasilkan jumlah meshing yang berbeda-beda juga.

Ketika ukuran mesh diperkecil, maka jumlah cell akan meningkat. Dapat dilihat dari Gambar 4(a) jumlah lapisan domain geometri hanya ada 2, berbanding tebal dengan Gambar 4(b) saat jumlah

mesh meningkat, maka lapisan domain geometri menjadi 4 lapisan atau layers. Dari kelima parameter ukuran meshing yang digunakan dilakukanlah MIT didapat 5 data yang dijadikan acuan untuk menilai kualitas meshing disajikan dalam Gambar 6 grafik



Gambar 4. Jenis mesh Poly-hexcore (a) ukuran sedang, (b) ukuran kecil



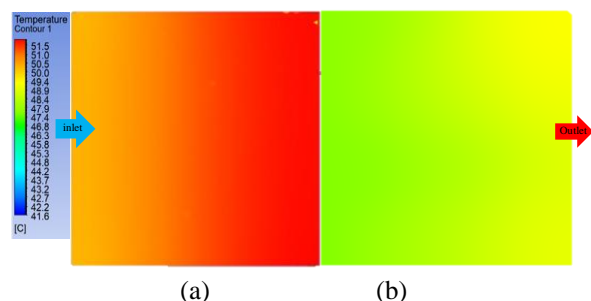
Gambar 5. Grafik perbandingan temperatur permukaan photovoltaic terhadap jumlah cell

Grafik pada gambar 5 di atas menggambarkan hubungan antara temperatur permukaan PV dengan jumlah sel yang digunakan dalam sistem. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pada awalnya, seiring dengan peningkatan jumlah sel, temperatur permukaan PV mengalami penurunan yang tajam. Penurunan ini terjadi pada titik sekitar 6×10^5 jumlah sel, di mana temperatur permukaan PV turun dari sekitar 58°C menjadi sekitar 52°C . Hal ini hanya berlaku untuk kasus perhitungan temperatur Photovoltaic. Setelah titik tersebut, perubahan temperatur menjadi

sangat stabil dan hampir tidak berubah meskipun jumlah sel terus meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa setelah mencapai jumlah sel tertentu, peningkatan jumlah sel lebih lanjut tidak lagi memberikan dampak signifikan terhadap temperatur permukaan PV.

3.2 Analisis Temperatur Permukaan Photovoltaic

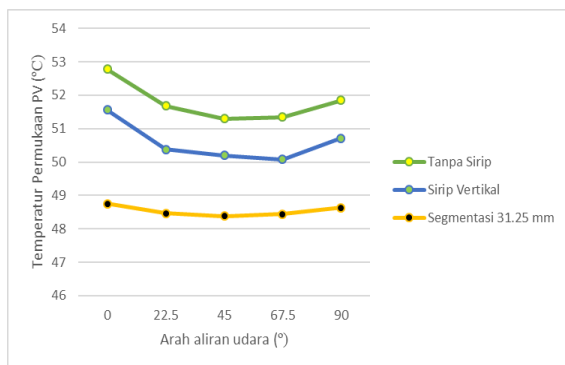
Bentuk sirip pendingin berpengaruh dalam menurunkan temperatur permukaan PV, dimana dalam penelitian ini digunakan sirip vertikal dan sirip bersegmen. Selain itu arah datangnya udara masuk juga berpengaruh pada fenomena aliran yang terjadi dalam sirip pendingin yang digunakan. Sehingga dilakukan juga variasi aliran udara untuk mengetahui efek arah aliran terhadap performa sirip dalam menurunkan temperatur permukaan Photovoltaic. Dalam hal ini memperlihatkan seberapa dominan pengaruh antara bentuk sirip (vertikal dan bersegmen) dengan sudut arah aliran. Berikut ini grafik perbandingan temperatur permukaan PV sirip vertikal dengan sirip bersegmen.



Gambar 6. Distribusi temperatur PV menggunakan heatsink berbeda (a) sirip vertikal, (b) sirip bersegmen

Distribusi temperatur permukaan PV secara detail dapat dilihat dalam Gambar 6(a) dan 6(b) masing-masing untuk sirip vertikal dan segementasi. Untuk sirip vertikal didominasi dengan warna merah yang mengindikasikan bahwa permukaan PV memiliki temperatur maksimum 51°C . Terlihat adanya permukaan PV yang lebih dingin di daerah mendekati arah aliran udara masuk (inlet). Hal tersebut terjadi dikarenakan udara inlet dengan temperatur 30°C kecepatan 1m/s mengenai sirip PV sehingga dapat mendinginkan temperatur

PV dan sirip tersebut. Semakin menjauhi arah inlet atau mendekati daerah outlet maka terjadi peningkatan suhu permukaan PV. Sedangkan PV dengan sirip bersegmen didominasi dengan warna kuning yang menunjukkan temperatur maksimum permukaan PV sebesar 49°C. Dari penjelasan tersebut disimpulkan bahwa pendinginan PV menggunakan heatsink sirip bersegmen lebih baik dalam menurunkan temperatur PV dibandingkan sirip vertikal. Untuk kajian lebih lanjut disajikan dalam grafik 7.

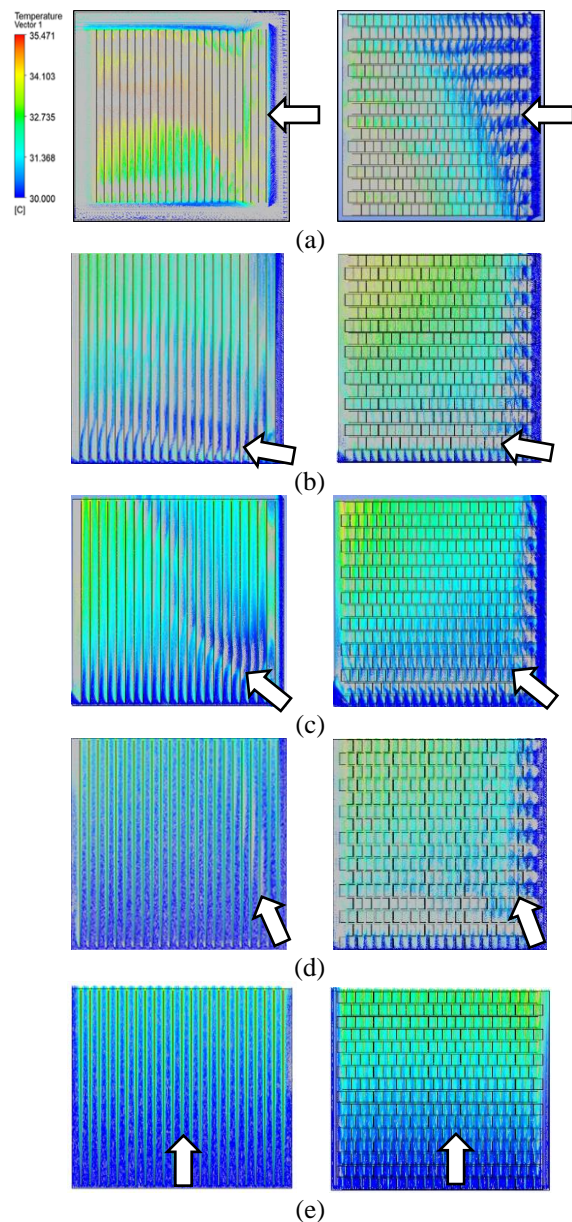


Gambar 7. Grafik perbandingan temperatur permukaan PV terhadap sudut arah aliran udara

Sudut arah aliran udara divariasikan menjadi 5 parameter yakni 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, dan 90°. Dari hasil pengujian didapatkan temperatur permukaan PV tertinggi 52,77 °C yakni PV tanpa adanya heatsink atau pendinginan dengan arah aliran udara 0°. Sedangkan temperatur terendah 48,37°C berada pada sirip bersegmen dengan arah aliran 45°. Dapat dilihat bahwa sudut arah aliran dapat mempengaruhi kinerja PV, pada skenario sudut 0° merupakan hasil pengujian yang paling buruk didapatkan sedangkan skenario arah 45 ° merupakan hasil yang paling baik. Untuk masing masing jenis pengujian yakni tanpa heatsink, sirip vertikal dan sirip bersegmen didapatkan selisih temperatur permukaan PV antara sudut 0° (skenario paling buruk) terhadap 45 ° (skenario paling baik) yakni 1,7°C, 1,5°C dan 0,5 °C berturut-turut. Jika diamati lebih signifikan sirip bersegmen memiliki selisih temperatur yang tidak terlalu signifikan terhadap variasi sudut arah aliran hal ini ditunjukkan dengan

selisih temperatur PV maksimal dari 0,5°C. Sehingga dapat disimpulkan bahwa heatsink jenis sirip bersegmen sangat baik digunakan untuk skenario arah aliran udara yang tidak beraturan seperti kondisi lingkungan yang sebenarnya. Untuk kajian lebih detail dapat dilihat dalam analisis fluida menggunakan vektor temperatur.

3.3 Analisis Fluida Berdasarkan Vektor Temperatur



Gambar 8. Vektor temperatur aliran udara (a) arah aliran udara 0°, (b) arah aliran udara 22,5°, (c) arah aliran udara 45°, (d) arah aliran udara 67,5°, (e) arah aliran udara 90°.

Analisis ini bertujuan melihat fenomena aliran di daerah permukaan sirip vertikal maupun bersegmen. Arah aliran udara dilingkungan terbuka (*outdoor*) umumnya tidak menentu, sehingga sangat berpengaruh terhadap kemampuan heatsink dalam menurunkan temperatur permukaan Photovoltaic. Kondisi ini berkaitan erat dengan bentuk dan orientasi geometri sirip terhadap arah aliran. Ketika arah aliran udara sejajar dan masuk langsung melalui bagian bawah sirip, mekanisme pendinginan cenderung lebih efektif. Namun, apabila arah aliran berlawanan dengan orientasi sirip, terbentuk daerah stagnasi (*stagnation zone*) yang menyebabkan aliran terhambat pada titik tertentu. Pada daerah stagnasi, kecepatan fluida menurun sehingga koefisien perpindahan panas konveksi menjadi lebih kecil. Akibatnya, proses pelepasan panas dari sirip ke udara tidak terjadi secara optimal. Fenomena ini dapat diamati pada Gambar 8.

Pada Gambar 8(a), untuk sirip vertikal dengan arah aliran 0° , terlihat bahwa sebagian aliran terhenti pada bagian depan sirip sehingga udara tidak dapat masuk ke sela-sela sirip. Kondisi ini menimbulkan penumpukan panas pada bagian tengah sirip yang ditunjukkan oleh dominasi vektor berwarna merah dan kuning. Secara teoritis, hal ini sesuai dengan konsep konveksi paksa, dimana laju perpindahan panas sangat bergantung pada kecepatan aliran dan karakter aliran di sekitar permukaan (*boundary layer*). Ketika aliran melemah, ketebalan *boundary layer* meningkat dan resistansi termal menjadi lebih besar. Sebaliknya, pada sirip bersegmen, aliran udara dapat masuk melalui celah antar segmen sehingga membentuk pola sirkulasi lokal. Pemecahan aliran ini menimbulkan vorteks kecil dan meningkatkan turbulensi lokal yang berdampak pada meningkatnya koefisien perpindahan panas konveksi. Hal ini terlihat dari dominasi warna biru yang menunjukkan temperatur lebih rendah pada daerah sirip.

Pada variasi sudut aliran $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, dan 90° , seperti ditunjukkan pada

Gambar 8(b)–(e), baik pada sirip vertikal maupun bersegmen terlihat distribusi temperatur yang lebih seragam. Hal ini terjadi karena udara paksa berkontak langsung dengan permukaan sirip, sehingga mekanisme konveksi paksa dapat berlangsung lebih efektif dan menyebabkan penurunan temperatur permukaan Photovoltaic. Dengan demikian, perbedaan karakter aliran antara sudut 0° dan 45° menjelaskan mengapa temperatur permukaan Photovoltaic pada sudut 0° lebih tinggi dibandingkan sudut lainnya. Kondisi ini memperkuat bahwa geometri sirip bersegmen lebih adaptif terhadap variasi arah aliran karena mampu menjaga terjadinya pencampuran udara dan mengurangi terbentuknya daerah stagnasi.

4. Kesimpulan

Unjuk kerja heatsink dengan sirip vertikal dan sirip bersegmen telah dianalisis menggunakan metode numerik berbasis CFD pada ANSYS Fluent. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi sirip bersegmen mampu menurunkan temperatur maksimum permukaan PV hingga 3°C (sekitar 5,6%) dibandingkan sirip vertikal pada kondisi arah aliran udara 0° . Variasi sudut arah aliran terbukti memberikan pengaruh yang lebih besar pada sirip vertikal, ditunjukkan oleh perubahan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan sirip bersegmen. Hal ini mengindikasikan bahwa sirip vertikal sangat bergantung pada kesesuaian arah aliran terhadap orientasi sirip. Sebaliknya, sirip bersegmen menunjukkan kinerja yang lebih stabil pada berbagai sudut aliran, karena keberadaan celah segmen mampu memecah aliran, meningkatkan pencampuran udara, serta mengurangi terbentuknya daerah stagnasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa heatsink dengan sirip bersegmen lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan dengan arah angin yang dinamis, sehingga lebih efektif dalam menjaga temperatur permukaan PV tetap rendah dibandingkan sirip vertikal. Temuan ini menjadi dasar bahwa modifikasi geometri sirip merupakan

strategi yang potensial untuk meningkatkan kinerja pendinginan pasif pada sistem Photovoltaic.

Referensi

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral “Pemanfaatan Energi Surya Di Indonesia”, 3 Mei 2010. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemanfaatan-energi-surya-di-indonesia>. Diakses pada 27 Agustus 2022
- [2] Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol Energy* 2009;83:614–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
- [3] Soliman AMA, Hassan H, Ookawara S. An experimental study of the performance of the solar cell with heat sink cooling system. *Energy Procedia* 2019;162:127–35. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.014>.
- [4] Perez, H., Bassam, A., Banuelos, M., dan Lopez, P. 2021. “Thermal performance of a discontinuous finned heatsink profile for PV passive cooling” *Mexico : University Autonoma de Yucatan*
- [5] Nassar YF, Salem AA. The reliability of the photovoltaic utilization in southern cities of Libya. *Desalination* 2007;209:86–90. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.013>.
- [6] Saly V, Ruzinsky M, Redi P. "Indoor study and ageing tests of solar cells and encapsulations of experimental modules," 24th International Spring Seminar on Electronics Technology. Concurrent Engineering in Electronic Packaging. ISSE 2001. Conference Proceedings (Cat. No.01EX492), 2001, pp. 59-62. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2001.931012>.
- [7] Royo P, Ferreira VJ, Lopez-Sabir ´ on ´ AM, Ferreira G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. *Energy* 2016;101:174–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.101>.
- [8] Elbreki, A.M., Sopian, K., Fazlizan, A., Ibrahim, A., 2020. “An innovative technique of passive cooling PV module using lapping fins and planner reflector” *Malaysia : university kebangsaan Malaysia*
- [9] Sjahrudin, Charles., Bizzy, Irwin. 2020. “Pengaruh Peningkatan Efisiensi Pemasangan Heatsink Pada Panel Photovoltaic Tipe Polycrystalline” Palembang : Universitas Sriwijaya
- [10] Yonanda, A., Amrizal., Hadi Prayitno. 2020."Karakteristik Kolektor Surya Hybrid PV/T Pelat Datar Aliran Spiral Dan Serpentine Menggunakan Metode Simulasi CFD". Bandar Lampung: Universitas lampung.
- [11] Yonanda, A., Amrizal., Harmen., Riszal, Akhmad., Ibrahim, Fauzi. 2022. " Photovoltaic (PV) thermal performance simulation using segmentation lapping fin passive cooling". Bandar Lampung : Universitas Lampung.
- [12] Yonanda, A., Amrizal., 2021. “Karakteristik Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Spiral Menggunakan Metode Simulasi CFD” Bandar Lampung : Universitas Lampung.
- [13] Soliman AMA, Hassan H. 3D study on the performance of cooling technique composed of heat spreader and microchannels for cooling the solar cells. *Energy Convers Manag* 2018;170:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.075>.
- [14] Incropera, F.P. 2007. “Fundamental of Heat and Mass Transfer. Sixth Edition”. New York : Jhon Wiley and Sons.

- [15] Cengel, Yunus A., dan Michael A. 2002. "Thermodynamics An Engineering Approach". New York : McGraw-Hill Education
- [16] Ikhsan, M. Rizki., Siska, Madschen., Hidayah, Nur. 2021, "Simulasi Karakteristik Termal Pada Rumah Banjar Bubungan Tinggi Dengan Komputasi Dinamika Fluida" Banjarmasin : Universitas Sari Mulia
- [17] Hetal Kotwal, et al.2013, "CFD Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger-A Review", Internatio-nal Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 2, Issue 2, March 2013
- [18] Nasir, Kurniawan. 2016. "Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kerugian Tekanan Pada Saluran Udara" Semarang : Universitas Wahid Hasyim