

Studi Eksperimental Pengaruh Pendinginan Air Terhadap Kinerja Panel Surya Monokristalin 100 Wp Berbasis IoT

Nuryanti^{1*}, Ismail Rokhim², Rais Mubarak³

¹²³Prodi Teknologi Rekayasa Otomasi, Politeknik Manufaktur Bandung

*Corresponding author, e-mail: nuryanti@ae.polman-bandung.ac.id

Abstrak

Temperatur panel surya yang meningkat akan menurunkan kinerja proses konversi energi matahari menjadi energi listrik. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem pendingin yang dapat menjaga temperatur panel surya agar tidak terlampaui tinggi. Sistem pendingin dengan menggunakan air yang mengalir memiliki keterbatasan jika kondisi suatu daerah tidak memiliki banyak air. Dalam penelitian ini dikembangkan sistem pendinginan panel surya monokristalin 100 WP berbasis air dengan siklus tertutup. Air yang telah mendinginkan panel akan ditampung kembali dan diturunkan temperaturnya dengan menggunakan modul peltier. Pengaplikasian Internet of Things (IoT) dengan menggunakan Mikrokontroler ESP32 selain memantau suhu permukaan panel surya dan suhu air melalui internet juga untuk mengontrol pompa dan modul peltier. Data dari sensor tegangan, arus dan temperatur dikirim secara real-time melalui protokol MQTT. Hasil pengujian sistem pendinginan berbasis air dengan IoT berhasil menjaga suhu permukaan panel surya pada 30,18°C, sedangkan tanpa pendingin berada di 40,96°C. Hal ini dapat meningkatkan tegangan dari 22,49V menjadi 23,85V, meningkatkan arus dari 4,22A menjadi 4,33A, dan meningkatkan daya dari 94,97W menjadi 103,01W, dengan demikian efisiensi meningkat sebesar 17%, dari 10,04% menjadi 11,79%. Penambahan daya hingga 8 Watt dengan menggunakan pendingin air siklus tertutup berbasis IoT menjadi satu kontribusi pada penelitian pendinginan panel surya dimana sebelumnya pendinginan air hanya dengan mengalirkan air atau pengaplikasian modul peltier pada permukaan solar panel secara langsung.

Keyword: *Pendingin Panel Surya, Peltier, Efisiensi Panel Surya, Suhu, Tegangan, Arus, IoT*

Abstract

Temperature plays a crucial role in the performance of solar panels. Excessive temperature reduces the efficiency of converting solar energy into electrical energy. Therefore, a cooling system is required to maintain the optimal temperature of solar panels. Previous research used an open cooling system that circulated water and then discharged it. In areas with limited water resources, efficient use of water as a cooling medium is crucial. Therefore, this research developed a closed-cycle, water-based cooling system for 100 WP monocrystalline solar panels. The water that cools the 100 Wp monocrystalline solar panel is collected and cooled again using a Peltier module. The Internet of Things (IoT) application uses an ESP32 microcontroller to monitor solar panel surface temperature and water temperature via the internet, as well as to control pumps and Peltier modules. Data is monitored in real time via the lightweight MQTT protocol. The experimental results show that the water-based cooling system successfully maintained the solar panel surface temperature at 30.18°C, compared to 40.96°C without cooling. Consequently, the voltage increased from 22.49 V to 23.85 V, the current from 4.22 A to 4.33 A, and the power from 94.97 W to 103.01 W, resulting in an efficiency improvement of 1.75%, from 10.04% to 11.79%. The addition of power up to 8 Watts by using closed-cycle water cooling using IoT is a contribution to solar panel cooling research where previously water cooling was only done by flowing water or applying Peltier modules directly to the surface of the solar panel.

Keywords: *Solar Panel Cooling, Peltier, Solar Panel Efficiency, Temperature, Voltage, Current, IoT.*

PENDAHULUAN

Sumber energi utama yang banyak dimanfaatkan saat ini adalah energi fosil seperti minyak bumi, gas bumi, dan batu bara. Peningkatan jumlah penduduk, aktivitas ekonomi, dan industri menyebabkan konsumsi energi fosil meningkat, sehingga cadangannya semakin menipis karena proses regenerasinya membutuhkan waktu

geologis yang panjang [1],[2]. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya adalah energi surya yang mampu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik tanpa mencemari lingkungan [3].

Efisiensi panel surya berperan penting dalam menentukan daya output yang dihasilkan. Penurunan efisiensi dapat disebabkan oleh radiasi yang tidak terkonversi maksimal, peningkatan temperatur yang drastis, serta sistem pendinginan yang kurang optimal [4]–[8]. Temperatur tinggi menurunkan bandgap material semikonduktor, mengurangi tegangan rangkaian terbuka (Voc), dan meningkatkan energi kinetik elektron sehingga daya keluaran menurun [9],[10].

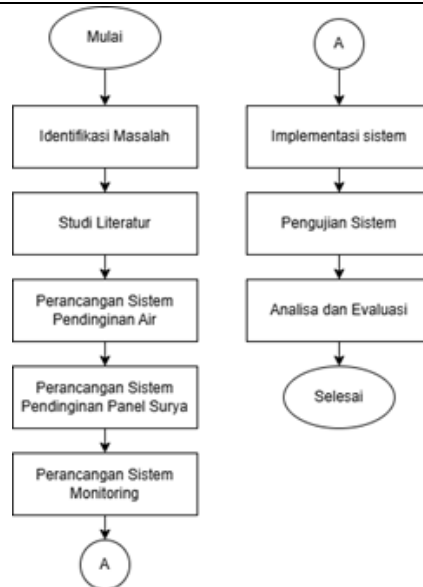
Berbagai penelitian mengusulkan sistem pendinginan aktif dan pasif untuk menjaga suhu panel pada rentang optimal 25°C–45°C [3],[4],[11],[15]. Sistem pendinginan siklus terbuka telah dikembangkan, di mana air yang mendinginkan panel dibuang, sehingga kurang efisien dalam penggunaan air [7],[12]. Apalagi jika daerah tersebut persediaan airnya terbatas. Adapun alternatif sistem pendingin air lainnya yaitu sistem pendinginan siklus tertutup dimana air yang digunakan untuk mendinginkan panel ditampung kembali untuk kemudian digunakan ulang pada siklus pendinginan berikutnya. Dengan mikrokontroler diatur nyala pompa air jika suhu panel melebihi 35°C sehingga diharapkan suhu panel tidak melebihi 20°C–35°C [13],[14],[17]. Sistem Pendingin tertutup ini dapat menghemat penggunaan air. Namun sistem yang ada masih sebatas menampung air yang disemprotkan ke panel untuk kemudian dipompakan ulang. Hal ini tentu saja kurang efektif dikarenakan suhu air yang bertambah akan menurunkan kemampuan memindahkan panasnya. Atau harus menunggu beberapa waktu agar suhu air berkurang karena mengandalkan pendinginan alami dari udara.

Oleh karena itu penelitian ini mengusulkan penerapan sistem pendinginan siklus tertutup dimana media pendingin air dijaga pula suhunya di level yang efektif untuk menurunkan temperatur panel. Untuk ini dikembangkan sistem pendingin air menggunakan modul peltier. Selain itu untuk mendukung transformasi digital dimana informasi proses suatu sistem dapat ditinjau maka dikembangkan sistem monitoring suhu, tegangan dan arus pada solar panel secara waktu nyata dengan menggunakan teknologi Internet of Things (IoT). Inovasi ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi panel surya, lebih ramah lingkungan, dan mendukung pemanfaatan energi berkelanjutan. yang memanfaatkan modul peltier, di mana air pendingin digunakan ulang

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain antara lain merancang dan membuat sistem pendinginan berbasis air siklus tertutup untuk meningkatkan efisiensi panel surya menggunakan modul Peltier. Membuat sistem *monitoring* pada sistem pendinginan dan kinerja panel surya yang dapat dipantau jarak jauh menggunakan Internet Of Things. Meningkatkan *Fill Factor* (FF) dengan sistem pendinginan berbasis air.

METODE

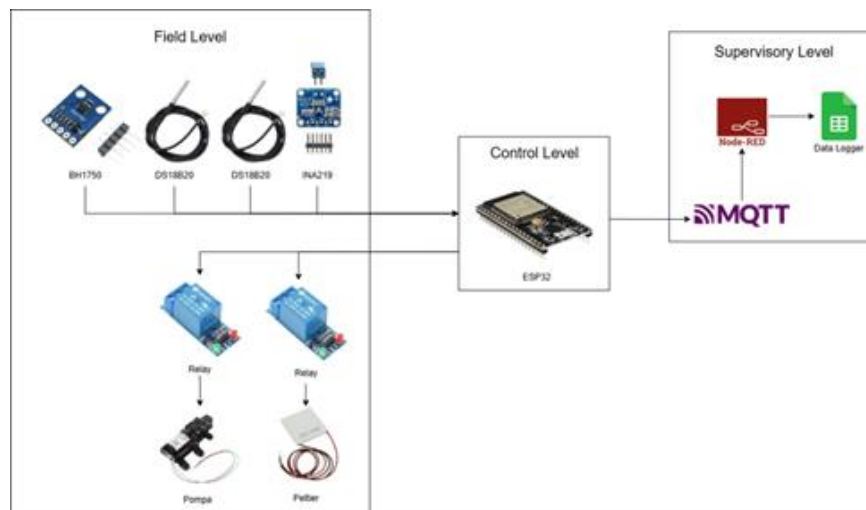
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental pada sistem pendinginan panel surya siklus tertutup. Tahapan dimulai dengan identifikasi masalah untuk mengetahui potensi kerusakan pada sistem pendinginan panel surya. Selanjutnya dilakukan studi literatur melalui jurnal, datasheet, manual, dan sumber terpercaya terkait sistem pendinginan aktif. Perancangan sistem mencakup identifikasi komponen seperti aktuator, kontroler, protokol komunikasi, dan sensor, serta perancangan pengendalian aktuator untuk menjaga suhu permukaan panel surya pada rentang optimal. Sistem pendinginan air, pendinginan panel surya, dan sistem monitoring kemudian diintegrasikan. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem monitoring untuk mengamati kinerja dan hasil pengujian, diikuti pengujian sistem guna menganalisis dan memastikan kinerja optimal. Tahap akhir adalah analisis dan evaluasi hasil pengujian.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Gambaran Umum Sistem

Sistem pendinginan berbasis air ini dirancang untuk menjaga suhu panel surya tetap optimal dengan dukungan sensor tegangan, arus, suhu, dan intensitas cahaya, serta aktuator pendingin. Data dipantau secara real-time melalui protokol MQTT yang ringan dan sesuai untuk perangkat IoT. Dengan monitoring jarak jauh, sistem dapat bekerja secara optimal tanpa intervensi manual, sekaligus mendukung pencatatan data dan analisis performa panel surya untuk meningkatkan efisiensi energi dan umur operasionalnya.



Gambar 2. Gambaran Umum Sistem

Sistem pendinginan ini menggunakan sensor DS18B20 untuk mengukur suhu air dan permukaan panel surya. Spesifikasi sensor DS18B20 antara lain memiliki akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ pada rentang -10°C - 85°C dimana data yang dikirim sudah dalam bentuk digital 9-12 bit dan memberikan resolusi 0.0625°C . Sedangkan sensor INA219 untuk membaca tegangan dan arus. Spesifikasi Sensor INA219 antara lain memiliki antarmuka I2C dengan sebuah *amplifier input* $\pm 320\text{mV}$, memiliki internal data 12 bit ADC dengan resolusi 3.2A dan 0.8 mA. Pendinginan dilakukan dengan modul peltier yang menghasilkan sisi dingin dan panas, di mana sisi dingin disalurkan ke air melalui heat sink dan sisi panas dilepaskan menggunakan kipas. Pompa 12V digunakan untuk mengalirkan air ke permukaan panel surya, sedangkan relay 5V berfungsi sebagai saklar untuk mengendalikan peltier dan pompa.

Sebagai pusat kendali, digunakan mikrokontroler ESP32 Dev1 V1 yang dilengkapi konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth. ESP32 mengirimkan data hasil pengukuran sensor melalui protokol MQTT ke Node-Red sebagai antarmuka pemantauan dan pengendalian. Data yang terkumpul kemudian dicatat menggunakan Microsoft Excel sebagai data logger untuk mendukung analisis performa sistem pendinginan panel surya.

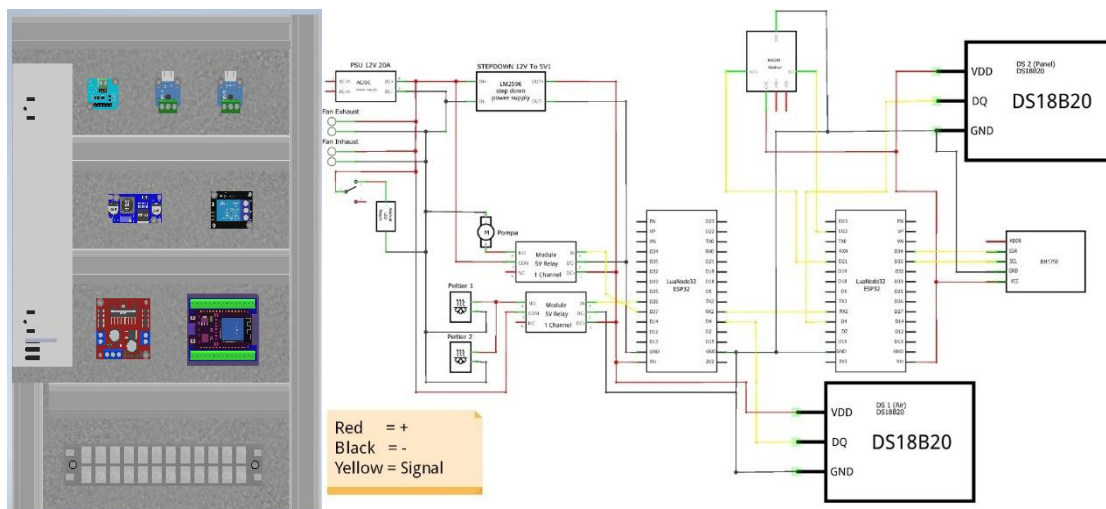
Perancangan dan Implementasi Alat

Panel surya merupakan objek utama penelitian ini yang ditempatkan di area terbuka agar dapat menerima paparan sinar matahari secara optimal. Untuk melindungi perangkat elektronik dari hujan dan kelembapan, *panel box* ditempatkan di bagian bawah panel surya. Sistem pendinginan menggunakan pompa DC untuk mengalirkan air melalui selang menuju permukaan panel. Untuk mencegah aliran balik dan menjaga efisiensi, dipasang katup satu arah (check valve) pada selang, sehingga pompa tidak memerlukan pemancangan ulang meskipun air dialirkan ke posisi lebih tinggi dari pompa.



Gambar 3. Rancangan Mekanik

Pada penelitian ini, sistem elektrik dirancang menggunakan panel box sebagai wadah komponen utama sistem pendinginan panel surya. Panel box didesain untuk bekerja aman dan efisien di lingkungan terbuka, dilengkapi dengan sistem inhaust dan exhaust berupa dua kipas untuk menjaga suhu internal tetap stabil dan melindungi komponen elektronik dari panas berlebih. Untuk menjaga keteraturan dan keamanan, digunakan wiring diagram dengan kode warna kabel: kuning sebagai jalur data antar komponen, hitam sebagai jalur negatif (GND), dan merah sebagai jalur positif (VCC). Penerapan kode warna ini memudahkan identifikasi jalur serta mencegah kesalahan pemasangan.



Gambar 4. Rancangan Elektrik

Sistem monitoring pada penelitian ini berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung melalui router, dengan protokol komunikasi MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Sistem ini memungkinkan pemantauan, mengendalikan hidup dan mati pendinginan secara nirkabel dan *real-time*. Data daya keluaran panel surya dan iradiasi matahari dibaca oleh sensor, dikirim ke ESP32, lalu diteruskan ke *dashboard* Node-RED. Perangkat yang digunakan meliputi laptop. sebagai pemantau dan pengendali, ESP32 sebagai pembaca dan pengirim data, serta router sebagai pusat jaringan lokal.



Gambar 5. Topologi Jaringan Sistem *Monitoring*

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

1. Hasil Perancangan dan Implementasi Alat

Sistem pendinginan panel surya dirancang dengan siklus tertutup, di mana air yang digunakan sebagai media pendingin dialirkan kembali ke wadah untuk digunakan berulang. Rangka mekanik dibuat untuk menopang panel surya sekaligus mendukung jalur aliran air dan penempatan komponen secara optimal.



Gambar 6. Hasil Perancangan Mekanik

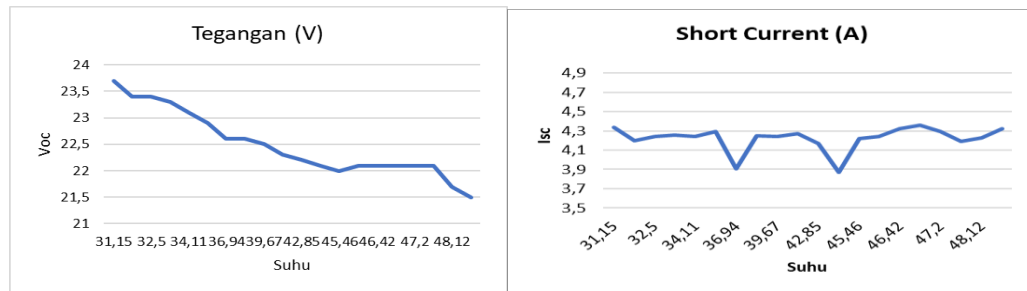
2. Pengujian Karakteristik Panel Surya dengan Kondisi Intensitas Cahaya Relatif Tetap dengan Temperatur Berbeda

Pengujian karakteristik panel surya monokristalin 100 Wp dilakukan pada variasi suhu dan intensitas pencahayaan. Data yang dikumpulkan meliputi pengukuran daya, tegangan, dan arus pada setiap kondisi. Adapun percobaan pengukuran untuk menghasilkan data yang akurat dilakukan sebanyak 20 kali. Tujuan pengujian adalah mengetahui pengaruh perubahan suhu terhadap performa panel surya dalam menghasilkan daya listrik optimal.

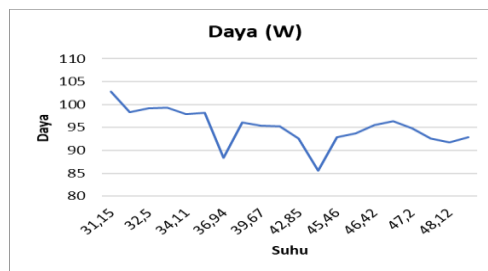
Tabel 1. Rata-rata Pada Pengujian Kondisi 2

No	Parameter	Rata-rata
1	Intensitas Cahaya (<i>lux</i>)	165926,0
2	Temperatur (°C)	41,0
3	Arus (A)	4,3
4	Tegangan (V)	22,5
5	Daya (Watt)	95,7

Dalam pengujian ini, intensitas cahaya (*lux*) yang diterima panel surya berada di kisaran 163554,23 – 169771,72 dan berada pada peningkatan suhu dari 31,15 hingga 49,38 °C.



Gambar 7. Tegangan dan Arus Pada Pengujian Kondisi 2



Gambar 8. Daya Pada Pengujian Kondisi 2

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan suhu panel surya monokristalin berdampak negatif terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran. Tegangan menurun dari 23,7 V pada suhu 31,15°C menjadi 21,5 V pada 49,38°C. Arus juga menurun dari 4,34 A pada suhu 31,15°C menjadi sekitar 4,1–4,19 A pada suhu di atas 44°C. Penurunan paling signifikan terjadi pada daya, dari 102,858 W pada suhu 31,15°C menjadi 91,791 W pada suhu 48,12°C. Temuan ini menunjukkan bahwa suhu tinggi mengurangi efisiensi panel surya, sehingga penerapan sistem pendinginan diperlukan untuk menjaga performa optimal.

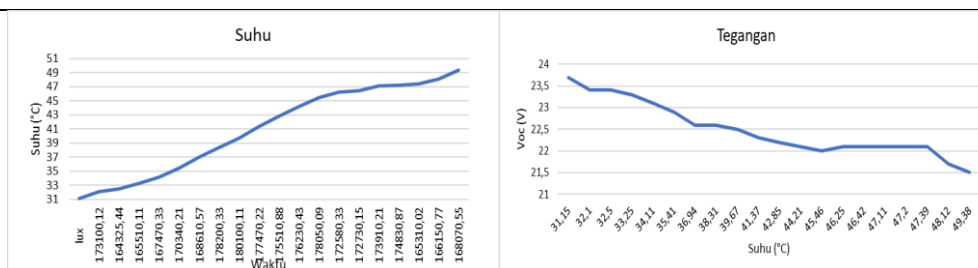
3. Pengujian Panel Surya Tanpa Pendingin

Pengujian panel surya tanpa menggunakan sistem pendinginan dilakukan pada rentang waktu pukul 11:25 hingga 11:45 WIB. Pada pengujian ini, dilakukan pencatatan parameter daya keluaran panel surya secara berkala untuk mengetahui kinerjanya dalam kondisi normal tanpa pendinginan. Data yang diperoleh digunakan sebagai acuan perbandingan terhadap kinerja panel surya ketika sistem pendinginan diaktifkan.

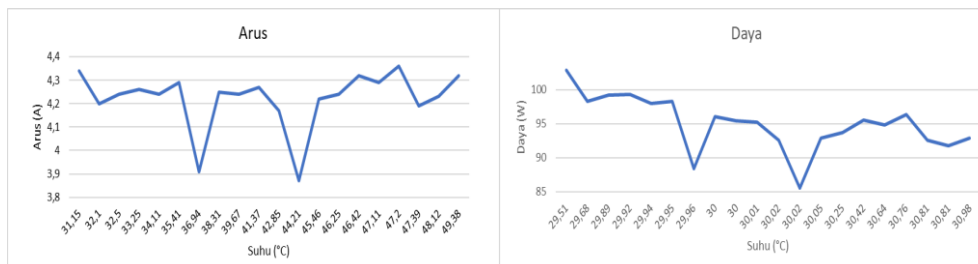
Tabel 2. Rata-rata Pada Pengujian Panel Surya Tanpa Pendingin

No	Parameter	Rata-rata
1	Intensitas Cahaya (<i>lux</i>)	172296,1
2	Temperatur (°C)	41,0
3	Arus (A)	4,2
4	Tegangan (V)	22,5
5	Daya (Watt)	95,0

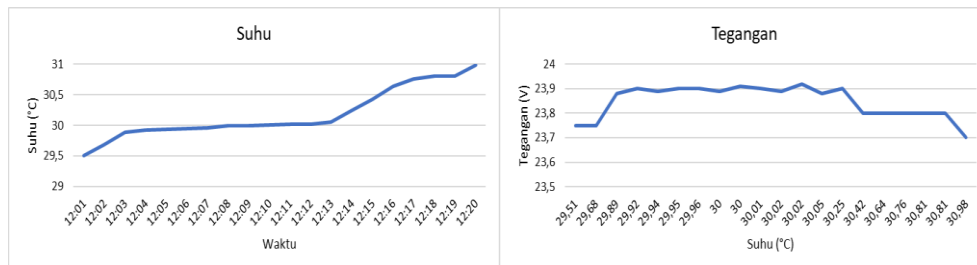
Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata intensitas cahaya yang diterima panel surya adalah 172.296,96 *lux* dengan suhu 40,96°C, tegangan 22,5 V, arus 4,2 A, dan daya keluaran 95 W.



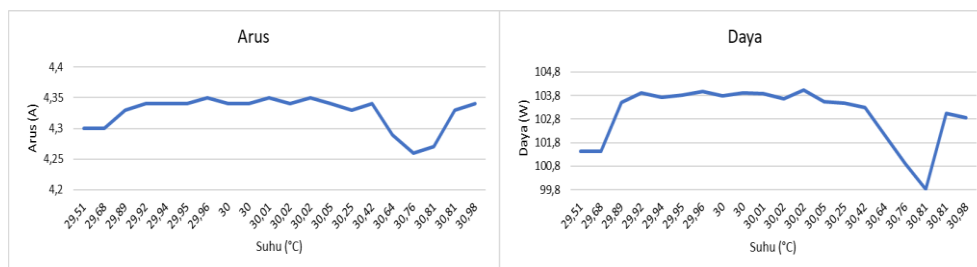
Gambar 1. Suhu dan Tegangan Pada Panel Surya Tanpa Pendingin



Berdasarkan pengujian panel surya dengan sistem pendinginan, diperoleh intensitas cahaya sebesar 172.520,82 *lux* pada suhu permukaan 30,18 °C. Pada kondisi ini, panel surya menghasilkan tegangan 23,82 V dan arus 4,32 A, sehingga daya keluarannya mencapai 103,01 W. Hasil ini menunjukkan bahwa pada suhu yang lebih rendah berkat penerapan sistem pendinginan, panel surya dapat beroperasi pada kondisi optimal dengan daya tinggi. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian suhu berperan penting dalam mempertahankan efisiensi konversi energi panel surya.



Gambar 12. Suhu dan Tegangan Pada Panel Surya dengan Pendingin



Gambar 13. Arus dan Daya Pada Panel Surya dengan Pendingin



Gambar 14. Dashboard Monitoring Pada Panel Surya dengan Pendingin

Dalam pengujian ini, iradiasi matahari tercatat sebesar 172.520,82 *lux*, dengan suhu permukaan panel berhasil dipertahankan pada sekitar 30,18 °C. Suhu yang stabil berdampak pada peningkatan arus keluaran menjadi sekitar 4,32 A serta menjaga tegangan tetap stabil di kisaran 23,82 V. Dengan kondisi tersebut, sistem pendinginan mampu mempertahankan daya keluaran panel surya sekitar 103,01 W.

5. Perbandingan Kinerja Panel Surya

Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan sistem pendinginan berbasis air. Panel surya yang digunakan adalah jenis monokristalin dengan kapasitas 100Wp.

Tabel 4. Perbandingan Dengan dan Tanpa Pendingin

No	Parameter	Tanpa Pendingin	Dengan Pendingin
1	Intensitas Cahaya (<i>lux</i>)	172296,1	172520,8
2	Temperatur (°C)	41,0	30,2
3	Arus (A)	4,2	4,3
4	Tegangan (V)	22,5	23,8
5	Daya (Watt)	95,0	103,0

Berdasarkan Tabel perbandingan, intensitas cahaya pada kedua kondisi relatif sama, yaitu sekitar 172.296,1 *lux* tanpa pendingin dan 172.520,8 *lux* dengan pendingin. Namun, penerapan sistem pendinginan berhasil menurunkan temperatur panel dari 41,0 °C menjadi 30,2 °C. Penurunan suhu ini berdampak pada peningkatan performa panel surya, ditunjukkan oleh kenaikan arus dari 4,2 A menjadi 4,3 A dan tegangan dari 22,5 V menjadi 23,8 V. Akibatnya, daya keluaran meningkat dari 95,0 W menjadi 103,0 W. Hal ini membuktikan bahwa pengendalian suhu panel berperan penting dalam mempertahankan dan meningkatkan efisiensi konversi energi panel surya.

5.1 Perhitungan *Fill Factor*

Pada perhitungan ini, nilai V_{mp} dan I_{mp} diperoleh dari hasil pengukuran eksperimental pada masing-masing kondisi, sedangkan nilai V_{oc} dan I_{sc} diambil dari spesifikasi panel surya.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

$$FF(TP) = \frac{22,49 \times 4,22}{21,8 \times 6,05} = 0,72 \approx 72 \%$$

$$FF(P) = \frac{23,82 \times 4,32}{21,8 \times 6,05} = 0,78 \approx 78 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai FF pada kondisi tanpa sistem pendinginan adalah sebesar 0,72 atau 72%, sedangkan pada kondisi dengan sistem pendinginan nilai FF meningkat menjadi 0,78 atau 78%. Kenaikan nilai FF mengindikasikan bahwa penerapan sistem pendinginan mampu meningkatkan kualitas performa panel surya.

5.2 Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Pada perhitungan ini, nilai P_{in} diperoleh dari hasil perkalian antara intensitas radiasi matahari (W/m^2) dengan luas permukaan panel (m^2). Berdasarkan data yang diperoleh, efisiensi panel surya tanpa pendingin dan dengan pendingin diperoleh sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

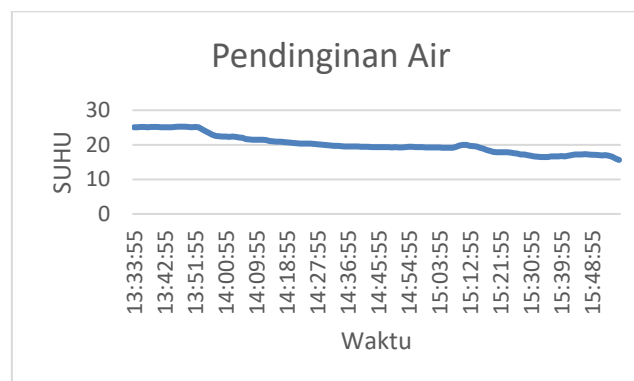
$$\eta(TP) = \frac{22,49 \times 4,22 \times 0,72}{(172296,13 \times 0,0076) \times 0,5} \times 100\% \approx 10,04\%$$

$$\eta(P) = \frac{23,82 \times 4,32 \times 0,78}{(172520,82 \times 0,0079) \times 0,5} \times 100\% \approx 11,79\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi, diketahui bahwa pada kondisi tanpa pendinginan, efisiensi panel surya ($\eta(TP)$) berada di kisaran 10,04%, sedangkan pada kondisi dengan pendinginan efisiensi ($\eta(P)$) meningkat menjadi sekitar 11,79%. Peningkatan sebesar 1,75 poin persentase atau setara dengan kenaikan relatif $\pm 17,4\%$, ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pendinginan mampu menurunkan suhu panel secara signifikan, sehingga kerugian kinerja akibat kenaikan temperatur dapat ditekan. Hal ini menguatkan bahwa pengendalian suhu memiliki peran penting dalam mempertahankan kinerja dan efisiensi konversi energi listrik pada panel surya

5.3 Analisa Kestabilan Pendinginan

Dalam melakukan analisa kestabilan sistem pendingin untuk memastikan sistem akan bekerja secara baik dalam jangka waktu panjang dilakukan pengujian suhu air yang semula berada pada nilai awal sebesar $25,15^{\circ}\text{C}$ diukur menggunakan sensor DS18B20. Kemudian, setelah melihat suhu awal berada diatas *setpoint* (15°C), modul peltier dinyalakan untuk melakukan proses pendinginan hingga suhu air berada pada *setpoint*. Dapat dilihat pada Gambar 15 dimana grafik suhu air relatif datar ketika mencapai temperatur set point, pendingin berhasil menjaga suhu objek atau area yang didinginkan pada titik yang diinginkan secara konsisten. Untuk menjaga agar gangguan eksternal dari suhu panas lingkungan tidak langsung mempengaruhi proses pendinginan, maka kotak pendingin air dilapisi styrofoam sebagai bahan isolator pada dinding kotak. Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi, diketahui bahwa pada kondisi tanpa pendinginan, efisiensi panel surya ($\eta(TP)$) berada di kisaran 10,04%, sedangkan pada kondisi dengan pendinginan efisiensi ($\eta(P)$) meningkat menjadi sekitar 11,79%. Peningkatan sebesar 1,75 poin persentase atau setara dengan kenaikan relatif $\pm 17,4\%$, ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pendinginan mampu menurunkan suhu panel secara signifikan, sehingga kerugian kinerja akibat kenaikan temperatur dapat ditekan. Hal ini menguatkan bahwa pengendalian suhu memiliki peran penting dalam mempertahankan kinerja dan efisiensi konversi energi listrik pada panel surya.



Gambar 15. Grafik Pendinginan Suhu Air

PEMBAHASAN

Mengacu pada penelitian pendinginan solar panel untuk meningkatkan daya maupun efisiensinya dengan berbasis air seperti yang dilakukan oleh Duma Pabiban dkk [13], Abraham Sahat Salano Forestico dkk [1], Husni Mubarak dkk [5] dan Maruto Swatara Loegimin dkk [4]. Dimana pada penelitian yang dilakukan oleh Duma Pabiban pada pendinginan panel surya 60 Wp dengan menyemprotkan air secara otomatis ketika temperatur melebihi 25 derajat didapatkan peningkatan efisiensi daya 10-12%. Sedangkan Abraham Sahat Salano Forestico yang mengalirkan air dingin pada panel surya 20 Wp didapat kenaikan efisiensi sebesar 0,44% dari 11,42% menjadi 11,86% atau kenaikan sebesar 3,9% [1]. Sedangkan pada penelitian Husni Mubarak dengan menggunakan air dan dikontrol menggunakan Fuzzy Logic daya meningkat hingga 8 W dari

daya awal 4 W pada solar panel berkapasitas 20 WP [5]. Disini dapat dilihat untuk penelitian yang telah dikembangkan lebih baik dari peningkatan efisiensi yang dilakukan oleh penelitian sejenis sebelumnya. Bahkan dilihat dari kapasitas solar panel yang dikembangkan lebih besar yaitu 100 WP dibandingkan dengan solar panel lainnya yang berkisar di kapasitas 20-60 Wp. Kapasitas yang besar melibatkan proses yang lebih kompleks tapi ternyata kenaikan efisiensinya masih lebih tinggi dibandingkan yang lain.

PENUTUP

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pendinginan siklus tertutup berbasis air mampu meningkatkan efisiensi panel surya monokristalin 100 Wp sebesar 17,4 %. Implementasi sistem kontrol pendingin air berhasil menjaga suhu permukaan panel tetap stabil dengan kenaikan efisiensi yang tinggi, sehingga tegangan dan arus keluaran tinggi dan stabil. Sistem monitoring berbasis IoT mampu memantau parameter seperti suhu, tegangan, arus, dan intensitas cahaya secara real-time, sehingga kondisi operasional panel dapat diketahui dengan akurat.

Saran-saran untuk penelitian lebih lanjut adalah sistem diuji untuk kapasitas yang lebih besar dan kondisi cuaca yang berbeda. Untuk meminimalisir penggunaan sensor dapat dikembangkan dengan menggunakan Artificial Intelligent sehingga lebih mudah perawatan dan energi yang digunakan lebih sedikit

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.S.S. Forestico, Y. Setiawan, J. Ariksha, and E.S. Wijianti, "Pengaruh Pendinginan Panel Surya Terhadap Efisiensi Daya Keluaran," vol. 10, no. 1, pp. 36–40, 2024.
- [2] S. Widyawati, G. Marausna, and E.E. Prasetyo, "Analisis Pengaruh Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Panel Surya," *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 8, no. 1, pp. 29–37, 2022.
- [3] M.S. Abid, W.S. Pambudi, T. Suheta, T. Wati, and M. Munir, "Analisa Efisiensi Daya Solarcell dengan Integrasi Sistem Pendingin," *BEES Bull. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 123–132, 2024.
- [4] M.S. Loegimin, B. Sumantri, M.A.B. Nugroho, H. Hasnira, and N.A. Windarko, "Sistem Pendinginan Air Untuk Panel Surya Dengan Metode Fuzzy Logic," *J. Integr.*, vol. 12, no. 1, pp. 21–30, 2020.
- [5] H. Mubarak, T. Muzakkir, W. Yuniarto, and Hasan, "Rancang Bangun Sistem Peningkatan Daya Output Pada Solar Panel Dengan Metode Pendinginan Otomatis Berbasis Mikrokontroler," vol. 4, no. 6, 2024.
- [6] A.B. Kusumaningtyas, D. Monika, and D.A. Sihite, "Sistem Monitoring Pendinginan Panel Surya Menggunakan Uap Air Berbasis IoT," vol. 6, pp. 27–36, 2023.
- [7] A. Bening and D. Monika, "Efek Penurunan Suhu Terhadap Daya Panel Surya Menggunakan Sistem Pendinginan," *Efek Penurunan Suhu Terhadap Daya Panel Surya Menggunakan Sist. Pendinginan Ajeng*, vol. 2, no. 1, pp. 469–476, 2023.
- [8] E.S. Sadikun, *Analisa Pengaruh Sistem Pendinginan Radiator Terhadap Unjuk Kerja Hasil Daya Panel Surya 100Wp*. 2021.
- [9] K.H. Khwee, "Pengaruh Temperatur Terhadap Kapasitas Daya Panel Surya (Studi Kasus: Pontianak)," *J. ELKHA*, vol. 5, no. 2, pp. 23–26, 2013.
- [10] P. Harahap, "Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Dari Berbagai Jenis Sel Surya," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 73–80, 2020.
- [11] Y.G. Putra, N.S. Erwanti, and S. Pambudi, "Implementasi Sistem Kontrol PID pada Sistem Pendingin Suhu Panel Surya," pp. 1–9, 2014.
- [12] M. Anggara and W. Saputra, "Analisis Kinerja Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline di Kabupaten Sumbawa NTB," *J. Flywheel*, vol. 14, no. 1, pp. 7–12, 2023.
- [13] D. Pabiban, M.G. Pae, A. Manu Gah, D. Sumartini, Yohana G, and R. Rewu, "Peningkatan Efisiensi Panel Surya dengan Sistem Water Sprayer," *Sneto*, pp. 15–22, 2023.
- [14] R. Katuuk, J. Makal, J.F. Doringin, A.Ramschie, J.T. Elektro, and N. Manado, "Pemodelan Sistem Untuk Kerja Kipas Pada Proses Pengaturan Temperatur Panel Surya dengan Konsep PID Guna Optimalisasi Proses Pembangunan," vol. 1, no. 2, 2022.
- [15] M. A. Rahman, S. K. Gupta, N. Akyzbekov, R. Zhapparbergenov, S. M. M. Hasnain, and R. Zairov, "Comprehensive overview of heat management methods for enhancing photovoltaic thermal systems," *iScience*, vol. 27, no. 10, p. 110950, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110950
- [16] K. Mostakim, M. R. Akbar, M. A. Islam, and M. K. Islam, "Integrated photovoltaic-thermal system utilizing front surface water cooling technique: An experimental performance response," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, p. e25300, 2024,

doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25300.

- [17] 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. May, p. 102225, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102225

Biodata Penulis

Nuryanti, lahir di Jakarta, 26 April 1976. Menyelesaikan Pendidikan Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Fisika ITB tahun 2001. Tahun 2005 memperoleh gelar Master of Science pada Engineering Physics Technische Universitaet Muenchen Germany. Sebagai Staf pengajar di jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika program studi Teknologi Rekayasa Otomasi Politeknik Manufaktur Bandung sejak tahun 2009-sekarang.

Ismail Rokhim, Lahir 16 Februari 1970 di Pasuruan. Menyelesaikan pendidikan D3 PENS tahun 1991, S1 Teknik Elektro – ITB tahun 1999, dan S2 Teknik Elektro – ITS tahun 2012. Menjadi staf pengajar di Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika Polman Bandung sejak tahun 1995 sd. Sekarang.

Rais Mubarak, Menyelesaikan Studi D-IV di Prodi Teknologi Rekayasa Otomasi, Jurusan Teknik Otomasi Industri, Politeknik Manufaktur Bandung.