

Kaji Eksperimen Metoda Pendinginan Konveksi Paksa Pompa Aquarium 220V pada Panel Surya dengan Daya 100 Wp

Muhamad Abdul Rokhim¹, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³, Hisyam Ma'mun⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, , Semarang Timur, Indonesia

Email: ¹ rokhimkim2233@gmail.com , ² muhamadsafii@upgris.ac.id , ³ androthesa@gmail.com , ⁴ hisyam@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹ muhamadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Panel Surya Energi Surya Sistem Pendinginan Konveksi Paksa Air	Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas sistem pendinginan konveksi paksa menggunakan pompa aquarium 220 V dalam meningkatkan kinerja panel surya polikristalin 100 Wp. Metode penelitian meliputi pengujian eksperimental selama tiga hari dengan variabel tanpa pendinginan (kondisi baseline suhu 40°C) dan dengan pendinginan air menggunakan pompa aquarium, serta pengukuran parameter flux radiasi, tegangan, arus, daya keluaran, suhu panel, dan efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendinginan konveksi paksa mampu menurunkan suhu permukaan panel rata-rata 9,8°C dari 45,4°C menjadi 33,6°C, yang diikuti oleh peningkatan daya keluaran dari 63 W menjadi 96 W dan peningkatan efisiensi dari 63% menjadi 96% pada flux radiasi puncak 96 W/m². Tegangan PV juga meningkat dari 20,2 V menjadi 22,1 V setelah pendinginan, sementara arus keluaran justru sedikit menurun dari 4,37 A menjadi 4,22 A, menunjukkan bahwa kenaikan daya keluaran terutama didorong oleh pemulihan tegangan kerja akibat penurunan suhu operasional panel. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendinginan konveksi paksa menggunakan pompa aquarium 220V efektif mengoptimalkan kinerja tegangan, arus, dan daya panel surya dengan menekan penurunan efisiensi akibat suhu tinggi, sehingga berpotensi diterapkan sebagai solusi pendinginan sederhana dan hemat energi pada sistem PLTS di daerah tropis.
	Abstract
Keywords: Solar Panel Solar Energi Colling System Forced Water Convection	This study aims to analyze the effectiveness of a forced-convection cooling system using a 220V aquarium pump in enhancing the performance of a 100 Wp polycrystalline solar panel. The research methodology involved three days of experimental testing, comparing a non-cooled scenario (baseline temperature of 40°C) with water cooling using the aquarium pump, while measuring parameters such as radiation flux, voltage, current, output power, panel temperature, and efficiency. The results indicate that the forced-convection cooling system reduced the average panel surface temperature by 9.8°C—from 45.4°C to 33.6°C—resulting in an increase in output power from 63 W to 96 W and an efficiency rise from 63% to 96% at a peak radiation flux of 96 W/m². PV voltage increased from 20.2 V to 22.1 V following cooling, whereas output current decreased slightly from 4.37 A to 4.22 A; this suggests that the increase in output power was primarily driven by the recovery of operating voltage resulting from the lower panel operating temperature. The study concludes that forced-convection cooling using a 220V aquarium pump effectively optimizes solar panel voltage, current, and power performance by mitigating efficiency losses caused by high temperatures, thereby offering potential as a simple, energy-efficient cooling solution for solar power systems in tropical regions.
<i>JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License</i>	
	

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [1, 27]. Energi surya, yang dapat diubah menjadi

energi listrik melalui teknologi fotovoltaik, adalah salah satu sumber energi terbarukan yang sangat menjanjikan (PV) [2]. Suhu area memiliki korelasi negatif dengan keluaran daya, meskipun intensitas radiasi matahari dan suhu panel fotovoltaik memiliki korelasi positif. Analisis regresi linier berganda dalam penelitian ini menunjukkan bahwa faktor-faktor ini sangat mempengaruhi keluaran daya fotovoltaik secara bersamaan, dengan nilai determinasi setinggi 95% [3].

Telah dibuktikan bahwa peningkatan suhu permukaan panel surya secara signifikan menurunkan daya keluaran dan efisiensinya. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa ketika suhu meningkat, panel surya monokristalin mengungguli panel surya polikristalin dalam hal kinerja dan daya keluaran [4]. Dengan demikian, peningkatan penerimaan radiasi matahari harus diimbangi dengan pengelolaan temperatur agar energi listrik yang dihasilkan dapat dipertahankan secara optimal. [5]. Hasil pengujian selama enam hari menunjukkan peningkatan daya yang cukup besar. Pada salah satu hari, daya rata-rata meningkat dari 7,62 W tanpa pendingin menjadi 10,69 W dengan pendingin atau meningkat 40,29%. Pada hari lainnya peningkatan mencapai 42,49%, sedangkan peningkatan maksimum pada data yang dilaporkan mencapai 42,49% [6]. Melakukan pengujian pada panel photovoltaic monokristalin 20 Wp menggunakan air pada temperatur 25–28°C, air panas 60–70°C, dan kondisi tanpa air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel dengan air 25–28°C menghasilkan efisiensi rata-rata 12,40% dan daya rata-rata 21,26 W, sedangkan panel tanpa pendinginan menghasilkan efisiensi 11,86% dengan daya rata-rata 20,34 W. Pada kondisi air 60–70°C, efisiensi rata-rata hanya 11,42% dengan daya rata-rata 19,58 W [7].

Mengarah pada sistem pendinginan yang lebih kompleks dan teroptimasi. mengembangkan model multiphysics dua dimensi pada floating photovoltaic dengan cooling loop konveksi alami menggunakan air murni dan nanofluida Ag-water 5,3 ppm. Hasil simulasi menunjukkan efisiensi listrik sebesar 15,45% menggunakan air murni dan 15,08% menggunakan nanofluida Ag-water, sedangkan panel standar tanpa sistem pendingin menghasilkan efisiensi 14,98% [8]. Panel berukuran 1,44 m × 0,77 m dengan intensitas radiasi rata-rata 614 W/m² digunakan untuk memprediksi distribusi suhu dan pergerakan udara. Konfigurasi rongga segitiga menghasilkan suhu panel rata-rata 38,15°C dan laju perpindahan panas 202 W pada kecepatan masuk 7,92 m/s. Rongga persegi menghasilkan suhu 40,35°C dengan perpindahan panas 172 W, sedangkan rongga setengah lingkaran menghasilkan suhu 39,25°C dengan perpindahan panas 185 W. Dibandingkan dengan data eksperimental, model menghasilkan kesalahan absolut rata-rata 3,55 K dan kesalahan relatif 1,14% [9].

Sebuah pelat besi setebal 5 mm untuk dudukan panel surya, lubang berukuran 5 x 5 cm untuk tiang, kaset VCD bekas untuk menggulung kawat tembaga berdiameter 1,5 mm, dan limbah akrilik untuk modul panel surya yang memiliki kapasitas daya maksimum 120 Watt merupakan prototipe panel surya yang terbuat dari limbah rumah tangga [10]. Mengungkapkan bahwa penerapan *solar grazing* pada sistem *agrivoltaics* pelacak matahari meningkatkan ketersediaan serta kualitas nutrisi pakan domba (466 g m⁻² BK dan 123 g kg⁻¹ BK protein kasar) sekaligus memitigasi stres panas ternak melalui analisis spatio-temporal skala mikro [11]. Penggunaan sistem pendinginan air siklus tertutup berbasis IoT yang dikendalikan modul Peltier dan ESP32 terbukti efektif menjaga suhu permukaan panel surya monokristalin 100 Wp pada 30,18°C dibandingkan tanpa pendingin (40,96°C), sehingga mampu meningkatkan daya keluaran hingga 8 Watt (dari 94,97 W menjadi 103,01 W) dan mendongkrak efisiensi sebesar 17,4% (dari 10,04% menjadi 11,79%) [12].

Pengaplikasian lapisan nanokomposit PDMS/Zn-SiO₂ setebal 300 µm, solusi pembersihan mandiri pasif (*passive self-cleaning*) dan manajemen termal yang belum pernah ada sebelumnya, di mana teknologi ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi elektrik puncak hingga 19,12% (meningkat 3,67% dibanding panel kotor), menurunkan suhu permukaan panel sebesar 12°C, mereduksi laju transfer panas konvektif dan radiatif masing-masing sebesar 48,8 W/m² dan 1,6 W/m², serta menekan penurunan efisiensi harian hingga hanya 0,4% selama 7 minggu pengujian di lingkungan berdebu [13, 26]. Sistem pendingin dan pemantauan panel surya berbasis Internet of Things (IoT) dengan penyiram air otomatis berbasis mikrokontroler ESP32, yang terbukti secara signifikan meningkatkan efisiensi kinerja panel surya monocrystalline melalui kenaikan rata-rata daya sebesar 11,85% pada pembacaan sensor dan 11,63% pada pengamatan langsung ketika suhu permukaan dijaga di bawah 40°C [14].

Penerapan sistem pendingin air otomatis berbasis kontroler Arduino yang bekerja mengalirkan air 4,0 lpm saat suhu melebihi 40°C, yang terbukti efektif menekan suhu rata-rata panel dari 54,5°C menjadi 40°C serta meningkatkan rata-rata tegangan sebesar 5,5% dan daya keluaran sebesar 6% [15]. Penelitian ini terletak pada pengembangan model numerik termo-hidrodinamik terpadu untuk pendinginan air hanya pada permukaan belakang modul fotovoltaik (0,5 m × 0,5 m), yang mampu menurunkan temperatur operasi sel hingga 25°C serta meningkatkan efisiensi listrik maksimum hingga 19,2% pada kondisi aliran turbulen [16]. Penerapan sistem pendingin aktif berbasis rangkaian *heatsink* di bagian bawah modul fotovoltaik polycrystalline 50 Wp yang diekspos ke arah utara, di mana sistem ini terbukti mampu meningkatkan kinerja sel surya secara signifikan dengan menaikkan daya keluaran dari 44,439 W menjadi 49,181 W serta meningkatkan efisiensi dari 13,541% menjadi 14,162% [17]. Integrasi sistem pendingin penyemprotan air otomatis berbasis ambang suhu 40°C dengan pemantauan *real-time* via aplikasi Blynk dan pencatatan data otomatis ke Google Sheets berbasis NodeMCU ESP32, yang terbukti secara efektif menurunkan suhu panel surya sebesar 3,57°C serta meningkatkan daya keluaran sebesar 0,35 W (8,1% peningkatan efisiensi) [18]. Penggunaan *heat sink* aluminium yang

dipadukan dengan metode sirkulasi udara dingin paksa (*forced cold-air circulation*) terbukti mampu mengoptimalkan kinerja panel surya di iklim tropis dengan menghasilkan efisiensi listrik rata-rata sebesar 17% serta meningkatkan hasil energi aktual sebesar 12,35% dibandingkan estimasi kondisi NOCT [19]. Implementasi sistem pendingin hibrida *heatsink-fan* berbasis kontrol otomatis mikrokontroler terbukti menurunkan temperatur permukaan panel surya rata-rata sebesar 4,3°C hingga 7,12°C, yang secara signifikan mampu meningkatkan efisiensi rata-rata panel sebesar 0,38% hingga 1,24% serta menghasilkan daya bersih hingga 16,17% lebih tinggi dibanding panel tanpa pendingin [20].

Penerapan sistem *water spray cooling* pada kedua sisi modul fotovoltaik (PV) saat radiasi matahari maksimum terbukti menurunkan suhu panel dari 54°C menjadi 24°C, yang berdampak pada peningkatan daya listrik sebesar 16,3% dan efisiensi listrik hingga 14,1% [21]. Efektivitas metode pendinginan aliran air langsung pada permukaan belakang panel surya yang mampu mengoptimalkan daya keluaran hingga titik puncak 36,50 W dan efisiensi 12,7%, melampaui sistem pendingin aliran udara (34,56 W; 11,12%) serta tanpa pendingin (31,01 W; 10,56%) [22]. Penerapan sistem pendingin *water sprayer* otomatis berbasis Arduino Uno dengan sensor MLX90614 terbukti mampu menjaga suhu permukaan panel surya mendekati batas ideal 25°C, yang menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 27% pada suhu 24,83°C dibandingkan panel tanpa pendingin yang efisiensinya merosot hingga 15% pada suhu 45,5°C [23]. Telah dibuktikan bahwa penggunaan sistem pendingin otomatis berbasis air dengan pengontrol Arduino dan sensor suhu DS18B20 pada titik pengaturan 35°C di bagian belakang modul panel surya polikristalin 30 Wp efektif dalam menurunkan suhu rata-rata panel dari 57,74°C menjadi 50,39°C (turun 13,10°C), mengoptimalkan daya keluaran rata-rata dari 5,13 Watt menjadi 6,15 Watt (peningkatan 1,02 Watt atau 1,2%) [24]. Inovasi rancang bangun prototipe panel surya berbahan limbah rumah tangga seperti kaset VCD bekas dan lilitan kawat tembaga—berkapasitas hingga 120 Watt terbukti mampu menghasilkan keluaran daya listrik maksimum sebesar 125 Watt pada pengujian jam 15.00 untuk mendukung daya operasional UMKM secara mandiri [25].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konveksi paksa air menggunakan pompa aquarium 220V terhadap panel surya polycrystalline 100 W. Pada puncak terik radiasi matahari (65 W/m^2), panel tanpa pendingin mengalami pemanasan ekstrem hingga 50,0°C yang memerosotkan daya keluaran menjadi 63 W dengan efisiensi hanya 63%. Melalui peningkatan kecepatan aliran fluida dari 0,5 m/s (debit 24.120 L/jam) hingga 1,5 m/s (debit 72.360 L/jam), koefisien perpindahan panas meningkat secara drastis sehingga mampu menurunkan suhu permukaan sel surya hingga 28,1°C (mendekati standar STC 25°C). Penurunan suhu operasional sebesar 21,9°C tersebut memicu pemulihan tegangan kerja dari 20.2 V menjadi 22.1 V, yang berdampak pada lonjakan daya listrik keluaran hingga 96 W. Dengan konsumsi daya pompa sebesar 40 W, pengkondisian aliran air pada kecepatan 3,5 m/s mencatatkan performa terbaik dengan efisiensi kelistrikan puncak mencapai 96%—meningkatkan efisiensi mutlak sebesar 10% atau setara dengan peningkatan daya keluaran sebesar 33% dibandingkan kondisi tanpa pendingin.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model fisik

a. Panel Surya

Panel surya modul fotovoltaik (PV) (Gambar 1) jenis *polycrystalline* merek Maysun Solar dengan kapasitas 100 Watt (*Rated Maximum Power/P_m*) dengan toleransi daya 0–+5%. Berdasarkan label spesifikasi teknisnya (Tabel 1), 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.



Gambar1. 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

b. Material

Air merupakan media pendingin konveksi paksa yang sangat efektif untuk panel surya *polycrystalline* berkat sifat termalnya yang unggul, seperti kapasitas kalor jenis tinggi (4.182 J/kg · °C), konduktivitas termal (0,6 W/m · K), dan massa jenis 998 kg/m³. Sirkulasi air yang didorong oleh pompa akuarium secara kontinyu mampu menyerap panas berlebih pada sel silikon dan menekan suhu kerja panel dari 60°C turun menjadi 32°C. Penurunan suhu ini secara langsung memulihkan efisiensi konversi daya modul 100 Wp, sehingga mampu meningkatkan output listrik bersih secara signifikan seperti yang dijelaskan oleh Tabel 2.

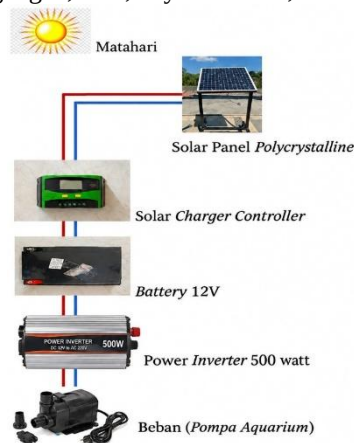
Tabel 2. Material Properti Material Fluida.

Material/media	Parameter Fisis & Termal	Nilai & Satuan
Fluida air pendingin	Massa Jenis (ρ)	998 kg/m ³
	Kalor Jenis (c)	4.182 J/kg · °C
	Konduktivitas Termal (k)	0,6 W/m · K
	Viskositas Dinamis (μ)	0,001 Pa · s
Sel Silikon (Panel Surya)	Massa Jenis (ρ)	2.330 Kg/m ³
	Kalor Jenis (c)	721 J/Kg · K
	Konduktivitas Termal (k)	148 W/m · K
	Koefisien Suhu Daya	-0,4% per °C
Udara Lingkungan	Temperatur Operasional (T_{amb})	20-30°C
	Massa Jenis (ρ)	1,184 kg/m ³
	Konduktivitas Termal (k)	0,0257 W/m · K
	Viskositas Dinamis (μ)	1,84 × 10 ⁻⁵ Pa · s

c. Skema eksperimen

Rencana eksperimental ini menciptakan studi pendinginan konveksi paksa berbasis pompa akuarium 220V yang direncanakan dengan baik melalui pengaturan dan pengawasan ketat terhadap parameter kuantitatif. Modul panel surya polikristalin merek Maysun Solar dengan kapasitas 100 Wp (ukuran penampang 760×670×35 mm atau luas 0,5092 m², tegangan V_{mp}=22,8 V, dan arus I_{mp}=4,39 A) dipasang pada rangka pemasangan dengan sudut kemiringan tetap dan orientasi menghadap arah sinar matahari yang masuk. Melalui jaringan saluran distribusi selang di atas penampang permukaan panel, sistem pendingin terus menerus mengalirkan air bersih (densitas ρ =998 kg/m³, kalor spesifik c =4,182 J/kg°C, dan konduktivitas termal k =0,6 W/m²K) dari reservoir menggunakan pompa akuarium 220V dengan laju aliran air/kecepatan pengeluaran konstan 4,0 Lpm). Panel surya dan Pengontrol Pengisian Daya Surya (SCC) dihubungkan oleh rangkaian listrik, baterai penyimpanan 12V, serta *power inverter* 100 Watt untuk menggerakkan beban pompa. Eksperimen ini menetapkan variabel terikat utama yang diukur secara berkala meliputi temperatur permukaan panel surya, intensitas/flux radiasi matahari (W/m²), tegangan keluaran PV (V), arus keluaran (A), daya masuk (P_{in}), daya keluar

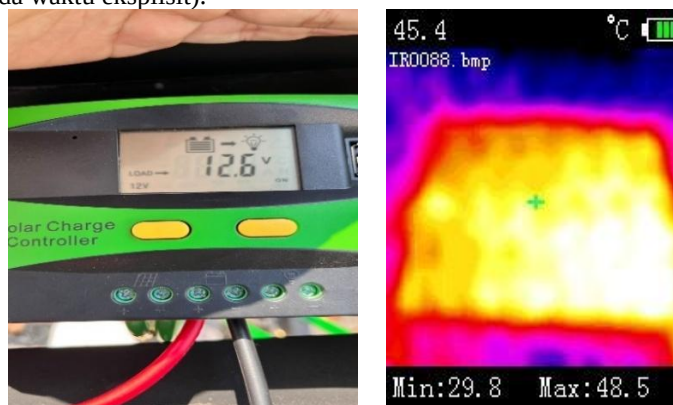
(P_{out}), dan efisiensi konversi (%). Sesuai dengan batasan kondisi operasional, temperatur permukaan panel tanpa pendingin (kondisi *baseline*) mencapai puncaknya hingga 45,4°C sampai 48,5°C (dengan rata-rata ambang batas 41,5°C hingga 45,4°C), sedangkan penerapan sistem pendingin konveksi paksa air berhasil menurunkan dan menjaga temperatur permukaan panel berada pada kisaran rentang 26,5°C hingga 40,3°C (dengan temperatur rata-rata harian sebesar 33,6°C, serta nilai terendah mencapai 26,7°C). 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.

d. Metode pengukuran

Pengukuran data dilakukan dengan metode eksperimen melalui pengujian langsung terhadap panel surya pada kondisi luar ruangan dengan memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi. Berdasarkan suhu dokumentasi 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.

2.2 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

Jumlah muatan listrik yang melewati konduktor dalam jangka waktu tertentu dikenal sebagai arus listrik. Persamaan 3 dan 4 digunakan untuk menghitung perbandingan daya listrik terhadap tegangan, yang menentukan jumlah arus listrik yang mengalir dalam suatu rangkaian.

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. egangan

Dalam suatu rangkaian, tegangan adalah perbedaan potensial listrik antara dua tempat yang mengakibatkan pergerakan muatan listrik. Persamaan 5 dan 6 digunakan untuk menghitung tegangan dengan membagi daya listrik dengan arus listrik yang mengalir.

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 PEMBAHASAN**3.1 Metode Pendinginan Konveksi Paksa (Pompa Air)**

Pendinginan panel surya menggunakan pompa air adalah metode aktif untuk menurunkan suhu permukaan modul fotovoltaik yang panas akibat terik matahari. Saat suhu panel turun di bawah batas ideal (biasanya 40°C), efisiensi konversi energi listrik dan total daya output yang dihasilkan akan meningkat secara signifikan. Hasilnya ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran

Time (h)	Flux (W)	Daya Masuk Day 1	Daya Keluar Day 1	Efisiensi Day 1	Daya Masuk Day 2	Daya Keluar Day 2	Efisiensi Day 2	Daya Masuk Day 3	Daya Keluar Day 3	Efisiensi Day 3
08.00	63	55,3 W	45,1 W	82%	55,4 W	45,1 W	81%	55,3 W	45,1 W	81%
09.00	74	57,9 W	45,5 W	78%	57,5 W	45,2 W	79%	57,7 W	45,3 W	78%
10.00	81	61,2 W	46,0 W	75%	59,2 W	45,5 W	77%	60,2 W	45,8 W	76%
11.00	91	63,4 W	46,3 W	73%	61,2 W	45,8 W	75%	62,3 W	46,1 W	74%
12.00	96	65,7 W	46,8 W	71%	63,5 W	46,1 W	73%	64,6 W	46,5 W	72%
13.00	89	64,2 W	46,7 W	73%	62,8 W	45,9 W	73%	63,5 W	46,3 W	73%
14.00	81	61,7 W	46,1 W	75%	61,1 W	45,7 W	75%	61,4 W	45,9 W	75%
15.00	78	59,5 W	45,6 W	77%	58,7 W	45,4 W	77%	59,1 W	45,5 W	77%
16.00	72	56,1 W	45,2 W	81%	56,4 W	45,2 W	80%	56,2 W	45,2 W	80%

Berdasarkan data pengujian sistem energi selama tiga hari (Day 1 hingga Day 3) dari pukul 08.00 hingga 16.00,

terlihat jelas adanya pola fluktuasi yang konsisten antara intensitas Flux, Daya Masuk, dan Efisiensi Sistem, sementara Daya Keluar tercatat di angka 45,1 W – 46,8 W. Nilai Flux dan Daya Masuk membentuk kurva parabola harian yang berpuncak pada pukul 12.00 (Flux mencapai 96 W dan Daya Masuk maksimal hingga 65,7 W) akibat radiasi matahari yang tinggi. Namun, menariknya, efisiensi sistem justru berbanding terbalik dengan besarnya daya masuk; efisiensi tertinggi tercatat pada pagi (82%) dan sore hari (81%), sedangkan efisiensi terendah terjadi pada siang hari (71%) karena peningkatan suhu operasional yang lazim menurunkan performa konversi energi. Secara keseluruhan, pengujian ini menunjukkan tingkat reproduksi data (*repeatability*) yang sangat akurat antar-hari, dengan rata-rata efisiensi sistem secara keseluruhan berada di kisaran 71% hingga 82% .

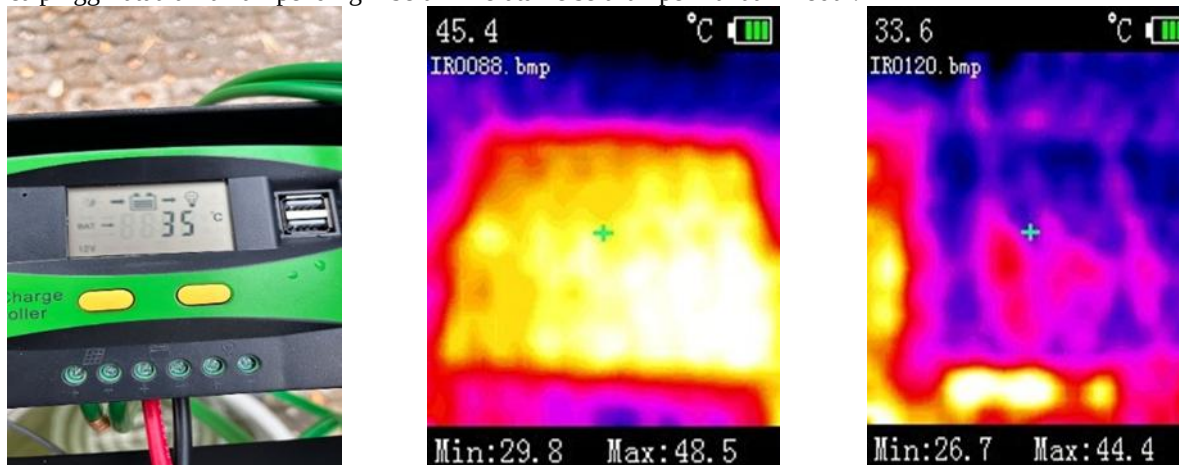


Gambar 4. Metode Pendinginan Konveksi Paksa (Pompa Air)

Pendinginan panel surya menggunakan pompa air (Gambar 4) menurunkan suhu modul secara drastis, meredam susut efisiensi akibat panas, dan mendongkrak daya listrik. Aliran air menyerap kalor dari permukaan sel surya, menciptakan perpindahan panas konvektif yang menjaga stabilitas temperatur operasional ideal. Karakteristik hidrolik pendinginan panel surya dengan pompa air mencakup laju aliran air (debit), tekanan atau head pompa, dan distribusi merata di permukaan modul. Sistem ini mengatur sirkulasi fluida agar suhu panel turun di bawah batas maksimal (biasanya 40°C), sehingga efisiensi konversi listrik meningkat tanpa memboroskan daya pompa

3.2 Perfoma Termal Panel Surya

Pola Gradien: Gradien warna bergerak dari putih atau kuning (panas) di bagian tengah menuju merah/merah muda, dan berakhir di biru atau ungu (dingin) pada bagian luar. Efektivitas Pendinginan: Area tengah panel masih menahan panas yang cukup tinggi (di atas 45 °C), yang mengindikasikan bahwa pelepasan panas oleh air pendingin lebih efektif terjadi di area pinggir atau aliran air pendingin belum merata ke seluruh permukaan modul.



Gambar 5. Gambar pada Panel Surya PV dengan Pendingin Konveksi Paksa dengan Fluida Air

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 45,4°C dan rentang 29,8–48,5°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 paksa, citra termal camera berubah dominan menjadi warna ungu-biru, dengan suhu titik ukur turun menjadi 33,6°C dan rentang 26,7–44,4°C. Penurunan suhu rata-rata 9,8°C ini membuktikan bahwa sirkulasi air oleh pompa aquarium efektif menyerap kalor dari permukaan panel melalui konveksi paksa. Hasil ini sejalan dengan data kuantitatif, di mana penurunan suhu berkontribusi pada peningkatan tegangan PV (20,2V → 22,1V)

dan efisiensi (63% → 96%), sehingga mengonfirmasi efektivitas sistem pendinginan dalam menjaga performa termal dan elektrikal panel surya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem pendinginan konveksi paksa menggunakan pompa aquarium 220V efektif meningkatkan kinerja panel surya polikristalin 100 Wp. Hasil pengujian selama tiga hari pada flux radiasi puncak 96 W menunjukkan penurunan suhu permukaan panel rata-rata sebesar 9,8°C (dari 45,4°C menjadi 33,6°C), yang berdampak pada peningkatan daya keluaran dari 63 W menjadi 96 W serta peningkatan efisiensi dari 63% menjadi 96%. Penurunan suhu ini turut memulihkan tegangan keluaran PV dari 20,2 V (rata-rata pada suhu tinggi) menjadi 22,1 V (pada suhu rendah), yang setara dengan peningkatan tegangan sebesar 9,4%. Sementara itu, arus keluaran ($I_{out} = P_{out}/V_{out}$) mengalami sedikit penurunan dari 4,37 A menjadi sekitar 4,22 A, mengindikasikan bahwa kenaikan daya keluaran lebih didominasi oleh pemulihan tegangan kerja panel akibat penurunan suhu, dibandingkan oleh kenaikan arus. Pola ini konsisten dengan karakteristik sel silikon yang memiliki koefisien suhu daya negatif ($-0,4\%$ per $^{\circ}\text{C}$), di mana penurunan suhu operasional secara langsung menaikkan tegangan sirkuit kerja dan menekan rugi-rugi termal. Pendinginan air juga memanfaatkan kapasitas kalor jenis air yang tinggi ($4.182 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$) sehingga mampu menyerap panas berlebih dari permukaan panel secara efektif melalui mekanisme konveksi dan evaporasi. Secara keseluruhan, sistem pendinginan berbasis pompa aquarium terbukti menjadi solusi sederhana, hemat energi, dan efektif untuk mengoptimalkan kinerja tegangan, arus, daya, dan efisiensi panel surya di iklim tropis, dengan rekomendasi penerapan sistem kontrol otomatis yang hanya aktif saat suhu panel melebihi ambang batas tertentu guna menjaga efisiensi energi secara keseluruhan.

REFERENSI

- [1] H. H. Pourasl, R. V. Barenji, and V. M. Khojastehnezhad, "Solar energy status in the world: A comprehensive review," *Energy Reports*, vol. 10, no. October, pp. 3474–3493, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.10.022.
- [2] 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.
- [3] B. R. Julian, Muliadi, and Syukri, "Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Dan Temperatur Terhadap Daya Keluaran Fotovoltaik Menggunakan SPSS," *Aceh J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 14–18, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal.unida-aceh.ac.id/index.php/ajeetech/article/view/531>
- [4] E. Hasan Harun, F. Ahmad, and J. Ilham, "Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Kapasitas Daya Yang Dihasilkan," *J. Renew. Energy Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 25–28, 2023, doi: 10.56190/jree.v1i2.19.
- [5] R. Nirsal and Syafriadi, "Desain Dan Implementasi Sistem," *J. Ris. Teknol. Inf.*, pp. 26–36, 2020.
- [6] E. P. LAKSANA, O. SANJAYA, S. SUJONO, S. BROTO, and N. FATH, "Sistem Pendinginan Panel Surya dengan Metode Penyemprotan Air dan Pengontrolan Suhu Air menggunakan Peltier," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 3, p. 652, 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i3.652.
- [7] J. T. Mesin, F. Sains, and U. B. Belitung, "36 Forestico , Abraham Sahat Salano , dkk . ; Pengaruh Pendinginan Panel Surya Terhadap Efisiensi Daya Keluaran 37 Aris , M . Zainul , dkk ; Pengaruh Variasi Temperatur Torefaksi terhadap Karakteristik dan Nilai Kalor Dari Produk Briket Arang Enceng Gondo," vol. 10, no. 1, pp. 36–40, 2024.
- [8] B. Sutanto, H. Iacovides, A. Nasser, A. Cioncolini, and I. Afgan, "Efficiency improvement of floating photovoltaic panels with natural convection cooling loops: Multi-physics thermal modelling," *Sol. Energy*, vol. 286, no. July 2024, p. 113170, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2024.113170.
- [9] M. E. Gazanata, J. Sumarjo, and D. T. Santoso, "Pemodelan dan Simulasi Perpindahan Panas Konveksi pada Panel Surya Menggunakan Metode CFD dengan Pendingin Kipas DC," 2026.
- [10] 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. Pengabdi. Masy. Sapangambe Manoktok Hitei*, vol. 4, no. 2, pp. 251–259, 2024, doi: 10.36985/ckajg087.
- [11] C. Siede *et al.*, "Short-term behavioural patterns of sheep under extensive solar grazing management with sun-tracking photovoltaic modules," *Livest. Sci.*, vol. 303, no. May 2025, p. 105880, 2026, doi: 10.1016/j.livsci.2025.105880.
- [12] N. Nuryanti, I. Rokhim, and R. Mubarak, "Pengaruh Pendinginan Air Terhadap Kinerja Panel Surya Monokristalin 100 Wp," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 11, no. 1, p. 18, 2025, doi: 10.24036/jtev.v11i1.135872.
- [13] N. S. Kumar *et al.*, "Self-cleaning behaviour of hydrophobic nanocoating for solar PV panels: Enhancing efficiency and thermal management in dusty environments," *Energy Reports*, vol. 15, no. June 2025, pp. 0–2, 2026, doi: 10.1016/j.egy.2025.109030.

- [14] M. Kamal and B. Pramono Jati, "Prototipe Sistem Pendingin dan Monitoring Panel Surya Menggunakan Penyiram Air Otomatis Berbasis Internet Of Things (IOT)," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 46–52, 2025.
- [15] J. M. Mesin *et al.*, "PENINGKATAN PERFORMA PANEL SURYA DENGAN SISTEM," vol. 23, no. 1, pp. 28–35.
- [16] W. Salameh *et al.*, "Rear-surface water cooling for photovoltaic panels: A thermo-hydrodynamic pathway to high-efficiency and sustainable solar power in hot climates," *Unconv. Resour.*, vol. 10, pp. 1–9, 2026, doi: 10.1016/j.unres.2026.100326.
- [17] M. S. Efendi and Y. Nofendri, "Pengaruh Pendinginan terhadap Daya Keluaran dan Efisiensi Sistem Panel Surya," vol. 3, pp. 67–73, 2024.
- [18] Abdullah, M. Putri, J. Iriani, F. N. Hulu, and Cholish, "Sistem Pendinginan Permukaan Panel Surya Dalam Optimalisasi Kerja Panel Surya Dengan," (*Rekayasa Elektr. dan Energi*) *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 61–67, 2023.
- [19] N. M. Janna and D. A. Widodo, "Analisis Karakteristik Modul Panel Surya Dengan Sistem Pendingin Air," *J. Fokus Elektroda Energi List. Telekomun. Komputer, Elektron. dan Kendali*, vol. 6, no. 1, p. 37, 2021, doi: 10.33772/jfe.v6i1.16200.
- [20] A. A. Nazaar, S. S. K, and A. Pangkung, "Penggunaan Sistem Pendingin Temperatur Menggunakan Heatsink-Fan sebagai Peningkatan Kinerja Panel Surya," vol. 22, no. 2, pp. 284–292, 2024.
- [21] I. O. Harmailil, S. M. Sultan, C. P. Tso, A. Fudholi, M. Mohammad, and A. Ibrahim, "A review on recent photovoltaic module cooling techniques: Types and assessment methods," *Results Eng.*, vol. 22, no. February, p. 102225, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102225.
- [22] R. Pido, R. H. Boli, and R. R. Day, "Enhancement of Solar Panel Efficiency by Comparative Analysis of Cooling Systems Utilizing Water Flow, Air Flow, and No Cooling," *J. Mech. Eng. Sci. Innov.*, vol. 5, no. 1, pp. 55–63, 2025, doi: 10.31284/j.jmesi.2025.v5i1.7336.
- [23] D. Pabiban, M. G. Pae, A. D. E. M. Gah, S. Dana, G. Yohana, and R. Rewu, "Peningkatan Efisiensi Panel Surya dengan Sistem Water Sprayer," pp. 15–22, 2023.
- [24] G. Muktoarip *et al.*, "Photovoltaik Menggunakan Metode Fuzzy," vol. 14, no. 1, pp. 608–617, 2026, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8639>
- [25] M. Safi'i *et al.*, "Edukasi Pemanfaatan dan Pemberdayaan Energi Surya untuk Mendukung Industri UMKM di Kelurahan Bergaslor, Semarang," *Palawa J. Pengabdi. Kpd. Masy.*, vol. 3, no. 1, pp. 6–12, 2024, doi: 10.31942/palawa.v3i1.11036.
- [26] M. Safi'i *et al.*, "Rancang Bangun Panel Surya Berbasis Limbah Rumah Tangga Untuk Kebutuhan Penerangan Jalan Rw 3 Kelurahan Bergaslor, Semarang." *J. Pengabdi. Kpd. Masy. Sapangambe Manoktok Hitei.*, vol. 4, no. 2, pp. 251–259, 2024.
- [27] MF. Febriyandono, "Workshop Transfer Knowledge Perancangan Panel Surya Berbasis Limbah Rumah Tangga untuk Kebutuhan Listrik UMKM". *J. Pengabdi. Kpd. Masy. Nusantara.*, vol. 7, no. 2, pp. 3948-3955, 2026.