PENGARUH PENDINGINAN PASIF *FIN* ALUMINIUM TERHADAP TEMPERATUR DAN KINERJA PANEL MONOKRISTALIN 30WP

Bergas Perwira[1, *], Abdurrahman[1], Muhammad Farhan Kurniawan[1]
Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, Jawa Tengah, 58315
**E-mail: bergasperwira@gmail.com*

ABSTRAK

Temperatur operasi yang tinggi dapat menurunkan tegangan dan daya keluaran panel surya. Penelitian ini mengevaluasi *fin* aluminium sebagai pendingin pasif melalui pengujian komparatif dua panel monokristalin berdaya nominal 30 W dengan spesifikasi identik. Satu panel dipasangi tiga *fin rectangular* pada sisi belakang, sedangkan panel pembanding dioperasikan tanpa *fin*. Temperatur permukaan, tegangan, dan arus diukur setiap jam pada 23 Mei 2026 pukul 08.30-16.30 WIB, intensitas radiasi matahari diambil dari PVGIS 2023, serta daya dan efisiensi panel dihitung. Hasil menunjukkan temperatur rata-rata panel ber-*fin* 40,04 °C, lebih rendah 5,17 °C dibandingkan panel tanpa *fin* yang memiliki temperatur rata-rata 45,21 °C. Penurunan maksimum mencapai 12 °C pada pukul 11.30 WIB dengan temperatur pada panel ber-*fin* 42 °C sedangkan tanpa *fin* mencapai 54 °C. Tegangan rata-rata meningkat dari 19,73 V menjadi 20,40 V, sedangkan perubahan arus tidak konsisten. Daya rata-rata meningkat sekitar 2,58 W dari 19,22 W menjadi 21,80 W dan efisiensi hasil perhitungan meningkat dari 18,89% menjadi 21,67%. Efisiensi *fin* berada pada rentang 92%-94% rata-rata yaitu 92,89%. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena menggunakan data PVGIS 2023 yang tidak mempresentasikan kondisi *real-time*, sehingga membatasi akurasi perhitungan efisiensi panel.

Kata kunci: Pendinginan pasif, *Fin* aluminium, Panel surya, Temperatur, Daya keluaran

1. PENDAHULUAN

Sinar matahari menjadi salah satu sumber energi yang banyak diperhatikan karena mudah didapat, melimpah, dan bersih. Dengan berkembangnya teknologi, sinar matahari dapat dikonversikan menjadi energi listrik dengan panel surya. Panel surya mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik dengan efisiensi yang bervariasi tergantung jenisnya [1]. Panel surya adalah alat yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek *photovoltaic*. Pada dasarnya, proses ini terjadi ketika sel semikonduktor menyerap foton, lalu menghasilkan pasangan *electron hole* yang memunculkan beda potensial di terminal sel. Dari sini, dapat dipahami bahwa panel surya bukan hanya sekadar alat penangkap cahaya, tetapi sebagai sistem konversi energi yang bekerja secara terus-menerus selama menerima radiasi matahari [2].

Panel surya monokristalin banyak digunakan karena efisiensinya yang tinggi, namun kenaikan temperatur dapat menurunkan efektivitasnya. Oleh karena itu, panel surya dapat dianggap sebagai sistem *thermal electrical* yang saling terkait. Sinar matahari masuk sebagai radiasi, lalu sebagian diserap menjadi listrik dan sisanya menjadi energi panas. Panas tersebut harus dibuang melalui sistem perpindahan panas agar temperatur panel tidak naik terlalu tinggi [3].

Temperatur operasi yang tinggi dapat memengaruhi kinerja listrik panel fotovoltaik, khususnya tegangan keluaran. Pada sel silikon, peningkatan temperatur menyebabkan penyempitan energi celah pita (*bandgap narrowing effect*), sehingga tegangan yang dihasilkan sel menurun. Penurunan tegangan tersebut terlihat pada *open circuit voltage* (V_{oc}), dengan

penelitian *Hwang et al.* melaporkan koefisien temperatur V_{oc} sebesar −0,27%/K, sehingga kenaikan temperatur dapat menurunkan tegangan dan pada akhirnya mengurangi daya keluaran panel [4]. Kenaikan temperatur pada permukaan panel surya juga berkaitan langsung dengan turunnya efisiensi dan reliabilitas jangka panjang, sehingga metode pendinginan terus dikembangkan untuk menangani masalah tersebut [5].

Metode pendinginan panel dapat dikategorikan menjadi sistem aktif yang memerlukan komponen eksternal seperti pompa atau kipas, serta sistem pasif yang mengandalkan pelepasan panas alami ke lingkungan tanpa mengkonsumsi daya tambahan. Di antara berbagai pendekatan pasif, penambahan *heatsink* atau *fin* di bagian belakang panel menjadi solusi yang sering diteliti untuk memaksimalkan pelepasan panas secara konduksi dan konveksi [6]. *Fin* dipasang untuk menyerap panas dari panel surya dan didinginkan oleh udara sekitar. Akibatnya, panas pada panel surya berkurang dan efisiensi meningkat [7]. Metode ini tidak memerlukan energi tambahan, tidak rumit, dan cukup efisien. Meskipun begitu, penerapan metode ini pada panel surya masih harus dibuktikan secara lebih lanjut melalui perbandingan langsung antara panel surya yang menggunakan *fin* dan tidak.

Efektivitas pendinginan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh penggunaan *fin*, tetapi juga oleh konfigurasi, material, dan dimensinya. Konfigurasi serta jarak antar *fin* menentukan luas perpindahan panas dan sirkulasi udara di sekitar *fin*, sedangkan material aluminium berperan dalam menghantarkan panas dari panel ke lingkungan. Selain itu, Panjang, lebar, ketebalan, jumlah dan jarak antar *fin* juga mempengaruhi kemampuan pelepasan panas. Dengan demikian pemilihan material, konfigurasi, dan dimensi dari *fin* tersebut juga mempengaruhi seberapa efektif pendinginan tersebut [8].

Cabrera-Escobar et al. meneliti penggunaan *heatsink* aluminium dan tembaga pada panel fotovoltaik monokristalin dengan konfigurasi *fin* berlubang dan tidak berlubang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *fin* aluminium tanpa perforasi menurunkan temperatur rata-rata sebesar 2,10 K dan meningkatkan efisiensi sebesar 1,05%, sedangkan *fin* aluminium berlubang menurunkan temperatur sebesar 2,49 K dan meningkatkan efisiensi sebesar 1,25%. Perforasi meningkatkan sirkulasi udara dan perpindahan panas konveksi sehingga pelepasan panas dari panel menjadi lebih efektif [9].

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *fin* aluminium sebagai metode pendinginan pasif terhadap temperatur dan daya keluaran panel surya monokristalin 30 Wp. Pengujian dilakukan secara komparatif dengan membandingkan panel yang dilengkapi *fin* aluminium dan panel tanpa *fin* pada kondisi operasi luar ruangan yang sama. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan temperatur panel serta respons daya keluaran yang dihasilkan akibat penerapan pendinginan pasif menggunakan *fin* aluminium.

2. METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen komparatif. Dua panel surya monokristalin berdaya maksimum 30 W dipasang pada satu rangka dengan orientasi yang sama. Satu panel digunakan sebagai kontrol tanpa pendinginan tambahan, sedangkan panel lainnya dipasangi tiga *fin* aluminium *rectangular* pada sisi belakang menggunakan perekat termal. Pengujian dilaksanakan pada 23 Mei 2026 dari pukul 08.30 sampai 16.30 WIB dengan interval satu jam. Kedua panel dihubungkan ke beban aki melalui kabel yang sama jenisnya.

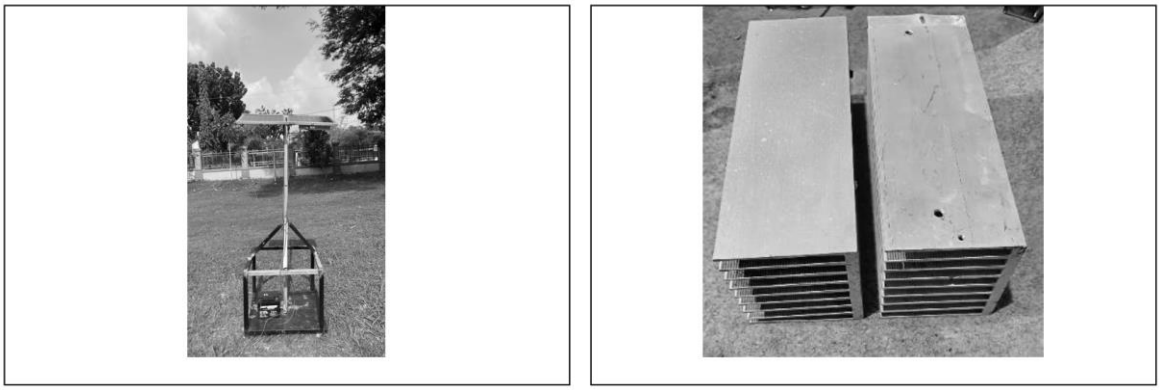
Tabel 1. menyajikan spesifikasi dari kedua panel surya dan juga *fin* yang digunakan sebagai pendinginan pasif. Panel surya yang digunakan merupakan panel monokristalin 30 Wp dengan *rated maximum power* (Pmax) 30 W, *maximum power voltage* (Vmp) 18 V, *open circuit voltage* (Voc) 22,5 V, *maximum power current* (Imp) 1,66 A, *short circuit current* (Isc) 1,8 A, toleransi daya ±3%, *maximum system voltage* 1500 V, *operating temperature* −40 °C hingga +85 °C, serta memiliki dimensi 430 × 400 × 16 mm (panjang × lebar × tebal). Untuk sistem pendinginan,

digunakan *fin rectangular* berbahan aluminium dengan 3 modul *fin*, masing-masing berukuran 180 x 60 x 65 mm (Panjang x lebar x tinggi). 1 modul *fin* terdiri dari 9 buah *fin*, masing-masing berukuran 180 × 65 × 1,65 mm (panjang × lebar × tebal) dan jarak antar-*fin* 7,08 mm. Jarak antar modul *fin* 60 mm.

Gambar 1. menunjukkan konfigurasi komponen tersebut, dimana pada bagian (a) terlihat rangka pengujian yang menopang kedua panel surya, sedangkan pada bagian (b) menunjukkan *fin* aluminium yang digunakan pada proses pengujian.

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya dan *Fin*

Komponen	Parameter	Nilai
Panel surya	Jenis sel	Monokristalin
Panel surya	*Rated Maximum Power (Pmax)*	30 W
Panel surya	*Maximum Power Voltage (Vmp)*	18 V
Panel surya	*Open Circuit Voltage (Voc)*	22,5 V
Panel surya	*Maximum Power Current (Imp)*	1,66 A
Panel surya	*Short Circuit Current (Isc)*	1,8 A
Panel surya	*Power Tolerance*	±3%
Panel surya	*Maximum System Voltage*	1500 V
Panel surya	*Operating Temperature*	−40 ~ +85 °C
Panel surya	Dimensi (Panjang × lebar × tebal)	430 mm × 400 mm × 16 mm
Fin	Tipe dan material	*Rectangular*, aluminium
Fin	Dimensi (Panjang × lebar × tebal)	180 mm × 65 mm × 1,65 mm
Fin	Jarak antar *fin*	7,08 mm
Modul *fin*	Jumlah	3 buah
Modul *fin*	Jumlah fin dalam 1 modul	9 buah
Modul *fin*	Jarak antar modul	60 mm
Modul *fin*	Dimensi (Panjang × lebar × tinggi)	180 mm × 60 mm × 65 mm



(a) Rangka dan dua panel surya (b) Fin aluminium rectangular

Gambar 1. Konfigurasi Pengujian dan *Fin* Aluminium

Thermal gun digunakan untuk mengukur temperature permukaan panel, sedangkan tegangan dan arus diukur menggunakan *multimeter* dan aki sebagai beban (*load*). *Pyranometer* seharusnya digunakan untuk mengukur intensitas radiasi matahari, tetapi karena keterbatasan alat, data diambil menggunakan PVGIS tanggal 23 Mei 2023 pada jam yang bersesuaian karena data yang digunakan dalam laporan tersedia sampai tahun tersebut. Sedangkan daya dan efisiensi panel merupakan hasil perhitungan berbasis data. Penggunaan data intensitas radiasi matahari dari PVGIS sebagai pengganti pyranometer merupakan keterbatasan dari penelitian

ini. Karena data PVGIS merupakan data sekunder yang tidak merepresentasikan kondisi radiasi matahari secara langsung dan *real-time* di lokasi pengujian, sehingga dapat mengurangi akurasi perhitungan efisiensi panel.

Daya keluaran dan efisiensi panel dihitung menggunakan Pers. (1) [10] dan Pers. (2) [10]. Luas aktif panel yang digunakan dalam perhitungan adalah 0,43 m × 0,40 m atau 0,172 m².

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \tag{1}$$

$$\eta_p = \left(V_{pv} \times \frac{I_{pv}}{I_{rad} \times A}\right) \times 100\% \tag{2}$$

Untuk menghitung rumus efisiensi, kita perlu mencari *heat transfer coefficient* terlebih dahulu. Berikut adalah cara untuk mendapatkan *heat transfer coefficient:*

1. Mencari *Coefficient of thermal expansion* dengan Pers. (3) yaitu [11]:

$$Bt = \frac{2}{T_p + T_{air}} \tag{3}$$

2. Menentukan Grashof number untuk mengetahui apakah konveksinya kuat atau lemah dengan Pers. (4) yaitu [11]:

$$Gr = g \times Bt \times \left(T_p - T_{air}\right) \times \left(\frac{S^3}{vS^2}\right) \tag{4}$$

3. Menentukan Rayleigh number untuk menentukan karakteristik perpindahan panas secara konveksi dengan Pers. (5) yaitu [11]:

$$Ra = Gr \times Pr \tag{5}$$

4. Menentukan Nusselt number untuk mengetahui seberapa bagus perpindahan panasnya secara konveksi dengan Pers. (6) yaitu [11]:

$$Nu = 0{,}645 \times \left(Ra \times \frac{S}{w}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{6}$$

5. Menentukan *Heat transfer coefficient* untuk mengetahui seberapa bagus *fin* membuang panas ke udara dengan Pers. (7) yaitu [11]:

$$h = Nu \times \frac{k}{w} \tag{7}$$

Selanjutnya adalah menghitung efisiensi *fin* dengan menggunakan cara sebagai berikut:

1. Mencari *Corrected fin length* untuk memperhitungkan perpindahan panas yang terjadi pada ujung *fin*. Sehingga kondisi aktual dapat dipresentasikan dengan lebih baik. Digunakan Pers. (8) sebagai berikut [12]:

$$L_c = L + \left(\frac{t}{2}\right) \tag{8}$$

2. Menghitung *fin profile area* untuk menentukan luas permukaan *fin* yang berperan dalam pelepasan panas ke lingkungan melalui konveksi dengan Pers. (9) yaitu [12]:

$$A_p = t \times L \tag{9}$$

3. Menghitung efisiensi *fin* dengan Pers. (10) yaitu [12]:

$$\eta f = \left(\frac{\tanh\left(\left(2\times\frac{h}{k\times A_P}\right)^{\frac{1}{2}}\times L_C^{\frac{3}{2}}\right)}{\left(2\times\frac{h}{k\times A_P}\right)^{\frac{1}{2}}\times L_C^{\frac{3}{2}}} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Data disajikan sebagai deret waktu dan diringkas menggunakan nilai rata-rata, rentang, serta selisih antara panel dengan *fin* dan panel tanpa *fin*. Karena pengujian hanya dilakukan selama satu hari tanpa pengulangan eksperimen, analisis yang digunakan bersifat deskriptif dan tidak dimaksudkan sebagai uji signifikansi statistik.

3. PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian

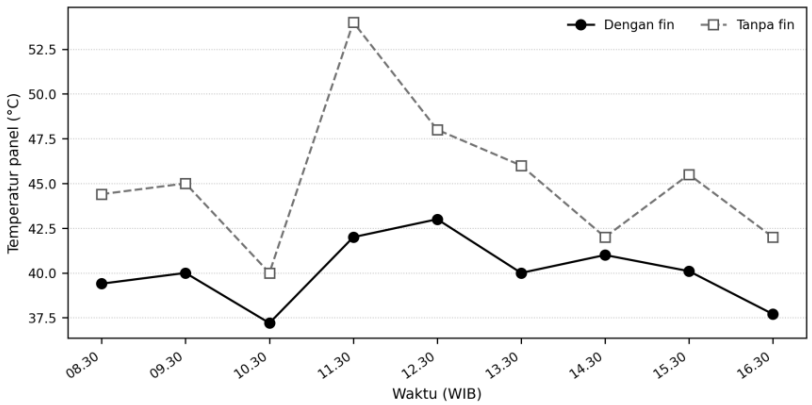
Tabel 2. menunjukkan hasil perbandingan antara panel yang memiliki *fin* dan yang tidak. Penggunaan *fin* mampu menurunkan tempetatur panel rata-rata dari 45,21°C menjadi 40,04 °C. Kondisi tersebut diikuti oleh peningkatan tegangan, arus, daya keluaran, dan juga efisiensi dari panel surya itu sendiri. Efisiensi dari *fin* juga tercatat sekitar 92-94% yang menunjukkan bahwa penggunaan *fin* mampu menurunkan temperatur panel dan meningkatkan efisiensinya.

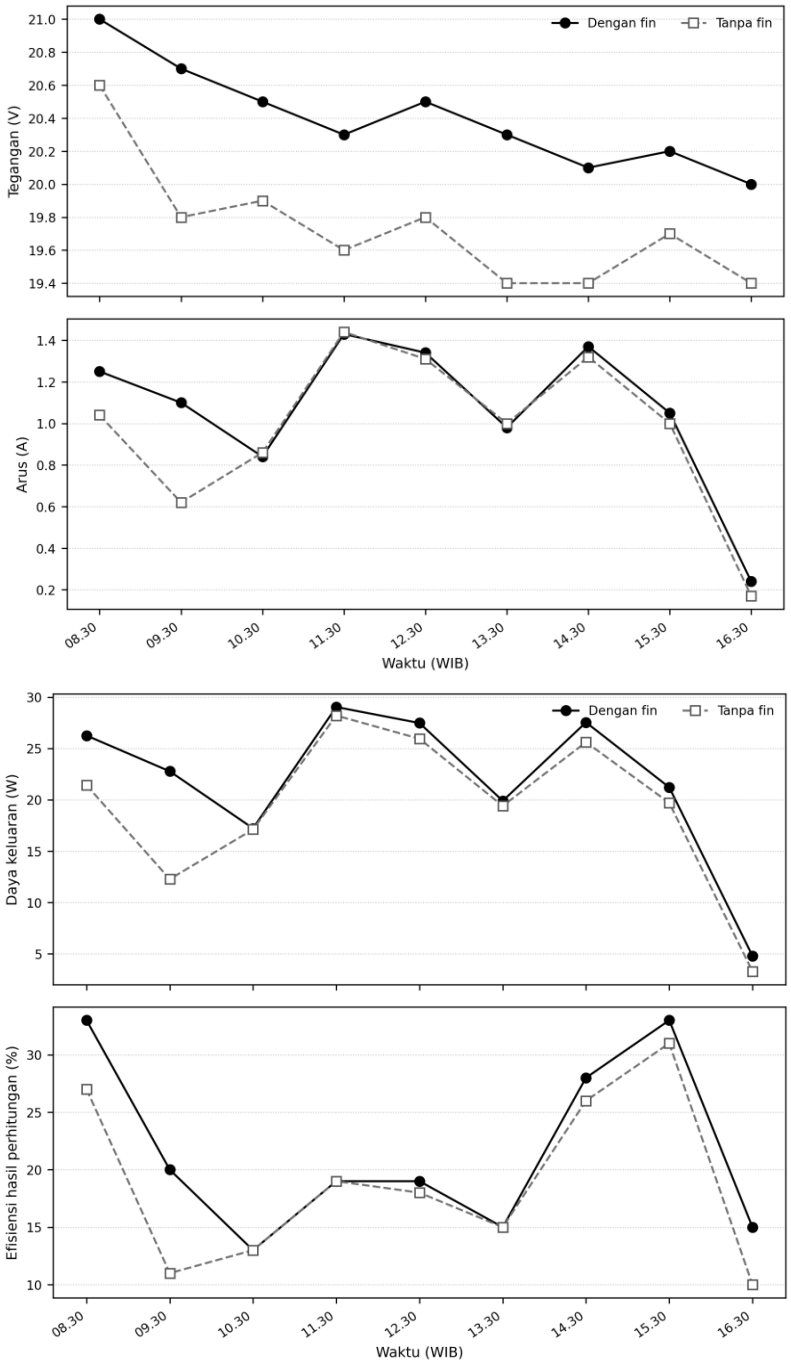
Tabel 2. Ringkasan Hasil Pengujian

Parameter	Dengan *fin*	Tanpa *fin*	Selisih rata-rata	Rentang pengamatan
Temperatur panel	40,04 °C	45,21 °C	-5,17 °C	37,2-54,0 °C
Tegangan	20,40 V	19,73 V	+0,67 V	19,4-21,0 V
Arus	1,07 A	0,97 A	+0,1 A	0,17-1,44 A
Daya keluaran	21,80 W	19,22 W	+2,58 W	3,30-29,03 W
Efisiensi panel*	21,67%	18,89%	+2,78 poin	10-33%
Efisiensi *fin*	92,89%	-	-	92-94%

**Efisiensi panel merupakan hasil perhitungan menggunakan intensitas radiasi PVGIS, bukan pengukuran radiasi langsung.*

Gambar 2. menyajikan deret waktu perbandingan temperatur, tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi antara panel surya dengan *fin* dan tanpa *fin* selama pengujian pukul 08.30–16.30 WIB. Kelima grafik tersebut digunakan untuk menunjukkan perubahan masing-masing parameter serta perbedaan kinerja kedua panel pada setiap waktu pengamatan.

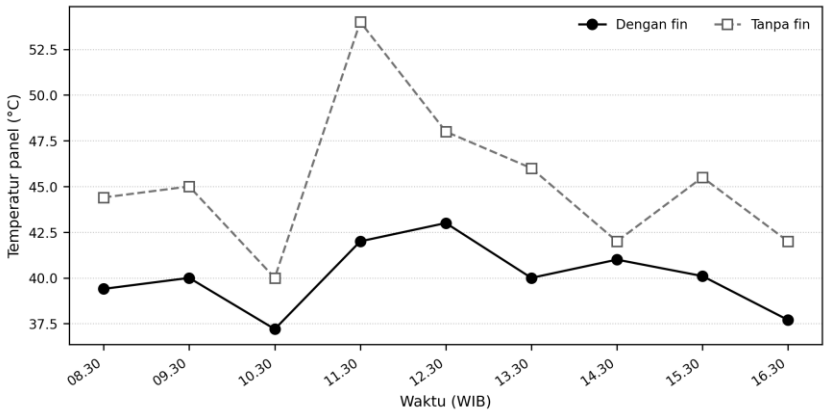




Gambar 2. Deret waktu perbandingan temperatur, tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi panel surya dengan fin dan tanpa fin pada pukul 08.30–16.30 WIB.

B. Temperatur Panel

Gambar 3. memperlihatkan bahwa temperatur panel dengan *fin* lebih rendah pada seluruh waktu pengamatan. Temperatur rata-rata menurun dari 45,21 °C menjadi 40,04 °C, atau berkurang 5,17 °C (11,43%). Penurunan terbesar terjadi pukul 11.30 WIB, yaitu dari 54 °C pada panel tanpa fin menjadi 42 °C pada panel dengan *fin*. Selisih 12 °C tersebut setara dengan penurunan 22,2% terhadap temperatur panel tanpa *fin*.

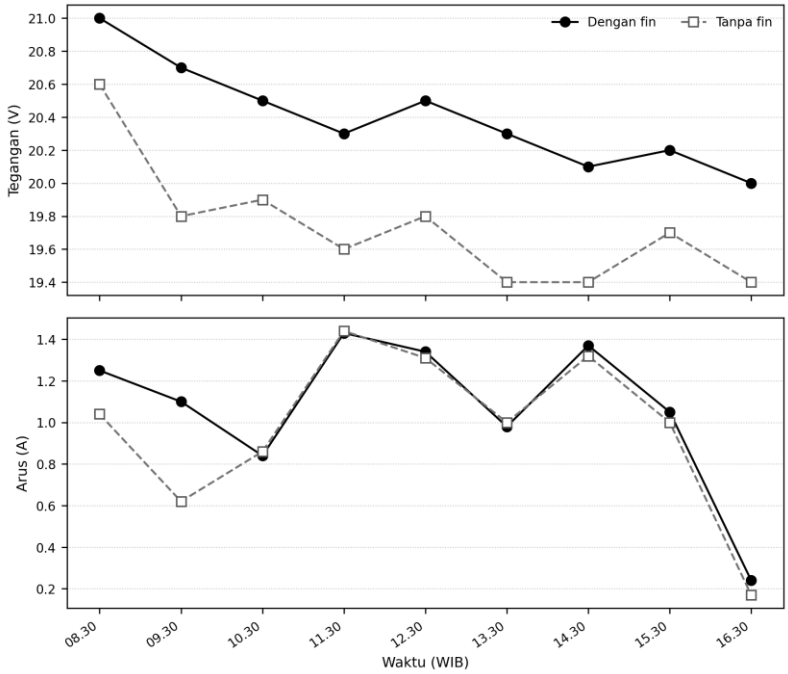


Gambar 3. Perbandingan Temperatur Panel Surya dengan dan Tanpa *Fin*

Penurunan temperatur menunjukkan bahwa penambahan *fin* memperbesar area kontak termal antara bagian belakang panel dan udara. Panas mengalir secara konduksi dari panel menuju *fin*, kemudian dilepas melalui konveksi alami pada permukaan *fin*. Pola ini menandakan bahwa *fin* aluminium dapat menekan temperatur panel surya pada kondisi luar ruang. Besarnya penurunan pada penelitian ini tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penelitian terdahulu karena geometri *fin*, kapasitas panel, kecepatan angin, temperatur lingkungan, dan intensitas radiasi berbeda.

C. Tegangan dan Arus

Gambar 4. menunjukkan perbandingan tegangan dan arus pada panel surya yang dipasang *fin* dan yang tidak. Tegangan panel dengan *fin* berada pada rentang 20-21 V dengan rata-rata 20,40 V, sedangkan panel tanpa *fin* berada pada rentang 19,4-20,6 V dengan rata-rata 19,73 V. Selisih rata-rata sebesar 0,67 V atau sekitar 3,38% menunjukkan bahwa temperatur yang lebih rendah berkaitan dengan tegangan yang lebih terjaga. Selisih terbesar tercatat pukul 09.30 dan 13.30 WIB, masing-masing 0,9 V.



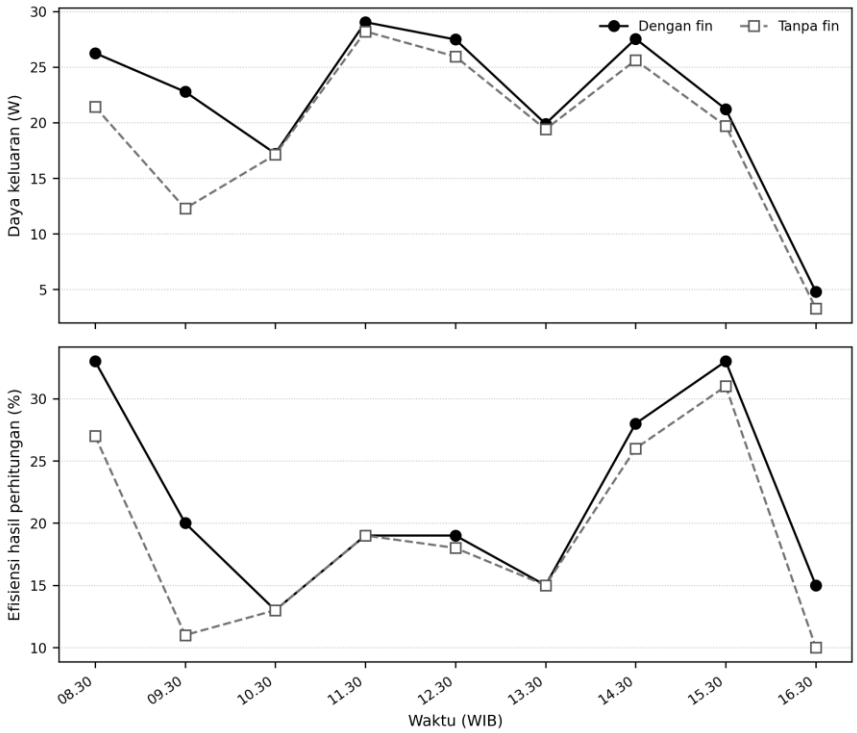
Gambar 4. Perbandingan Tegangan dan Arus Panel Surya

Penurunan temperatur panel akibat penggunaan fin menunjukkan hubungan positif terhadap kestabilan tegangan yang ditunjukkan oleh suhu rata-rata yang turun 5,17 °C dari 45,21 °C menjadi 40,04 °C serta tegangan rata-rata yang meningkat 0,67 V dari 19,73 V menjadi 20,40 V. Tegangan panel ber-fin juga lebih terjaga dengan rentang 20–21 V, dibandingkan panel tanpa fin sebesar 19,4–20,6 V. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan mampu mempertahankan tegangan pada kondisi operasi yang lebih stabil. Namun, hubungan tersebut lebih tepat diinterpretasikan sebagai kecenderungan karena pengujian tidak mengukur radiasi secara langsung dan tidak dilakukan pengulangan eksperimen, sehingga pengaruh fin terhadap kestabilan tegangan belum dapat dipastikan sepenuhnya.

Berbeda dari tegangan, arus tidak menunjukkan pola peningkatan yang konsisten. Perubahan arus listrik pada panel surya menunjukkan pola yang tidak konsisten selama pengamatan, terlihat dari beberapa waktu ketika arus panel tanpa *fin* justru sedikit lebih tinggi dibandingkan panel dengan *fin*. Hal ini dapat dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari secara seketika akibat perawanan lokal, karena arus lebih sensitif terhadap perubahan radiasi dan sudut datang cahaya. Namun, pengaruh tersebut tidak dapat dipastikan secara langsung karena intensitas radiasi tidak diukur secara real-time menggunakan pyranometer. Oleh karena itu, variasi arus dalam penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai respons terhadap kondisi radiasi yang berubah-ubah selama pengujian..

D. Daya Keluaran dan Efisiensi Panel

Gambar 5. menunjukkan perbandingan daya keluaran serta efisiensi panel surya dari kedua panel tersebut. Daya keluaran panel dengan *fin* lebih tinggi pada seluruh waktu pengamatan. Nilai rata-rata meningkat dari 19,22 W menjadi 21,80 W, atau bertambah 2,58 W (13,43%). Pada pukul 15.30 WIB, daya meningkat dari 19,70 W menjadi 21,21 W. Peningkatan ini terutama berasal dari tegangan panel ber-*fin* yang lebih tinggi, sementara perbedaan arus berubah-ubah selama pengujian.



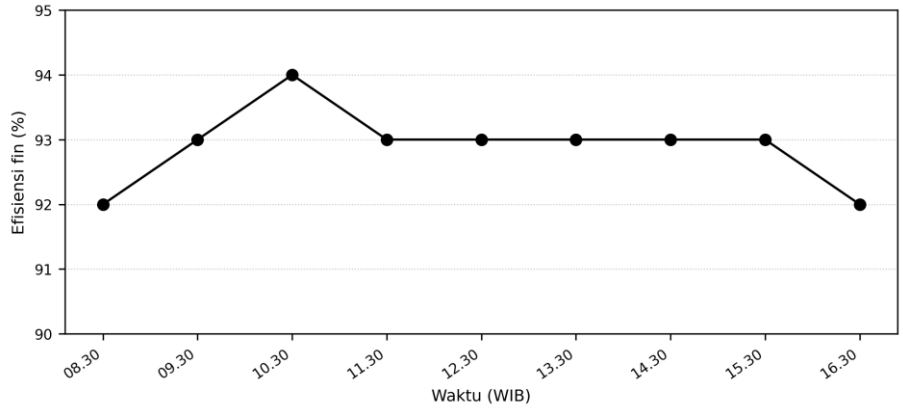
Gambar 5. Perbandingan Daya Keluaran dan Efisiensi Panel Surya

Nilai efisiensi panel yang dihitung berada pada kisaran 13–33% untuk panel dengan *fin* dan 10–31% untuk panel tanpa *fin*, tetapi angka tersebut perlu ditafsirkan secara hati-hati. Intensitas radiasi yang digunakan berasal dari data PVGIS tahun 2023, sedangkan pengukuran tegangan, arus, dan daya dilakukan pada tahun 2026, sehingga kondisi radiasi yang digunakan tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi saat pengujian. Perbedaan tahun data, variasi perawanan lokal, dan tidak adanya pengukuran radiasi seketika dapat menyebabkan nilai efisiensi absolut berbeda dari kondisi aktual. Karena kedua panel menggunakan input radiasi perhitungan yang sama, hasil efisiensi lebih tepat digunakan untuk melihat perbandingan relatif daripada sebagai efisiensi lapangan yang terverifikasi.

Temuan ini menunjukkan bahwa sifat dan jumlah *fin* memengaruhi pendinginan panel. *Cabrera-Escobar et al*. [9] juga menemukan bahwa material dan perforasi menghasilkan perbedaan penurunan temperatur dan efisiensi. Dengan demikian, konfigurasi tiga *fin* aluminium pada penelitian ini dapat dipandang sebagai bukti awal bahwa pendinginan pasif sederhana memberikan manfaat, tetapi belum merupakan konfigurasi optimum.

E. Efisiensi *Fin* dan Keterbatasan

Gambar 6. menunjukkan nilai efisiensi *fin* hasil perhitungan berada pada rentang 92-94% dengan rata-rata 92,89%. Hal tersebut menunjukkan bahwa distribusi temperatur pada *fin* relatif seragam dan sebagian besar luas *fin* berkontribusi terhadap perpindahan panas. Namun, nilai efisiensi tersebut merupakan hasil perhitungan dan belum secara langsung menunjukkan bahwa kemampuan pendinginan *fin* sudah optimum pada kondisi lapangan. Keterbatasan pengukuran radiasi secara langsung juga menyebabkan hubungan antara kinerja termal *fin* dan kondisi radiasi aktual belum dapat dievaluasi secara menyeluruh. Oleh karena itu, efisiensi *fin* sebaiknya dipandang sebagai indikator kinerja termal berdasarkan model, bukan sebagai representasi mutlak performa *fin* di lapangan.



Gambar 6. Efisiensi *Fin* Hasil Perhitungan

Keterbatasan penelitian meliputi pengambilan data hanya satu hari, tidak adanya replikasi, radiasi matahari yang tidak diukur langsung, kecepatan angin yang tidak dicatat, dan temperatur yang diukur pada titik permukaan menggunakan *thermal gun*. Penelitian lanjutan perlu menggunakan *pyranometer*, *anemometer*, sensor temperatur *multipoint* atau termokopel yang direkam secara *continue*, beban elektronik atau *maximum power point tracker*, serta variasi jumlah, jarak, ketebalan, dan orientasi *fin*. Pengujian berulang pada beberapa kondisi cuaca diperlukan untuk menentukan konsistensi peningkatan daya dan konfigurasi *fin* yang optimum.

4. SIMPULAN

Pemasangan tiga *fin* aluminium *rectangular* pada sisi belakang panel surya menurunkan temperatur rata-rata sebesar 5,17 °C. Temperatur yang lebih rendah berkaitan dengan peningkatan tegangan rata-rata sebesar 0,67 V, sedangkan perubahan arus tidak membentuk pola yang konsisten. Daya keluaran rata-rata meningkat 2,58 W atau 13,43%. Efisiensi panel hasil perhitungan meningkat 2,78 poin persentase, dan efisiensi *fin* rata-rata mencapai 92,89%. Hasil ini menunjukkan bahwa *fin* aluminium dapat berfungsi sebagai metode pendinginan pasif untuk membantu menurunkan temperatur dan meningkatkan daya keluaran panel surya pada kondisi pengujian yang dilakukan.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian hanya dilakukan selama satu hari tanpa pengulangan, serta radiasi matahari dan kecepatan angin tidak diukur secara *real-time*, sehingga hasil belum dapat menggambarkan kinerja panel pada berbagai kondisi lingkungan secara menyeluruh. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan *pyranometer* untuk mengukur intensitas radiasi matahari, *anemometer* untuk mencatat kecepatan angin, sensor termokopel *multi-point* dengan perekaman kontinu, serta MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) untuk memperoleh karakteristik daya yang lebih representatif. Selain itu, optimasi sistem pendinginan dapat dilakukan dengan memvariasikan jumlah, ketebalan, dan konfigurasi perforasi *fin* untuk menentukan geometri yang memberikan perpindahan panas dan peningkatan kinerja panel secara lebih optimal.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Rudiyanto, R. E. Rachmanita, and A. Budiprasojo, *Dasar-Dasar Pemasangan Panel Surya*. Malang, Indonesia: Unisma Press, 2023.

[2] Samsurizal, K. T. Mauriraya, M. Fikri, N. Pasra, and Christiono, *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*, 1st ed. Jakarta Barat, Indonesia: Institut Teknologi PLN, 2021.

[3] E. K. Wati, *Perpindahan Kalor & Massa*. Jakarta Selatan, Indonesia: LP_UNAS, 2021.

[4] S. Hwang, Y. Kang, and H. Lee, "Performance and energy loss mechanism of bifacial photovoltaic modules at a solar carport system," *Energy Sci. Eng.*, vol. 11, no. 8, pp. 2866–2884, 2023, doi: 10.1002/ese3.1497.

[5] M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, "Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 18, pp. 26131–26159, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18719-9.

[6] A. Sohail, M. S. Syakirin, M. Waseem, M. Z. Zulkifly, F. Pallonetto, and S. M. Sultan, "Cutting-edge developments in active and passive photovoltaic cooling for reduced temperature operation," *Results Eng.*, vol. 23, p. 102662, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102662.

[7] M. Firoozzadeh, M. Lotfi, and A. H. Shiravi, "An experimental study on simultaneous use of metal fins and mirror to improve the performance of photovoltaic panels," *Sustain.*, vol. 14, no. 24, p. 16986, 2022, doi: 10.3390/su142416986.

[8] S. N. Razali, A. Ibrahim, A. Fazlizan, A. B. Al-Aasam, M. A. A. Rahmat, and M. A. A. Bin Ishak, "Superior thermal dissipation through natural convection in a passive cooling system using multidirectional tapered fin heat sinks (MTFHS)," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 14, no. 3, pp. 577–587, 2025, doi: 10.61435/ijred.2025.60742.

[9] R. Cabrera-Escobar *et al.*, "Comparative analysis of material efficiency and the impact of perforations on heat sinks for monocrystalline photovoltaic panel cooling," *Energies*, vol. 17, no. 21, p. 5511, 2024, doi: 10.3390/en17215511.

[10] M. Y. Maulana, B. Pramono Jati, and I. Widihastuti, "Analisa perbandingan efisiensi konversi energi antara PV (photovoltaic) monocrystalline 50 WP dan polycrystalline 50 WP pada berbagai intensitas Cahaya," *Cyclotron*, vol. 7, no. 2, pp. 1–7, 2024, doi:

10.30651/cl.v7i02.21821.
[11] M. Zuhour, O. M. Ibrahim, and N. Aljuwayhel, "Effect of passive cooling on the performance of photovoltaic solar panels operating in extremely hot weather," *Int. J. Recent Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 2/3, pp. 1–14, 2023, doi: 10.14810/ijmech.2023.12301.
[12] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

Daftar Simbol

η_p = Efisiensi panel surya, %
V_{pv} = Tegangan panel surya, V
I_{pv} = Arus panel surya, A
p = Panjang panel surya, m
l = Lebar panel surya, m
A = Luas penampang panel surya, m^2
I_{rad} = Intensitas radiasi matahari, W/m^2
P = Daya output panel surya, W
η_f = Efisiensi *fin*, %
h = *Heat transfer coefficient*, $W/m^2.K$
$k_{material}$ = *Conductivity thermal material*, W/m.K
L = Tinggi *fin*, m
w = Panjang *fin*, m
t = Tebal *fin*, m
Nu = *Nusselt number*
k_{air} = *Thermal conductivity of air*, W/m.K
Ra = *Rayleigh number*
S = *Fin spacing*, m
Pr = *Prandtl number*
Gr = *Grashof number*
g = Percepatan gravitasi, m/s^2
Bt = *Coefficient of thermal expansion*, /°C
T_p = Temperatur panel, °C
T_{air} = Temperatur udara, °C
vs = *Kinematic viscosity*, m^2/s
A_p = *Fin profile area*, m^2
L_c = *Corrected fin length*, m