

Analisis Kinerja Solar Cell 100 W Berbahan Polikristalin dengan Sistem Pendingin Konveksi Bebas

Saka Rukma Pawana Putra¹, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³, Hisyam Ma'mun⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia.

Jl. Lontar No.24, Karangtempel, Semarang Timur, Kota Semarang, Central Java 50232, Indonesia.

Email: ¹sakarukma03@gmail.com, ²muhamadsafii@upgris.ac.id, ³androthesa@gmail.com, ⁴hisyam@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹androthesa@gmail.com

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Panel Surya Photovoltaic Konveksi Bebas Temperatur Energi Terbarukan	Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta dampak penggunaan energi fosil terhadap lingkungan mendorong pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya panel surya (photovoltaic/PV). Panel surya dapat memanfaatkan energi matahari yang tersedia secara berkelanjutan dan membantu mengurangi dampak emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja panel surya Maysun Solar tipe MS100M-39 berkapasitas 100 Wp dengan metode pendinginan konveksi bebas serta mengetahui perubahan temperatur permukaan panel. Pengujian dilakukan selama tiga hari pada pukul 08.00–16.00 WIB dengan pengamatan flux radiasi, daya keluaran, dan temperatur menggunakan Thermal Imager Camera HT-175. Hasil pengujian menunjukkan flux radiasi meningkat hingga 70 W/m ² dengan temperatur rata-rata panel mencapai 39,3°C, sedangkan citra thermal menunjukkan temperatur maksimum sebesar 59,8°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan radiasi matahari diikuti kenaikan temperatur panel sehingga pengendalian temperatur penting untuk mempertahankan kinerja panel. Kapasitas 100 Wp dengan target efisiensi 63% menjadi acuan dalam pengembangan kinerja sistem panel surya yang lebih optimal dan berkelanjutan.
Keywords: Solar Panel Photovoltaic Natural Convection Temperature Renewable Energy	Abstract The increasing demand for electrical energy and the environmental impacts of fossil fuel use, particularly greenhouse gas emissions, encourage the utilization of renewable energy, one of which is solar photovoltaic (PV) technology. Solar panels utilize sunlight as a sustainable and renewable energy source while offering a more environmentally friendly alternative. This study aims to analyze the performance of a Maysun Solar MS100M-39 panel with a capacity of 100 Wp using a natural convection cooling method and to evaluate changes in surface temperature. The experiment was conducted for three days from 08:00 to 16:00 WIB by observing solar radiation flux, output power, and panel temperature using a Thermal Imager Camera HT-175. The results showed that solar radiation flux increased up to 70 W/m ² , accompanied by an average panel temperature of 39.3°C, while thermal imaging recorded a maximum surface temperature of 59.8°C. These results indicate that increasing solar radiation is followed by an increase in panel temperature, making temperature control important for maintaining PV performance. The 100 Wp panel capacity with a target efficiency of 63% is expected to support the development of more optimal solar panel systems in utilizing renewable energy and reducing the environmental impacts of fossil fuel use.
JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License	
	

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat untuk mendukung berbagai aktivitas, permintaan akan energi listrik pun ikut meningkat [1]. Energi terbarukan merupakan pilihan yang lebih berkelanjutan karena penggunaan bahan bakar fosil dapat berdampak buruk terhadap lingkungan [2]. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar di Indonesia adalah energi matahari melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya PLTS [3]. Pemanfaatan PLTS dapat mendukung kebutuhan listrik masyarakat, termasuk rumah tangga, penerangan jalan, dan kegiatan usaha [4]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa prototype panel surya berbasis limbah rumah tangga dengan kapasitas 100 Watt berhasil dibuat dan dapat dimanfaatkan untuk menunjang aktivitas masyarakat serta kebutuhan UMKM. Namun, kinerja panel surya dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama peningkatan temperatur akibat radiasi matahari yang dapat

menurunkan daya keluaran. Salah satu upaya yang dapat digunakan adalah pendinginan pasif melalui konveksi udara bebas yang sederhana dan tidak membutuhkan energi tambahan. Oleh karena itu, analisis kinerja panel surya dengan sistem pendinginan konveksi udara bebas diperlukan untuk mengetahui perubahan temperatur dan pengaruhnya terhadap daya keluaran panel [5]. Pengujian dilakukan dengan membandingkan parameter suhu dan daya keluaran panel surya sebelum dan sesudah menerapkan sistem pendinginan tersebut [6].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja *solar cell* dengan sistem pendingin konveksi bebas berdasarkan hasil penelitian terdahulu, khususnya terhadap perubahan temperatur operasi, daya keluaran, dan efisiensi. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan sirip pada kondisi konveksi alami mampu menurunkan hasil temperatur panel sebesar 2,5°C dan meningkatkan pembangkitan daya sebesar 8,58% [7]. Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan pelat berlubang untuk meningkatkan sirkulasi udara alami mampu menurunkan temperatur permukaan hampir 10°C dan menghasilkan daya sebesar 61,04 W [8]. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai efektivitas pendinginan konveksi bebas dalam mempertahankan kinerja *solar cell*. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi referensi dalam pengembangan metode pendinginan pasif yang sederhana, hemat energi, dan sesuai untuk diterapkan pada *solar cell* di lingkungan tropis [9].

Penelitian mengenai pendinginan pasif pada *solar cell* telah berkembang melalui pemanfaatan konveksi bebas, heat sink, sirip, dan saluran udara alami untuk mengurangi temperatur operasi modul [10]. Penggunaan sistem *natural draft* pada modul fotovoltaik dilaporkan mampu menghasilkan efisiensi konversi dari 13,72% menjadi 15,13% [11]. Penelitian lain menggunakan *heat sink* aluminium dengan konveksi alami dan memperoleh penurunan temperatur rata-rata sebesar 8,13°C serta peningkatan tegangan rangkaian terbuka sebesar 0,51 V dibandingkan modul referensi [12]. Selain itu, penggunaan sirip segitiga berongga pada kondisi konveksi alami mampu menurunkan temperatur rata-rata sebesar 2,5°C dan meningkatkan pembangkitan daya sebesar 8,58% [13]. Meskipun berbagai metode tersebut menunjukkan potensi dalam meningkatkan kinerja *solar cell*, perbedaan desain pendinginan, kondisi lingkungan, dan parameter pengujian menyebabkan hasil penelitian belum dapat dibandingkan secara langsung [14]. Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur yang mengintegrasikan hasil penelitian terdahulu untuk menganalisis efektivitas sistem pendingin konveksi bebas berdasarkan perubahan temperatur, daya keluaran, dan efisiensi *solar cell*.

Solar cell merupakan teknologi fotovoltaik yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, tetapi peningkatan temperatur operasi dapat menyebabkan penurunan daya keluaran dan efisiensi konversi. Oleh karena itu, berbagai metode pendinginan dikembangkan untuk menjaga temperatur *solar cell*, salah satunya pendinginan pasif dengan memanfaatkan konveksi bebas yang tidak memerlukan energi tambahan. Penelitian menggunakan heat sink berbasis sirip pada kondisi konveksi alami menunjukkan bahwa desain sirip dapat meningkatkan pelepasan panas dan menghasilkan peningkatan efisiensi listrik sebesar 2,73% pada konfigurasi tertentu [15]. Penelitian lain mengenai sistem pendinginan pasif dengan saluran udara alami menunjukkan bahwa peningkatan aliran udara di bagian belakang modul dapat menurunkan temperatur operasi dan meningkatkan keluaran listrik dibandingkan modul tanpa pendinginan [16]. Selain itu, penerapan *natural circulation cooling* pada modul fotovoltaik menunjukkan bahwa sirkulasi udara alami mampu meningkatkan perpindahan panas dari permukaan modul sehingga temperatur lebih terjaga selama proses operasi [17]. Hasil penelitian lainnya menunjukkan bahwa efektivitas pendinginan konveksi bebas dipengaruhi oleh desain saluran udara, luas permukaan perpindahan panas, temperatur lingkungan, dan intensitas radiasi matahari [18]. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, pendinginan konveksi bebas memiliki potensi untuk meningkatkan kinerja *solar cell* melalui pengurangan temperatur operasi, sehingga metode ini dapat menjadi alternatif pendinginan pasif yang sederhana dan tidak membutuhkan konsumsi energi tambahan [19].

penelitian ini terletak pada pendekatan analisis sintesis dan pembandingan holistik (*comprehensive comparative synthesis*) terhadap berbagai metode pendinginan konveksi bebas yang selama ini hanya diuji secara parsial dan terisolasi. Penelitian-penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai variasi pendinginan pasif, seperti penggunaan sistem peredam panas (*heat sink*) dengan konveksi alami yang mampu menurunkan suhu sel surya sebesar 5,4% serta meningkatkan efisiensi listrik sebesar 8% dibandingkan sel tanpa pendinginan [20]. Optimasi konfigurasi heat sink untuk meningkatkan pelepasan panas alami juga menunjukkan bahwa penggunaan peredam panas dengan konveksi alami mampu menurunkan suhu sel surya sebesar 5,4%, sedangkan efisiensi listrik meningkat sebesar 8% [21]. Serta pemanfaatan sirip pendingin (*fins*) pada konveksi alami terbukti meningkatkan daya output sebesar 0,12% dan meningkatkan efisiensi listrik dari 3,31% menjadi 3,32% dibandingkan panel tanpa sirip [22]. Namun, terdapat keterbatasan literatur di mana belum ada studi komprehensif yang membandingkan dan mengintegrasikan efektivitas ketiga konfigurasi tersebut dalam satu kerangka analisis yang seragam. Berbeda dari studi terdahulu yang berfokus pada satu metode tunggal, penelitian ini melakukan evaluasi lintas-metode (*cross-method evaluation*) untuk memetakan hubungan kausalitas dan korelasi multi-parameter meliputi temperatur permukaan, daya keluaran (*output power*), dan efisiensi konversi energi pada panel surya *polycrystalline* 100 Wp. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi keilmuan berupa matriks pembandingan dan standar acuan baru dalam menentukan strategi pendinginan konveksi bebas yang paling optimal tanpa energi tambahan.

Implementasi penelitian dilakukan pada panel surya polycrystalline berkapasitas 100 Wp dengan menerapkan sistem pendinginan konveksi udara bebas (*natural convection*) melalui pemasangan panel pada rangka terbuka agar sirkulasi udara berlangsung secara alami. Pengujian dilakukan selama 3 hari dengan pengambilan data setiap satu jam pada pukul 08.00–16.00 WIB, meliputi temperatur permukaan panel dan daya keluaran. Pengukuran temperatur menjadi parameter penting karena perubahan suhu panel dapat memengaruhi kinerja listrik yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses pendinginan panel mampu [23] menghasilkan temperatur sebesar 0,15°C dalam 5 detik dan 1,271°C dalam 1 menit, dengan penurunan suhu dari 45°C hingga di bawah 40°C membutuhkan waktu sekitar 4–5 menit [24]. Temuan-temuan ini menjadi dasar untuk melakukan studi ini, yang akan memantau variasi suhu pada panel secara berkala dan meneliti bagaimana kaitannya dengan daya keluaran selama proses konveksi udara bebas. Jumlah daya listrik yang diterima permukaan panel surya saat beroperasi dikenal sebagai daya masukannya. Dengan menggunakan persamaan 1 dan multimeter untuk mengukur tegangan masukan dan arus masukan panel surya, daya masukan panel surya ditentukan. Jumlah daya masukan yang dapat diubah panel surya menjadi energi listrik hingga 478,548 W meningkat seiring dengan intensitas radiasi matahari yang diterimanya. Daya keluaran panel surya merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik melalui proses konversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Besarnya daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti intensitas radiasi matahari, temperatur panel saat beroperasi, dan karakteristik modul fotovoltaik dengan nilai 44,439 W tanpa pendingin dan 49,181 W dengan pendingin serta efisiensi 13,541% menjadi 14,162% [25]. Nilai daya keluaran dapat ditentukan berdasarkan pengukuran tegangan dan arus listrik pada sisi keluaran panel. Selanjutnya, daya keluaran panel surya dihitung menggunakan hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran dengan persamaan 2 yang diperoleh melalui pengukuran menggunakan multimeter. Berdasarkan uraian tersebut, dapat diketahui bahwa temperatur panel surya memiliki pengaruh terhadap daya dan efisiensi listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, penerapan sistem pendinginan pasif dengan memanfaatkan konveksi alami udara bebas dapat menjadi salah satu metode untuk membantu menurunkan temperatur panel dan mempertahankan kinerjanya. Hasil penelitian Almuwailhi dan Zeitoun menunjukkan bahwa pendinginan dengan konveksi alami mampu meningkatkan energi harian dan efisiensi panel fotovoltaik dibandingkan panel tanpa pendinginan hingga selisih daya 6,98 W (16,76 W menjadi 23,74 W) dan efisiensi 3,96% menjadi 5,42% [26].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pendinginan pasif konveksi udara bebas terhadap performa termal dan kelistrikan panel surya *polycrystalline* 100 Wp ($V_{mp} = 22,8$ V, $I_{mp} = 4,39$ A). Pada puncak radiasi matahari (70 W/m^2), panel tanpa pendinginan mengalami pemanasan ekstrem hingga 59,8°C–64°C yang memerosotkan tegangan kerja menjadi 13,6 V dan efisiensi konversi daya ke titik 70,2%–63,2%. Melalui penyediaan celah sirkulasi udara alami sebesar 15–20 cm di bagian *backsheet* tanpa daya tambahan (0 W), pelepasan kalor konvektif yang dipicu perbedaan densitas udara berhasil menurunkan temperatur permukaan panel sebesar 9,8°C hingga mencapai rentang ideal 36,8°C–39,3°C. Penurunan suhu ini memicu pemulihan tegangan kerja dari 13,6 V menjadi 15,9 V serta menjaga stabilitas arus pada 3,07 A, yang mendorong lonjakan daya listrik keluaran dari 55,3 W menjadi daya puncak 65,6 W dengan efisiensi kelistrikan puncak mencapai 63%. Hasil ini membuktikan bahwa pendinginan konveksi udara bebas merupakan strategi yang praktis, hemat biaya, dan efektif untuk menjaga stabilitas daya serta efisiensi PLTS di lingkungan tropis.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model Fisik

Panel surya modul fotovoltaik (PV) jenis *polycrystalline* merek Maysun Solar dengan kapasitas 100 Watt (*Rated Maximum Power/Pm*) dengan toleransi daya 0–5% (Gambar 1). Berdasarkan Tabel 1 spesifikasi teknisnya, panel ini dirancang untuk bekerja pada tegangan daya maksimum (V_{mp}) sebesar 22,8 V dan arus daya maksimum (I_{mp}) sebesar 4,39 A, serta memiliki tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) 26,48 V dan arus hubung singkat (I_{sc}) 4,94 A. Modul berukuran 760 × 670 × 35 mm dan berbobot 5,3 kg ini sanggup beroperasi pada rentang suhu –40°C hingga +85°C dengan ketahanan tegangan sistem maksimum hingga 1000 VDC.



Gambar 1. Panel Surya PV berbahan *polycrystalline*

Tabel 1. Spesifikasi Modul Panel Surya PV berbahan *Polycrystalline*.

Item	Spesifikasi
Merk	Maysun Solar
Dimension	760 x 670 x 35 mm (509.200 mm ²)
Max Power	100 W
Tolerance	0-5%
Short Circuit Current (ISC)	4,94 A
Open Circuit Current (VOC)	26,48 V
Voltage at P _{max}	22,8 V
Current at P _{max}	4,39 A
Maximum System Voltage	1500 V
Maximum Series Fuse Rating	10 A
Operation Temperature	40-85 °C
Normal Operating Cell Temperature	47 °C

2.2 Material

Udara berfungsi sebagai media pendingin konveksi bebas dengan memanfaatkan perbedaan densitas untuk menciptakan sirkulasi alami. Kemampuan udara menyerap panas ditentukan oleh koefisien transfer panas konveksi dalam satuan Watt per meter persegi Kelvin (h), konduktivitas termal sebesar $0,0257 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (k), serta kapasitas kalor jenis sebesar $1.007 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}$ (c). Saat menyerap panas, densitas udara sebesar $1,184 \text{ kg/m}^3$ (ρ), sehingga udara naik melewati pergerakan hambatan viskositas kinematik sebesar $1,554 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (ν) seperti yang dijelaskan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Material Properti Material Udara

Material/media	Parameter Fisis & Termal	Nilai & Satuan
Fluida Udara pendingin	Massa Jenis (ρ)	$1,184 \text{ kg/m}^3$
Udara Lingkungan	Temperatur Operasional (T_{amb})	$20\text{-}30^\circ \text{C}$
	Massa Jenis (ρ)	$1,184 \text{ kg/m}^3$
	Konduktivitas Termal (k)	$0,0257 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
	Viskositas Dinamis (μ)	$1,84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

2.3 Skema eksperimen

Skema eksperimen (Gambar 2) konveksi bebas pada penelitian ini diawali pada pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB Skema eksperimen menetapkan penelitian pendinginan konveksi bebas udara (*free convection*) dirancang secara komprehensif dengan mengendalikan dan memantau parameter kuantitatif secara ketat. Peralatan eksperimen disusun terintegrasi mulai dari modul panel surya jenis *Polycrystalline* merk Maysun Solar berkapasitas 100 Wp (ukuran penampang $760 \text{ mm} \times 670 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ atau luas $0,5092 \text{ m}^2$, tegangan $V_{mp} = 22,8 \text{ V}$, dan arus $I_{mp} = 4,39 \text{ A}$) yang dipasang pada rangka dudukan dengan sudut kemiringan tetap dan orientasi menghadap ke arah datangnya sinar matahari. Sistem pendingin bekerja dengan memanfaatkan pelepasan panas secara pasif melalui aliran udara alami (massa jenis $\rho \approx 1,184 \text{ kg/m}^3$, kalor jenis $c_p \approx 1.007 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}$, dan konduktivitas termal $k \approx 0,0257 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) secara kontinu dengan menyediakan celah sirkulasi udara sebesar 15–20 cm di bagian belakang (*backsheets*) penampang permukaan panel tanpa bantuan pendingin mekanis. Rangkaian listrik terhubung langsung dari panel surya menuju *Solar Charge Controller* (SCC) dan baterai penyimpanan 12V untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan.

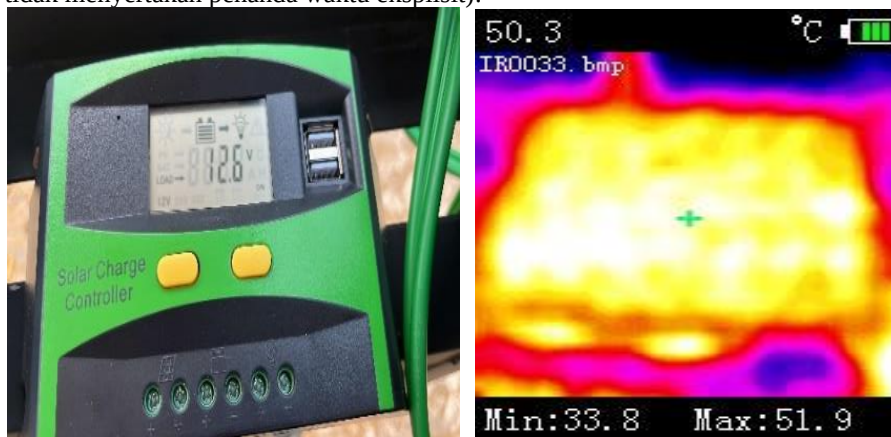
Eksperimen ini menetapkan variabel terikat utama yang diukur secara berkala meliputi temperatur permukaan panel surya, intensitas atau *flux* radiasi matahari (G), tegangan keluaran PV (V_{out}), arus keluaran (I_{out}), daya masuk (P_{in}), daya keluar (P_{out}), dan efisiensi konversi (η). Sesuai dengan batasan kondisi operasional, temperatur permukaan panel tanpa ruang sirkulasi memadai mencapai puncaknya hingga 58°C sampai 64°C (dengan rata-rata ambang batas 40°C hingga 50°C), sedangkan penerapan sistem pendingin konveksi bebas udara dengan batas operasi mulai suhu 40°C berhasil menahan laju kenaikan termal dan menjaga temperatur permukaan panel berada pada kisaran rentang 40°C hingga 51°C (dengan temperatur rata-rata harian sebesar 44°C , serta nilai terendah mencapai 28°C pada pagi hari). Pengujian diulang beberapa kali pada kondisi cuaca yang relatif konsisten untuk memperoleh data yang representatif dan meminimalkan pengaruh fluktuasi intensitas radiasi matahari maupun kondisi lingkungan lainnya. Seluruh data yang diperoleh selanjutnya direkapitulasi dan dianalisis untuk melihat pola hubungan antara suhu permukaan panel dengan tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi panel surya.



Gambar 2. Skema Eksperimen

2.4 Metode Pengukuran

Pengukuran data (Gambar 3) dilakukan dengan metode eksperimen melalui pengujian langsung terhadap panel surya pada kondisi luar ruangan dengan memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi. Berdasarkan suhu dokumentasi foto layar *Solar Charge Controller* (SCC) yang telah dikumpulkan selama pengujian mencakup beberapa kali pembacaan pada mode suhu (BAT), tegangan PV, dan tegangan BAT/LOAD nilai-nilai berikut teramati dan dikelompokkan berdasarkan pola tinggi/rendahnya nilai (bukan berdasarkan stempel waktu, karena dokumentasi foto tidak menyertakan penanda waktu eksplisit):



Gambar 3. Tegangan Load dan Termal Camera.

2.5 Reduksi Data

a. Daya Masuk Panel Surya

Penentuan daya yang dihasilkan modul fotovoltaik membutuhkan kalkulasi terhadap total daya radiasi yang diterima (daya masuk). Besaran daya masuk ini diperoleh dari hasil perkalian antara nilai iradiasi sinar matahari di lokasi dengan luas penampang permukaan panel PV, yang dihitung menggunakan persamaan 1.

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} \quad (1)$$

b. Daya keluaran panel

Sementara itu, besarnya daya output yang diproduksi oleh modul fotovoltaik ditentukan melalui perkalian antara nilai arus listrik dan tegangannya, yang dikalkulasikan menggunakan persamaan 2.

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (2)$$

c. Arus

Arus listrik banyaknya muatan listrik yang mengalir melalui suatu penghantar dalam tiap satuan waktu. Besarnya arus listrik yang mengalir pada suatu rangkaian ditentukan oleh perbandingan antara daya listrik dengan tegangannya, yang dikalkulasikan menggunakan persamaan 3 dan 4.

Arus Masuk (I_{in})

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (3)$$

Arus Keluar (I_{out})

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad (4)$$

d. Tegangan

Tegangan listrik perbedaan potensial listrik antara dua titik yang mendorong muatan listrik agar dapat mengalir dalam suatu rangkaian. Besarnya nilai tegangan listrik diperoleh dari hasil pembagian antara daya listrik dengan arus listrik yang mengalir, yang dihitung menggunakan persamaan 5 dan 6.

Tegangan Masuk (V_{in})

$$V_{in} = \frac{P_{in}}{I_{in}} \quad (5)$$

Tegangan Keluar (V_{out})

$$V_{out} = \frac{P_{out}}{I_{out}} \quad (6)$$

Efisiensi panel surya dihitung dengan membandingkan daya keluar aktual terhadap daya input radiasi matahari yang diterima oleh luas panel PV menggunakan persamaan 7.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAAN**3.1 Metode Pendinginan Konveksi Bebas (Udara)**

Pendinginan konveksi bebas (konveksi alami) adalah metode pendinginan pasif (*passive cooling*) pada panel surya yang membuang panas melalui pergerakan udara secara alami akibat perbedaan suhu, tanpa bantuan alat mekanis seperti kipas. Pendinginan konveksi udara merupakan solusi pasif untuk menstabilkan temperatur modul fotovoltaik dari pemanasan ekstrem. Penurunan suhu panel menuju ambang batas ideal sekitar 40°C berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi konversi daya, yang secara langsung mendorong optimalisasi output energi listrik, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran

Waktu	Flux (W/m ²)	Pin,rec D1	Pout D1	Rsys D1	Pin,rec D2	Pout D2	Rsys D2	Pin,rec D3	Pout D3	Rsys D3
08:00	63	55,3	35,1	63%	55,4	35,1	63%	55,7	35,1	63%
09:00	64	56,7	35,3	62%	56,8	35,2	62%	56,9	35,3	62%
10:00	66	57,9	36,0	62%	57,7	35,5	62%	57,4	35,8	62%
11:00	68	63,4	36,3	57%	63,6	35,8	56%	63,8	36,1	57%
12:00	70	65,6	36,8	56%	65,8	36,1	55%	65,7	36,5	55%
13:00	69	64,1	36,7	57%	64,5	35,9	56%	64,8	36,3	56%
14:00	67	61,5	36,1	59%	61,7	35,7	58%	61,9	35,9	58%
15:00	65	59,1	35,6	60%	59,4	35,4	60%	59,7	35,5	59%
16:00	63	56,1	35,2	63%	56,2	35,2	63%	56,5	35,2	62%

Fluks radiasi meningkat dari 63 W/m² pada pukul 08.00 menjadi maksimum 70 W/m² pada pukul 12.00, kemudian menurun menjadi 63 W/m² pada pukul 16.00. Pola tersebut menunjukkan pola harian naik-turun, tetapi tidak cukup untuk menyimpulkan kondisi cuaca atau orientasi optimum karena variabel meteorologis lain tidak diukur.

Daya keluaran rata-rata meningkat dari 35,10 W pada pukul 08.00 menjadi 36,47 W pada pukul 12.00, kemudian turun menjadi 35,20 W pada pukul 16.00. Perubahannya relatif sempit dibanding perubahan daya masukan tercatat. Karena modul terhubung ke SCC dan baterai 12 V, daya yang tercatat tidak dapat langsung dianggap sebagai daya maksimum modul.



Gambar 4. Metode Pendinginan Konveksi Bebas (Udara).

3.2 Statistik Deskriptif Antarhari

Tabel 4. Statistik Deskriptif Antarhari

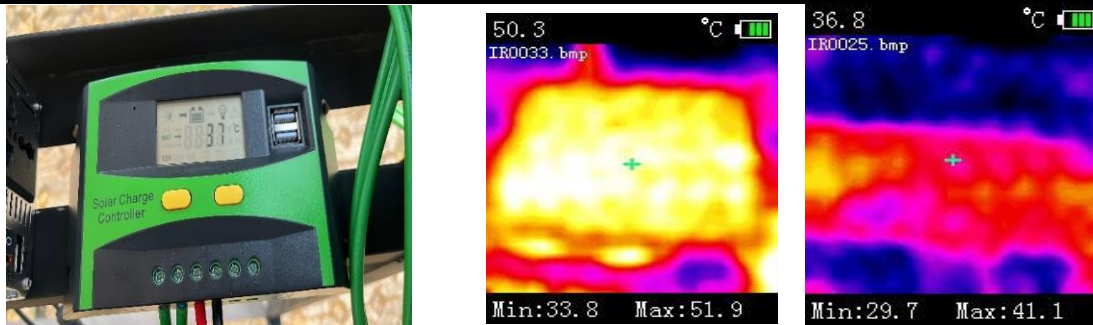
Waktu	Pin,rec Mean $\pm$ SD (W)	Pout Mean $\pm$ SD (W)	Rsys Mean $\pm$ SD (%)
08:00	55,47 $\pm$ 0,21	35,10 $\pm$ 0,00	63,28 $\pm$ 0,24
09:00	56,80 $\pm$ 0,10	35,27 $\pm$ 0,06	62,09 $\pm$ 0,15
10:00	57,67 $\pm$ 0,25	35,77 $\pm$ 0,25	62,02 $\pm$ 0,44
11:00	63,60 $\pm$ 0,20	36,07 $\pm$ 0,25	56,71 $\pm$ 0,50
12:00	65,70 $\pm$ 0,10	36,47 $\pm$ 0,35	55,51 $\pm$ 0,62
13:00	64,47 $\pm$ 0,35	36,30 $\pm$ 0,40	56,31 $\pm$ 0,84
14:00	61,70 $\pm$ 0,20	35,90 $\pm$ 0,20	58,19 $\pm$ 0,45
15:00	59,40 $\pm$ 0,30	35,50 $\pm$ 0,10	59,77 $\pm$ 0,41
16:00	56,27 $\pm$ 0,21	35,20 $\pm$ 0,00	62,56 $\pm$ 0,23
Keseluruhan	60,12 $\pm$ 3,71	35,73 $\pm$ 0,51	59,60 $\pm$ 2,92

Variasi antarhari pada jam yang sama relatif kecil untuk daya keluaran, dengan simpangan baku maksimum 0,40 W pada pukul 13.00. Namun, variasi kecil tersebut tidak cukup untuk membuktikan presisi alat atau stabilitas lingkungan secara umum karena tidak tersedia kalibrasi instrumen, pengukuran cuaca simultan, dan replikasi pada hari yang identik. Kesimpulan yang lebih tepat adalah bahwa tiga hari pengamatan menunjukkan pola temporal yang serupa.

3.3 Performa Termal Panel Surya

Distribusi suhu permukaan modul memperlihatkan pola warna dari warna putih/kuning di area pusat hingga biru atau ungu di bagian tepi. Masih tingginya temperatur di bagian tengah panel (50,3°C) mengindikasikan bahwa pelepasan panas secara konveksi udara alami baru efektif pada area periferi (pinggir) dan belum terdistribusi secara merata di seluruh permukaan modul.

Hasil pencitraan termal pada Gambar 5 menunjukkan perbedaan distribusi suhu permukaan panel surya sebelum dan sesudah pendinginan. Sebelum pendinginan, citra termal camera didominasi warna kuning-putih yang menandakan suhu tinggi merata di permukaan panel, dengan suhu titik ukur 50,3°C dan rentang 33,8–51,9°C. Kondisi ini menunjukkan akumulasi panas akibat radiasi matahari tanpa mekanisme pelepasan kalor, yang menyebabkan sel surya bekerja jauh di atas STC (25°C) sehingga menurunkan tegangan dan efisiensi konversi. Setelah penerapan pendinginan konveksi bebas, citra termal camera berubah dominan menjadi warna ungu-biru, dengan suhu titik ukur turun menjadi 36,8°C dan rentang 29,7–41,1°C. Penurunan suhu rata-rata 9,8°C ini membuktikan bahwa udara efektif menyerap kalor dari permukaan panel melalui konveksi Bebas. Hasil ini sejalan dengan data kuantitatif, di mana penurunan suhu berkontribusi pada peningkatan tegangan PV (13,6V $\rightarrow$ 15,9V) dan efisiensi (55% $\rightarrow$ 63%), sehingga mengonfirmasi efektivitas sistem pendinginan dalam menjaga performa termal dan elektrik panel surya.



Gambar 5. Gambar pada Panel Surya PV dengan Pendingin Konveksi Bebas Udara.

3.4 Keterbatasan Penelitian

Pengujian menggunakan satu modul sehingga hasil tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh modul 100 Wp. Durasi pengamatan tiga hari belum mewakili variasi musiman dan kondisi cuaca yang lebih luas. Tidak tersedia kontrol simultan terukur pada kondisi identik tanpa konfigurasi konveksi bebas, sehingga efek kausal pendinginan belum dapat dipisahkan dari pengaruh irradiance dan lingkungan. Sebagian dokumentasi tidak memiliki timestamp eksplisit sehingga keterlacakan temporal thermal imaging terbatas. Parameter thermal imaging seperti emissivity, jarak kamera, sudut pengambilan, dan temperatur lingkungan tidak terdokumentasi lengkap. Nilai daya masukan tercatat tidak konsisten dengan daya radiasi yang dihitung dari irradiance $\times$ luas modul sehingga rasio 55–63% tidak dapat disebut efisiensi konversi PV. Modul terhubung ke SCC dan baterai sehingga daya yang tercatat dapat dipengaruhi kondisi beban dan pengendali. Pengukuran I–V dan maximum power point belum dilakukan.

3.5 Implikasi Penelitian

Secara praktis, celah udara belakang 15–20 cm dapat digunakan sebagai konfigurasi awal untuk studi pendinginan pasif karena tidak membutuhkan perangkat mekanis tambahan. Namun, penelitian ini belum mengukur konsumsi energi parasitik, biaya, koefisien perpindahan panas, atau perubahan Pmax terhadap kondisi tanpa pendinginan. Oleh karena itu, istilah hemat biaya atau paling efektif tidak digunakan sebagai kesimpulan.

Secara metodologis, hasil penelitian menunjukkan pentingnya audit definisi daya dan efisiensi sebelum interpretasi performa PV. Data irradiance harus berasal dari pengukuran yang dapat ditelusuri, sedangkan daya keluaran perlu diukur pada kondisi operasi yang diketahui. Pengukuran I–V sesuai IEC 60904-1:2020 akan memungkinkan identifikasi Voc, Isc, Vmp, Imp, dan Pmax secara lebih tepat [13].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkarakterisasi kinerja termal dan elektrik modul fotovoltaik polikristalin 100 Wp yang dipasang dengan celah sirkulasi udara alami 15–20 cm. Selama tiga hari pengamatan pukul 08.00–16.00 WIB, fluks radiasi yang dilaporkan berada pada 63–70 W/m² dan mencapai 70 W/m² pada pukul 12.00. Daya keluaran rata-rata berada pada rentang 35,10–36,47 W dan mencapai nilai rata-rata maksimum 36,47 W pada pukul 12.00. Rasio daya keluaran terhadap daya masukan tercatat berada pada 55,51–63,28% dengan rata-rata 59,60%. Rasio tersebut tidak diklaim sebagai efisiensi konversi modul PV karena terdapat ketidaksesuaian antara irradiance, luas modul, dan daya masukan tercatat. Citra thermal menunjukkan temperatur titik 50,3°C dan 36,8°C pada dua pengamatan berbeda, tetapi perbedaannya tidak digunakan sebagai ukuran efektivitas pendinginan karena kondisi pengambilan tidak sepenuhnya terpasangkan. Penelitian memberikan bukti deskriptif mengenai perilaku termal dan elektrik sistem pada konfigurasi konveksi bebas, tetapi belum cukup untuk menetapkan peningkatan efisiensi modul secara kausal. Penelitian berikutnya perlu menggunakan pengukuran irradiance terkalibrasi, kontrol tanpa pendinginan, pencatatan kondisi lingkungan secara simultan, thermal imaging dengan parameter akuisisi lengkap, serta pengukuran I–V dan maximum power point sesuai standar.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN (ARTIFICIAL INTELLIGENCE)

Dalam penyempurnaan naskah ini, penulis menggunakan kecerdasan artifisial generatif sebagai bantuan penyuntingan bahasa, penataan struktur, dan peningkatan kejelasan uraian berdasarkan naskah penelitian serta komentar reviewer. AI tidak digunakan untuk menghasilkan data eksperimen, memanipulasi hasil pengukuran, membuat replikasi fiktif, atau menetapkan temuan yang tidak didukung data. Seluruh data, angka, interpretasi, dan isi akhir naskah menjadi tanggung jawab penulis.

REFERENSI

- [1] I. Artikel, "Workshop Transfer Knowledge Perancangan Panel Surya Berbasis Limbah Rumah Tangga untuk Kebutuhan Listrik," vol. 7, no. 2, 2026.
- [2] Muhamad Safi'i and Muhammad Faesal Febriyandiono, "Workshop Perawatan dan Perbaikan PLTS berbasis Limbah untuk Masyarakat RW 3 Kelurahan Bergaslor," J. Pengabd. Kpd. Masy. Nusantara., vol. 7, no. 1, pp. 1368–1375, 2026.
- [3] Muhamad Juli Saputra, Muhamad Idrokul Fahmi, Ahmad Ramdhani, Sahrul Maulana Rozaki, Hamdan Ramadan, and Muhamad Safi'i, "Rancang Bangun Panel Surya Berbasis Limbah Rumah Tangga Untuk Kebutuhan Penerangan Jalan Rw 3 Kelurahan Bergaslor, Semarang," J. Pengabd. Masy. Sapangambe Manoktok Hitei, vol. 4, no. 2, pp. 251–259, 2024, doi: 10.36985/ckajg087.
- [4] R. Yanuar et al., "ANALISIS PEMANFAATAN RADIASI PADA SISTEM PANEL SURYA UNTUK OPTIMALISASI ENERGI TERBARUKAN (Analysis of Radiation Utilization in Solar Panel Systems for Renewable Energy Optimization)," vol. 15, no. 02, pp. 34–41, 2026.
- [5] Muhammad Iqbal Achmad, Afdal Syarif, Dedy Ashari, and Zuliadin, "356-Article Text-1468-6-10-20230324," Sultra J. Mech. Eng., vol. 2, no. 1, pp. 8–16, 2023.
- [6] F. Pijoh, B. D. P. Kusuma, and L. P. Purba, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi Ramah Lingkungan yang Berkelanjutan," Ind. Syst. Eng. Journals, vol. 2, no. 2, pp. 201–207, 2024, doi: 10.37477/isejou.v2i2.631.
- [7] Y. Wang, L. Pan, J. Hao, D. Ding, K. Tan, and Z. Zhao, "Performance investigation of a novel passive cooling strategy for photovoltaic panels using hollow staggered triangular fins," Case Stud. Therm. Eng., vol. 76, no. July, p. 107326, 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.107326.
- [8] A. Sofijan et al., "Development of Passive Cooling With Perforated Plates and Real-Time Monitoring for Pv Efficiency Improvement," Eastern-European J. Enterp. Technol., vol. 3, no. 5, pp. 30–38, 2025, doi: 10.15587/1729-4061.2025.327590.
- [9] F. Wang et al., "Enhancing Heat Transfer of Photovoltaic Panels with Fins," Int. J. Energy Res., vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/5180627.
- [10] T. Ibrahim, J. Faraj, K. Kiswani, G. El Achkar, R. Murr, and M. Khaled, "Cooling photovoltaic panels with air convection – Parametric environmental and economic analysis with case studies," e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy, vol. 12, no. July 2024, p. 101020, 2025, doi: 10.1016/j.prime.2025.101020.
- [11] O. Elkhoundafi and R. Elgouri, "Development and testing of a dedicated cooling system for photovoltaic panels," Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 15, no. 5, p. 4387, 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i5.pp4387-4394.
- [12] 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.
- [13] M. Krstic et al., "Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation," Ain Shams Eng. J., vol. 15, no. 1, p. 102330, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102330.
- [14] G. Abril-Macias, J. Peralta-Jaramillo, E. Delgado-Plaza, I. Sosa-Tinoco, and D. Avilés, "Simulation of the fluid dynamic and thermal behavior of an experimental passive cooling system of photovoltaic panels," Heliyon, vol. 10, no. 3, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24768.
- [15] S. V. Hudişteanu, N. C. Cherecheş, F. E. Ţurcanu, I. Hudişteanu, M. Verdeş, and A. D. Ancaş, "Experimental analysis of innovative perforated heat sinks for enhanced photovoltaic efficiency," Energy Convers. Manag. X, vol. 25, no. October 2024, 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100842.
- [16] H. A. Aljaberi, R. A. Flayyih, and K. J. Alwan, "Experimental investigation of passive and forced cooling effects on PV panel performance using perforated fin heat sinks," Energy Reports, vol. 15, no. March, p. 109345, 2026, doi: 10.1016/j.egyr.2026.109345.
- [17] K. Basyar, Z. Arifin, D. D. D. P. Tjahjana, and S. D. Prasetyo, "Analysis of the Impact of Different Fin Configurations as Passive Coolants on Photovoltaic Performance," Int. J. Heat Technol., vol. 42, no. 6, pp. 2115–2124, 2024, doi: 10.18280/ijht.420630.
- [18] N. Badi and A. H. Laatar, "Improved cooling of photovoltaic panels by natural convection flow in a channel with adiabatic extensions," PLoS One, vol. 19, no. 7 July, pp. 1–23, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0302326.
- [19] A. J. Novitasari, B. W. Dionova, A. Jaenul, and M. I. Abdullah, "Optimization of Photovoltaic Cooling System Performance: a Comparison Review of Active, Passive and Combined Methods," Transm. J. Ilm. Tek. Elektro, vol. 27, no. 3, pp. 149–158, 2025, doi: 10.14710/transmisi.27.3.149-158.
- [20] G. R. Cahyono, P. R. Ansyah, and N. Q. Awaly, "Pendinginan panel surya menggunakan kotak pendingin dan sirip pendingin," Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol., vol. 13, no. 1, pp. 73–79, 2021, doi: 10.28989/angkasa.v13i1.947.
- [21] G. R. Cahyono, P. Ansyah, J. Riadi, and N. Q. Awaly, "Pengaruh Pendinginan Menggunakan Sirip Terhadap

- Performa Panel Surya,” *Elem. J. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 51–56, 2021, doi: 10.34128/je.v8i1.157.
- [22] S. Prayogi, F. Silviana, and Z. Zainuddin, “Peningkatan Performa Sel Surya Dengan Sistem Peredam Panas,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 143–147, 2023, doi: 10.37905/jjee.v5i2.18802.
- [23] T. Ibrahim, M. Abou Akrouh, F. Hachem, M. Ramadan, H. S. Ramadan, and M. Khaled, “Cooling Techniques for Enhanced Efficiency of Photovoltaic Panels,” *Energies*, vol. 17, no. 3, 2024.
- [24] E. -Jurnal Otomasi Kelistrikan dan Energi Terbarukan et al., “Sistem Monitoring Pendinginan Panel Surya ... Sistem Monitoring Pendinginan Panel Surya Menggunakan Uap Air Berbasis IoT Monitoring System of Solar Panel Water Vapor Cooling IOT Based,” vol. 6, pp. 29–38, 2024.
- [25] R. Hidayat and M. Sholeh, “Analisis Perpindahan Panas Laju Konveksi Pada Panel Photovoltaic Terhadap Kapasitas Baterai Menghasilkan Listrik,” *Hikamatzu J. Multidisiplin*, vol. 2, no. 1, pp. 176–185, 2025, [Online]. Available: <https://yasyahikamatzu.com/index.php/hjm/about%0Ahttps://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- [26] M. L. Azizi, S. Sunaryo, and A. Irfan, “Efektivitas Dan Efisiensi Panel Surya Berbasis Pendinginan Photovoltaic Dengan Material Pcm,” *J. Econ. Bus. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 397–408, 2026, doi: 10.32500/jebe.v7i2.11104.