

Pengaruh Ventilated Frame terhadap Distribusi Temperatur dan Kinerja Panel Surya

Rivan Muhfidin¹

Wartono²

Sumpena³

Diah Suwarti Widyastuti⁴

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Proklamasi 45, Jl. Proklamasi No.1, Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

⁴Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

¹Korespondensi penulis: rivanm@itny.ac.id

Article Info: Received: April 22, 2026; Accepted: May 04, 2026; Available online: May 22, 2026

DOI: 10.30588/jeemm.v10i1.2684

Abstract: The increase in operating temperature is one of the main factors limiting solar panel performance because it reduces the power output and efficiency of photovoltaic systems. This study aims to analyze the effect of a ventilated frame on temperature distribution, power output, and solar panel efficiency. The research was conducted using an experimental approach with three configuration variations: no frame, conventional aluminium frame (solid frame), and ventilated aluminium frame (ventilated frame). The experiments were carried out for three days under clear weather conditions from 07:00 to 17:00. The measured parameters included solar irradiance, panel surface temperature, voltage, current, and output power. The results showed that panel temperature increased with increasing solar irradiance and reached its peak during midday. The ventilated frame produced a more uniform temperature distribution, reduced panel temperature by approximately 0.5–1.5°C, and improved power output by 1%–3% and efficiency by approximately 0.1%–0.2% compared to the conventional frame. In addition, the efficiency sensitivity to temperature was found to be in the range of 0.07–0.08%/°C, indicating that panel performance is strongly influenced by thermal conditions. These findings demonstrate that the ventilated frame has the potential to serve as an effective passive cooling solution for improving the thermal and electrical performance of solar panels without requiring additional energy and can be applied to existing photovoltaic systems with minimal structural modification.

Keywords: solar panel, ventilated frame, passive cooling, temperature, efficiency

Abstrak: Peningkatan temperatur operasi merupakan salah satu faktor utama yang membatasi kinerja panel surya karena dapat menurunkan daya keluaran dan efisiensi sistem fotovoltaik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *ventilated frame* terhadap distribusi temperatur, daya keluaran, dan efisiensi panel surya. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan eksperimental dengan tiga variasi konfigurasi, yaitu tanpa bingkai (*no frame*), bingkai aluminium konvensional (*solid frame*), dan bingkai aluminium berventilasi (*ventilated frame*). Pengujian dilaksanakan selama tiga hari pada kondisi cuaca cerah dengan rentang waktu pukul 07.00–17.00. Parameter yang diukur meliputi intensitas radiasi matahari, temperatur permukaan panel, tegangan, arus, dan daya keluaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur panel meningkat seiring kenaikan intensitas radiasi matahari dan mencapai puncak pada periode siang hari. *Ventilated frame* mampu menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata, menurunkan temperatur panel sekitar 0,5–1,5°C, serta meningkatkan daya keluaran sebesar 1%–3% dan efisiensi sekitar 0,1%–0,2% dibandingkan bingkai konvensional. Sensitivitas efisiensi terhadap temperatur berada pada kisaran 0,07–0,08%/°C yang menunjukkan bahwa performa panel sangat dipengaruhi oleh kondisi termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *ventilated frame* berpotensi menjadi solusi pendinginan pasif yang efektif untuk meningkatkan performa termal dan listrik panel surya tanpa memerlukan energi tambahan serta dapat diterapkan pada sistem panel surya eksisting dengan modifikasi struktural yang minimal.

Kata Kunci: panel surya, ventilated frame, pendinginan pasif, temperatur, efisiensi

I. Pendahuluan

Energi matahari semakin diakui sebagai salah satu komponen utama dalam transisi global menuju sumber energi terbarukan karena sifatnya yang bersih, berkelanjutan, dan melimpah dibandingkan bahan bakar fosil (Razykov dkk., 2011). Pemanfaatan energi surya melalui sistem fotovoltaik (PV) terus mengalami peningkatan seiring dengan kebutuhan energi dan kesadaran terhadap isu lingkungan. Namun demikian, performa sistem PV masih menghadapi tantangan utama, khususnya terkait dengan peningkatan temperatur operasi yang berdampak langsung terhadap efisiensi dan keandalan sistem (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Temperatur operasi yang tinggi merupakan faktor kritis yang menyebabkan penurunan efisiensi panel surya. Peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan tegangan keluaran akibat meningkatnya rekombinasi pembawa muatan pada material semikonduktor, sehingga menurunkan efisiensi konversi energi (Dubey dkk., 2013). Penelitian menunjukkan bahwa efisiensi sel surya dapat menurun secara signifikan, dari 21,3% pada 25°C menjadi 17,41% pada 70°C (Kassar dkk., 2023). Selain itu, temperatur tinggi juga mempercepat degradasi material dan memperpendek umur operasional modul PV, yang berdampak pada penurunan keandalan dan kelayakan ekonomi sistem (Ouassidi dkk., 2025). Pada kondisi radiasi tinggi, kehilangan efisiensi bahkan dapat mencapai hingga 20%, sehingga pengelolaan temperatur menjadi aspek yang sangat krusial (Saadsaoud dkk., 2024).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan temperatur pada panel surya. Sistem pendinginan aktif, seperti pendingin berbasis fluida, terbukti mampu menurunkan temperatur panel dan meningkatkan daya keluaran secara signifikan, namun memerlukan energi tambahan serta meningkatkan kompleksitas sistem (Supit dkk., 2024). Di sisi lain, pendekatan pendinginan pasif seperti penggunaan sirip, heat sink, dan modifikasi permukaan panel menawarkan solusi yang lebih sederhana, tetapi sebagian besar masih bergantung pada komponen tambahan di luar struktur utama panel (Sharma, 2024). Di sisi lain, pendekatan pendinginan pasif, seperti penggunaan sirip (*fins*), *heat sink*, dan modifikasi permukaan panel, telah dikembangkan sebagai alternatif yang lebih sederhana dan hemat energi. Namun, sebagian besar pendekatan tersebut masih bergantung pada penambahan sistem eksternal yang meningkatkan kompleksitas desain, biaya instalasi, dan kebutuhan pemeliharaan.

Selain strategi pendinginan, faktor lingkungan seperti akumulasi debu dan kondisi temperatur tinggi juga turut mempengaruhi performa panel surya secara signifikan (Ayad dkk., 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi strategi pendinginan dan pemeliharaan diperlukan untuk menjaga performa sistem PV dalam jangka panjang. Namun, pendekatan ini seringkali menambah kompleksitas sistem dan belum sepenuhnya efisien untuk implementasi skala luas, khususnya pada wilayah dengan keterbatasan sumber daya. Oleh karena itu, integrasi solusi pendinginan dan pemeliharaan menjadi penting dalam meningkatkan kinerja sistem PV, khususnya pada lingkungan bersuhu tinggi (Raheem dkk., 2025).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengelolaan temperatur yang efektif merupakan faktor kunci dalam meningkatkan performa sistem fotovoltaik. Optimasi sistem termal, baik melalui pendekatan desain maupun pengaturan kondisi operasi, dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas kinerja panel surya secara signifikan (Muhfidin & Yu, 2019). Selain itu, performa panel surya pada kondisi operasional nyata sangat dipengaruhi oleh konfigurasi sistem dan faktor lingkungan, sehingga pendekatan eksperimental menjadi penting untuk memahami perilaku sistem secara komprehensif (Muhfidin dkk., 2025).

Meskipun berbagai metode pendinginan telah banyak diteliti, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem pendinginan tambahan, sementara aspek desain struktural panel surya, khususnya bingkai aluminium, belum banyak dikaji secara mendalam. Padahal, bingkai aluminium tidak hanya berfungsi sebagai penopang mekanik, tetapi juga berpotensi mempengaruhi jalur perpindahan panas dan distribusi temperatur pada panel. Konfigurasi struktural tertentu dapat menyebabkan akumulasi panas lokal yang berdampak pada peningkatan temperatur modul (Dubey dkk., 2013). Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian dalam pemanfaatan desain komponen struktural sebagai bagian dari strategi manajemen termal panel surya.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan desain *ventilated frame*, yaitu modifikasi bingkai aluminium dengan penambahan lubang ventilasi untuk meningkatkan pelepasan panas melalui konveksi alami. Pendekatan ini tidak memerlukan energi tambahan serta tidak meningkatkan kompleksitas sistem, sehingga berpotensi menjadi solusi pendinginan pasif yang efisien. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi desain struktural bingkai sebagai mekanisme pendinginan pasif tanpa penambahan komponen eksternal, yang belum banyak dilaporkan dalam penelitian sebelumnya.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *ventilated frame* terhadap distribusi temperatur, daya keluaran, dan efisiensi panel surya melalui pendekatan eksperimen.

II. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menganalisis pengaruh desain bingkai aluminium terhadap distribusi temperatur, daya keluaran, dan efisiensi panel surya. Variasi yang diuji meliputi tiga kondisi, yaitu panel tanpa bingkai (*no frame*), panel dengan bingkai aluminium konvensional (*solid frame*), dan panel dengan bingkai aluminium modifikasi ventilasi (*ventilated frame*). Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh desain struktural terhadap mekanisme perpindahan panas dan performa sistem fotovoltaik.

1. Lokasi dan Kondisi Pengujian

Eksperimen dilakukan di ruang terbuka pada area kampus Institut Teknologi Nasional Yogyakarta dengan paparan sinar matahari langsung. Pengujian dilaksanakan pada kondisi cuaca cerah dengan intensitas radiasi matahari yang bervariasi sepanjang hari. Panel surya dipasang dengan sudut kemiringan tetap sebesar 15° terhadap horizontal, menyesuaikan kondisi geografis lokasi pengujian, sehingga seluruh variasi panel menerima paparan radiasi yang seragam.

2. Bahan dan Spesifikasi Sistem

Bahan utama yang digunakan adalah panel surya berbasis silikon tipe monocrystalline dengan kapasitas nominal 100 Wp. Bingkai aluminium digunakan sebagai variabel utama dengan dua konfigurasi, yaitu bingkai solid dan *ventilated frame*.

Peralatan yang digunakan meliputi:

- Solar power meter untuk mengukur intensitas radiasi matahari (W/m^2)
- Kamera termal (FLIR) untuk mengukur distribusi temperatur permukaan panel
- Watt meter untuk mengukur tegangan (V), arus (A), dan daya keluaran (W)

Seluruh pengukuran dilakukan secara simultan untuk memastikan keterkaitan antara parameter termal dan listrik.

3. Desain *Ventilated Frame*

Desain *ventilated frame* dikembangkan dengan tujuan meningkatkan pelepasan panas melalui konveksi alami. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan lubang ventilasi pada sisi bingkai aluminium untuk meningkatkan sirkulasi udara di sekitar panel. Desain lubang ventilasi pada bingkai panel surya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain lubang ventilasi pada bingkai panel surya

Lubang ventilasi dirancang dengan diameter 5–10 mm dan didistribusikan secara merata pada sisi bingkai dengan jarak antar lubang 10–20 mm. Konfigurasi ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan efektif dan mempercepat perpindahan panas melalui mekanisme konveksi. Desain ini juga mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan struktural dan efektivitas pelepasan panas.

4. Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan di ruang terbuka dengan paparan sinar matahari langsung untuk mensimulasikan kondisi operasional nyata. Panel surya dipasang pada posisi tetap dengan sudut kemiringan yang sama untuk setiap variasi, sehingga perbedaan hasil hanya dipengaruhi oleh desain bingkai.

Pengujian dilakukan selama tiga hari pada kondisi cuaca cerah dengan rentang waktu pukul 07.00–17.00 dan interval pengambilan data setiap 1 jam. Parameter yang diukur meliputi intensitas radiasi matahari, temperatur permukaan panel, tegangan, arus, dan daya keluaran. Untuk meningkatkan keandalan data, setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Seluruh variasi panel diuji secara bersamaan pada kondisi lingkungan yang sama untuk meminimalkan pengaruh variabel eksternal.

5. Perhitungan Efisiensi dan Analisis Data

Efisiensi panel surya dalam penelitian ini dianalisis berdasarkan pengaruh temperatur terhadap kinerja sel fotovoltaik. Hubungan antara temperatur sel dan efisiensi dinyatakan dalam bentuk persamaan linier yang umum digunakan dalam analisis performa panel surya, yaitu:

$$\eta_{pv} = \eta_0 [1 - \beta (T_c - T_{ref})]$$

di mana:

η = efisiensi panel surya (%)

η_0 = efisiensi pada kondisi referensi (%)

β = koefisien temperatur ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

T_c = temperatur panel ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ref} = temperatur referensi (umumnya 25°C)

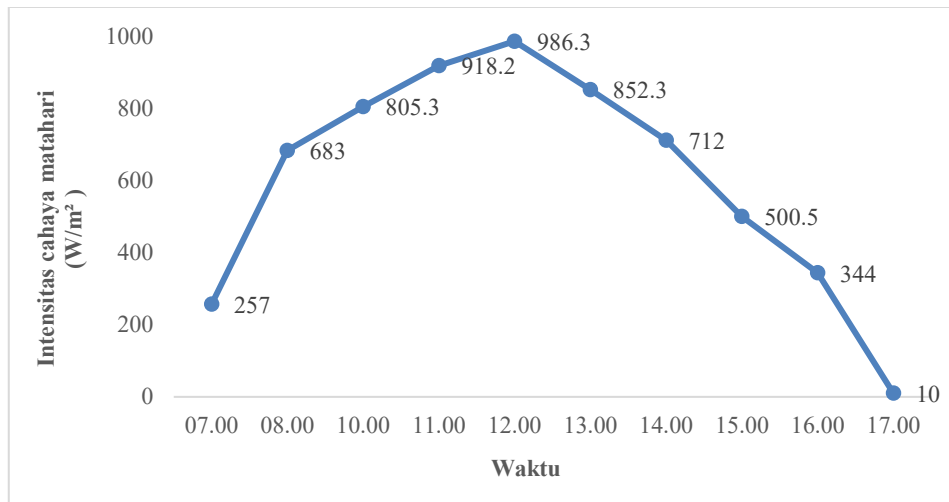
Persamaan ini menunjukkan bahwa efisiensi panel surya menurun secara linier seiring dengan peningkatan temperatur operasi (Muhfidin & Yu, 2019). Fenomena ini disebabkan oleh peningkatan energi termal dalam material semikonduktor yang memperbesar peluang rekombinasi pembawa muatan, sehingga menurunkan tegangan keluaran dan efisiensi konversi energi. Model ini telah banyak digunakan dalam studi performa sistem fotovoltaik dan terbukti cukup akurat untuk menggambarkan hubungan temperatur terhadap efisiensi pada rentang kondisi operasi normal (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Data hasil pengukuran berupa temperatur, intensitas radiasi, dan daya keluaran kemudian dianalisis secara komparatif untuk setiap variasi desain bingkai. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai efisiensi, distribusi temperatur, serta daya keluaran untuk mengidentifikasi pengaruh bingkai aluminium dengan modifikasi ventilasi terhadap performa panel surya.

III. Hasil dan Pembahasan

1. Intensitas radiasi matahari

Berdasarkan hasil pengukuran, intensitas radiasi matahari menunjukkan pola harian yang meningkat dari pagi hingga mencapai puncak pada siang hari, kemudian menurun pada sore hari sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Nilai radiasi maksimum tercatat sebesar $986,3 \text{ W/m}^2$ pada pukul 12.00, sedangkan nilai minimum terjadi pada pagi dan sore hari. Rentang waktu antara pukul 10.00–14.00 menunjukkan intensitas radiasi yang tinggi dan relatif stabil, sehingga memberikan kondisi yang ideal untuk mengevaluasi performa termal panel surya. Nilai radiasi yang diperoleh juga konsisten dengan penelitian sebelumnya, di mana puncak radiasi siang hari umumnya melampaui 900 W/m^2 (Mahendran dkk., 2013; Soo dkk., 2025).

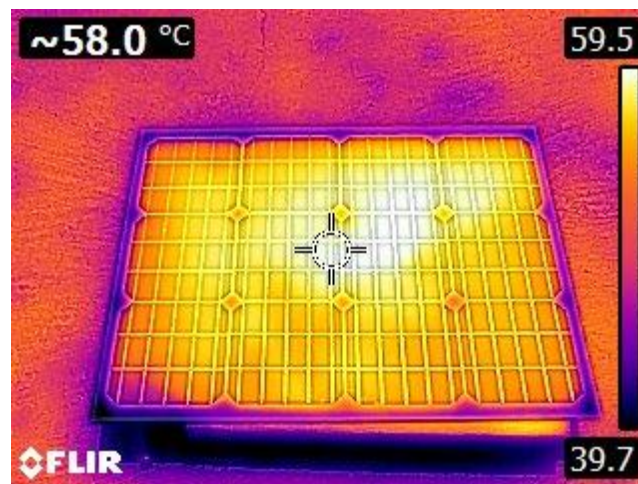


Gambar 2. Hasil pengukuran intensitas radiasi matahari

Pola ini menunjukkan bahwa kondisi pengujian telah merepresentasikan kondisi operasional nyata, di mana radiasi matahari menjadi faktor utama yang mempengaruhi temperatur dan performa panel. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa radiasi matahari memiliki korelasi langsung terhadap peningkatan temperatur modul fotovoltaik (Mekhilef dkk., 2012).

2. Distribusi Temperatur Panel Surya

Distribusi temperatur panel surya dianalisis berdasarkan hasil pengukuran menggunakan kamera termal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Visualisasi termal menunjukkan bahwa temperatur permukaan panel tidak terdistribusi secara merata, dengan area tengah panel cenderung memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan bagian tepi. Fenomena ini disebabkan oleh akumulasi panas pada sel fotovoltaik akibat paparan radiasi matahari serta keterbatasan mekanisme pelepasan panas pada permukaan modul, sebagaimana dilaporkan dalam studi mengenai karakteristik termal modul PV (Muhfidin & Yu, 2019).



Gambar 3. Pengukuran distribusi temperatur menggunakan kamera thermal

Berdasarkan data pada Tabel 1, temperatur panel menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu hingga mencapai puncak pada periode siang hari, yaitu sekitar pukul 11.00–12.00. Temperatur maksimum tercatat sebesar 58,2°C pada kondisi tanpa frame, sedangkan pada kondisi dengan *frame* mencapai 57,3°C, dan *ventilated frame* sebesar 57,7°C. Setelah periode tersebut, temperatur mulai menurun seiring dengan berkurangnya intensitas radiasi matahari. Pola ini konsisten dengan penelitian yang menunjukkan bahwa temperatur modul PV sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi dan kondisi lingkungan, dimana peningkatan radiasi akan meningkatkan temperatur operasi secara signifikan (Mekhilef dkk., 2012).

Tabel 1. Data Distribusi Temperatur Panel Surya

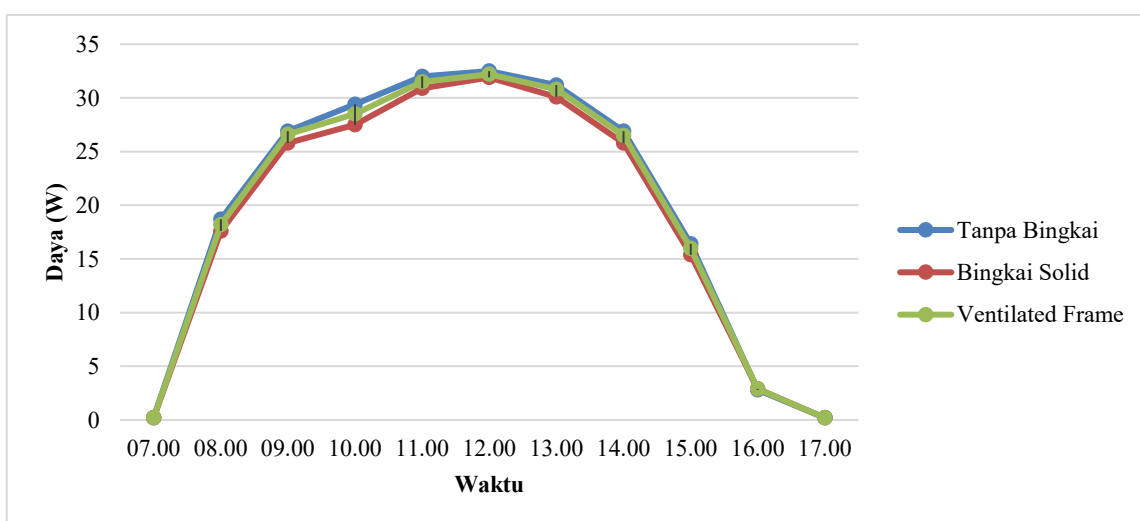
Waktu	Tanpa frame	Solid frame	Ventilated frame
07.00	28.5	29.0	28.8
08.00	40.0	41.5	40.8
09.00	47.0	48.5	47.8
10.00	51.5	51.0	51.2
11.00	58.2	57.3	57.7
12.00	58.0	57.1	57.5
13.00	55.8	55.7	55.8
14.00	51.4	49.2	50.3
15.00	45.8	43.2	44.5
16.00	34.7	32.6	33.5
17.00	26.1	30.9	28.5

Perbandingan antar variasi menunjukkan bahwa *ventilated frame* mampu menurunkan temperatur dibandingkan bingkai konvensional, dengan nilai temperatur berada di antara kondisi tanpa frame dan dengan frame. Hal ini menunjukkan bahwa ventilasi pada bingkai meningkatkan pelepasan panas melalui konveksi alami, sehingga mengurangi akumulasi panas pada panel. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan aliran udara merupakan metode efektif dalam pendinginan pasif sistem PV (Dida dkk., 2021).

3. Daya dan Efisiensi Panel Surya

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa daya keluaran panel surya dipengaruhi secara langsung oleh intensitas radiasi dan temperatur operasi yang dapat dilihat pada Gambar 4. Daya maksimum tercatat sebesar 32,5 W pada kondisi tanpa frame, diikuti oleh *ventilated frame* sebesar 32,2 W, dan bingkai *solid* sebesar 31,9 W. Perbedaan daya antar variasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pada bingkai solid menyebabkan penurunan performa listrik. *Ventilated frame* mampu meningkatkan daya sebesar sekitar 1%–3% dibandingkan bingkai *solid*, yang menunjukkan efektivitas desain ventilasi dalam mengurangi efek termal.

Hasil ini menunjukkan bahwa temperatur memiliki pengaruh signifikan terhadap daya keluaran panel. Penurunan temperatur meskipun relatif kecil mampu meningkatkan daya secara nyata, yang mengindikasikan sensitivitas tinggi performa panel terhadap kondisi termal. Fenomena ini sejalan dengan karakteristik sistem PV yang sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi (Skoplaki & Palyvos, 2009).



Gambar 4. Hasil pengukuran daya luaran panel surya

Efisiensi panel menunjukkan tren yang berbanding terbalik dengan temperatur. Berdasarkan perhitungan menggunakan model hubungan temperatur, peningkatan temperatur menyebabkan penurunan efisiensi secara linier. Penurunan efisiensi ini terjadi karena peningkatan temperatur menyebabkan kenaikan energi termal pada material semikonduktor, sehingga meningkatkan rekombinasi pasangan elektron-hole dan menurunkan tegangan keluaran panel. Selain itu, temperatur tinggi juga menyebabkan penurunan *band gap* material semikonduktor yang berdampak pada menurunnya kemampuan konversi energi listrik. Akibatnya, daya keluaran dan efisiensi panel surya mengalami penurunan pada kondisi temperatur operasi yang tinggi (Dubey dkk., 2013).

Sensitivitas efisiensi terhadap temperatur pada penelitian ini berada pada kisaran 0,07–0,08%/°C, yang sesuai dengan karakteristik panel silikon. Penurunan efisiensi ini disebabkan oleh peningkatan rekombinasi pembawa muatan pada temperatur tinggi yang berdampak pada penurunan tegangan keluaran (Dubey dkk., 2013).

Tabel 2. Hasil Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Waktu	Tanpa frame	Solid frame	Ventilated frame
07.00	15.78	15.71	15.75
08.00	15.10	14.95	15.02
09.00	14.92	14.76	14.84
10.00	14.60	14.48	14.54
11.00	14.06	13.81	13.93
12.00	13.98	13.76	13.88
13.00	13.62	13.39	13.53
14.00	14.10	14.00	14.05
15.00	14.50	14.30	14.40
16.00	15.20	15.00	15.10
17.00	15.60	15.40	15.50

Tabel 2 menunjukkan bahwa efisiensi panel menurun seiring dengan peningkatan temperatur, dengan nilai terendah terjadi pada periode siang hari. Perbandingan antar variasi menunjukkan bahwa *ventilated frame* mampu meningkatkan daya dan efisiensi dibandingkan bingkai solid, meskipun belum melampaui kondisi tanpa bingkai (*frame*). Hal ini menunjukkan bahwa ventilasi pada bingkai berperan dalam meningkatkan pelepasan panas melalui konveksi alami, sehingga menurunkan temperatur operasi panel. Meskipun peningkatan efisiensi relatif kecil, sekitar 0,1%–0,2%, dampaknya terhadap daya cukup signifikan, yaitu sekitar 1%–3%. Hal ini disebabkan oleh sensitivitas tegangan terhadap temperatur, dimana penurunan temperatur meningkatkan tegangan keluaran panel, sehingga meningkatkan daya secara keseluruhan (Mekhilef dkk., 2012). Fenomena ini menunjukkan bahwa optimasi termal memiliki peran penting dalam meningkatkan performa sistem PV.

IV. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain *ventilated frame* berpengaruh terhadap distribusi temperatur dan kinerja panel surya, di mana ventilasi pada bingkai membantu mengurangi akumulasi panas lokal dan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata pada permukaan panel. Temperatur panel meningkat seiring dengan kenaikan intensitas radiasi matahari dan mencapai puncak pada periode siang hari. Temperatur maksimum tercatat sebesar 58,2°C pada kondisi tanpa frame, 57,3°C pada *solid frame*, dan 57,7°C pada *ventilated frame*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *ventilated frame* mampu menurunkan temperatur panel sekitar 0,5–1,5°C dibandingkan bingkai konvensional melalui peningkatan pelepasan panas secara konveksi alami.

Penurunan temperatur tersebut berdampak pada peningkatan performa listrik panel surya. Daya keluaran maksimum pada *ventilated frame* mencapai 32,2 W, lebih tinggi dibandingkan *solid frame* sebesar 31,9 W. Selain itu, efisiensi panel pada *ventilated frame* juga menunjukkan nilai yang lebih baik dibandingkan bingkai konvensional, dengan sensitivitas efisiensi terhadap temperatur berada pada

kisaran 0,07–0,08%/°C. Hasil ini menunjukkan bahwa *ventilated frame* mampu meningkatkan performa termal dan listrik panel surya tanpa memerlukan energi tambahan serta tetap mempertahankan fungsi struktural panel. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan optimasi desain ventilasi dan melakukan simulasi numerik guna memperoleh konfigurasi ventilasi yang lebih efektif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian Masyarakat dan Inovasi Institut Teknologi Nasional Yogyakarta yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Hibah Penelitian Pemula.

Daftar Pustaka

- Ayad, D., Hassan, F., Alkhori, S., Touati, F., & Gonzales, A. S. P. (2024). *Reduction of Dust and Temperature Effects on PV Performance in Qatar and the Gulf Region*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/sgre59715.2024.10429033>
- Dida, M., Boughali, S., Bechki, D., & Bouguettaia, H. (2021). Experimental investigation of a passive cooling system for photovoltaic modules efficiency improvement in hot and arid regions. *Energy Conversion and Management*, 243, 114328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114328>
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Kassar, R. El, Takash, A. A., Msadi, A., Salameh, W., & Khanjian, A. (2023). *Modeling Solar Cell Performance at High Temperatures: A Validation Study of Theoretical Equations and Computational Simulations*. 152–157. <https://doi.org/10.1109/actea58025.2023.10193923>
- Mahendran, S., Lee, G. C., Shahrani, A., Bakar, R. A., Kadirgama, K., Amir, A. R., & Sharma, K. V. (2013). Diurnal pattern and estimation of global solar radiation in east coast malaysia. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 8, 1162–1175. <https://doi.org/10.15282/IJAME.8.2013.7.0095>
- Mekhilef, S., Safari, A., Mustaffa, W. E. S., Saidur, R., Omar, R., & Younis, M. A. A. (2012). Solar energy in Malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 386–396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.003>
- Muhfidin, R., Rudy Hartana, D., & Betin Aryani, E. (2025). Pengaruh Frame terhadap Kinerja Modul Panel Surya 100 Wp di Iklim Tropis Yogyakarta. *ReTII*, 314–318. <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/6345>
- Muhfidin, R., & Yu, I. S. (2019, Oktober 1). Thermal Analysis of PV Module and the Effect on its Efficiency. *2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power and Energy, TPEPE 2019*. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102515>
- Ouassidi, A. El, Alla, M., Rharrabi, Y., Amghar, K., Bouali, H., Driouch, I., & Monhim, B. El. (2025). Study of the Impact of Ambient Temperature on the Maximum Temperature Reached by a PV Solar Panel. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 76, 17–32. <https://doi.org/10.4028/p-s7djzz>

- Raheem, P., Hasan, F. H., Algburi, S., & Ezzat, S. B. (2025). Investigating the Impact of Internal and External Factors on Solar Cell Performance to Enhance Energy Conversion Efficiency. *NTU Journal of Renewable Energy*, 8(1), 14–23. <https://doi.org/10.56286/x12hd434>
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.12.002>
- Saadsaoud, M., Attia, M., Abd-Elhamid, H. F., & Driss, Z. (2024). Enhancing solar efficiency in steppe regions: a comprehensive performance evaluation of photovoltaic systems in M'sila, Algeria. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e11802–e11802. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-677>
- Sharma, V. (2024). *Advancing Energy Efficiency in Solar Systems: A Comparative Study of Microchannel Heat Sink Cooling Method for Photovoltaic Cells*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11079917>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- Soo, C. Y., Xu, C., Mokhtar, W. M. H. W., & Rais, A. R. M. (2025). Assessing Solar Radiation Patterns in Sarawak using Measured Data and the Hargreaves-Samani Model for Photovoltaic Systems Application. *Makara journal of technology*, 29(2). <https://doi.org/10.7454/mst.v29i2.1713>
- Supit, M. V., Budiono, B., & Halimi, B. (2024). Optimization of Solar Photovoltaic Output Using Adjustable Drip Water Cooling System. *6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/icpere63447.2024.10845219>