

Internet of Things Based Solar Panel Cooling Effectiveness: Automatic and Manual Pump Comparison [Efektivitas Pendinginan Panel Surya Berbasis Internet of Things: Perbandingan Pompa Otomatis dan Manual]

Nur Muhammad Abdillah¹⁾, Izza Anshory^{*,2)}, Jamaaluddin Jamaaluddin³⁾, Shazana Dhiya Ayuni⁴⁾

^{1,2,3,4)} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: izzaanshory@umsida.ac.id

Abstract. *The importance of photovoltaic (PV) systems is emphasized by the increasing demand for renewable energy. However, the increase in temperature on the surface of PV panels greatly affects the performance of PV systems. The impact of IoT-based cooling systems on PV systems is the focus of this study. We applied a comparative experimental design with three configurations: baseline (no cooling), manual (pump activated every 60 minutes for 5 minutes), and automatic (pump activated when the panel temperature 40°C or higher for 5 minutes). The PV panels were equipped with copper pipe cooling, an ESP32 microcontroller, RS485 Modbus communication, and IoT monitoring using Blynk, and were tested outdoors from 08:00 to 16:00. Data collected from the PV (voltage, current, Pmax) was recorded every 5 minutes and analyzed..*

Our research results show that automatic cooling produces the highest temperature reduction compared to manual cooling. Automatic cooling increases daily PV production by 69.19%, which is equivalent to a 36.05% increase in clean energy. However, the net efficiency of manual cooling is much lower due to fixed-interval pump operation. Therefore, under clear sky conditions, the results show that an automatic cooling system with IoT enables better PV module performance by providing better thermal stabilization. However, considering that this study was only conducted for one day, further research under various weather conditions is needed to prove long-term reliability and consistency.

Keywords - IoT-based cooling system, photovoltaic performance, solar panel efficiency, automatic pump control, thermal management.

Abstrak. *Pentingnya sistem fotovoltaik (PV) ditekankan oleh meningkatnya permintaan akan energi terbarukan. Namun, peningkatan suhu pada permukaan panel PV sangat mempengaruhi kinerja sistem PV. Dampak sistem pendingin berbasis IoT pada sistem PV menjadi fokus penelitian ini. Kami menerapkan desain eksperimen komparatif dengan tiga konfigurasi: baseline (tanpa pendinginan), manual (pompa diaktifkan setiap 60 menit selama 5 menit), dan otomatis (pompa diaktifkan ketika suhu panel mencapai 40°C atau lebih tinggi selama 5 menit). Panel PV dilengkapi dengan sistem pendingin pipa tembaga, mikrokontroler ESP32, komunikasi RS485 Modbus, dan pemantauan IoT menggunakan Blynk, dan diuji di luar ruangan dari pukul 08:00 hingga 16:00. Data yang dikumpulkan dari panel PV (tegangan, arus, Pmax) dicatat setiap 5 menit dan dianalisis.*

Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa pendinginan otomatis menghasilkan penurunan suhu tertinggi dibandingkan dengan pendinginan manual. Pendinginan otomatis meningkatkan produksi PV harian sebesar 69,19%, yang setara dengan peningkatan energi bersih sebesar 36,05%. Namun, efisiensi bersih pendinginan manual jauh lebih rendah akibat operasi pompa dengan interval tetap. Oleh karena itu, dalam kondisi langit cerah, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendinginan otomatis dengan IoT dapat meningkatkan kinerja modul PV dengan menyediakan stabilisasi termal yang lebih baik. Namun, mengingat penelitian ini hanya dilakukan selama satu hari, diperlukan penelitian lebih lanjut dalam berbagai kondisi cuaca untuk membuktikan keandalan dan konsistensi jangka panjang.

Kata Kunci - Sistem pendingin berbasis IoT, kinerja fotovoltaik, efisiensi panel surya, pengendalian pompa otomatis, manajemen termal.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan listrik telah menjadi landasan utama dan penting dalam kehidupan manusia di era modern ini. Di Indonesia, konsumsi listrik per kapita mencapai 1.285 kWh pada tahun 2023[1]. Pencapaian pertumbuhan ini menuntut tindakan segera untuk memperkuat keberlanjutan energi di sumbernya. Dalam hal potensi energi terbarukan, Indonesia memiliki cadangan energi surya, hidro, dan biomassa yang melimpah, yang sangat penting untuk kemandirian energi nasional[2]. Dari sumber energi terbarukan yang telah disebutkan, salah satu pilihan

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

yang jelas bagi Indonesia adalah energi surya. Karena negara ini terletak di garis khatulistiwa, Indonesia dapat menerima rata-rata $\pm 4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari dari radiasi matahari yang masuk[3]. Dengan emisi karbon operasional yang sangat rendah, sumber energi ini juga berharga bagi negara karena melimpah, terbarukan, dan ramah lingkungan[4]. Oleh karena itu, penggunaan teknologi surya seperti sistem fotovoltaik (PV), kolektor surya termal, dan teknologi penyimpanan energi terintegrasi, terus menjadi fokus perhatian bagi mereka yang berusaha mencapai energi bersih dan berkelanjutan[5].

Dalam literatur, penggunaan teknologi energi surya telah disebutkan dalam berbagai aplikasi pada kegiatan yang berbeda. Misalnya, pengering bertenaga surya untuk produk laut olahan yang dapat mencapai dan mempertahankan suhu pengeringan $48,13^\circ\text{C}$ selama radiasi surya dapat dimanfaatkan[6]. Aplikasi lain adalah sistem surya portabel untuk menyediakan pasokan listrik darurat pasca bencana[7]. Ada juga sistem tenaga surya untuk mengisi daya sepeda listrik yang efisien dan ramah lingkungan[8]. Berbagai penggunaan energi surya dalam kehidupan sehari-hari menunjukkan betapa pentingnya energi ini dalam mendukung aktivitas manusia.

Kinerja panel surya fotovoltaik (PV) dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama suhu. Suhu tinggi telah terbukti mengurangi efisiensi dan output daya panel surya[9],[10]. Studi sebelumnya yang menganalisis kinerja PV menunjukkan bahwa suhu memiliki dampak signifikan[11][12][13]. Untuk mencegah penurunan produksi listrik pada sistem panel surya (PV), pengaturan suhu dan faktor lain yang dapat menyebabkan overheating sangat penting. Angin di sekitar panel memungkinkan pendinginan alami, tetapi sebagian besar waktu, pendinginan aktif juga diperlukan untuk menjaga suhu panel tetap stabil[14][15][16].

Menurut studi sebelumnya, modul fotovoltaik surya (PV) beroperasi dengan efisiensi tertinggi pada suhu sekitar 40°C . Ketika suhu panel melebihi tingkat optimal ini, kinerjanya mulai menurun. Penelitian juga menunjukkan bahwa sistem pendingin PV yang menggunakan air semprot memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pendingin aktif. Sebuah studi yang menstabilkan suhu panel pada sekitar 40°C berhasil meningkatkan output daya sebesar sekitar 30,19% [17][18][19]. Temuan ini menyarankan bahwa sistem pendinginan termal harus mempertahankan suhu set-point 40°C . Oleh karena itu, berbagai konfigurasi pendinginan telah dikembangkan untuk mempertahankan kondisi tersebut, termasuk sistem penyemprotan air dengan sirkulasi berbasis pompa dan mekanisme pendinginan Peltier[20],[21]. Setiap sistem memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda tergantung pada desainnya dan faktor lingkungan sekitar.

Pengembangan sistem IoT dengan panel surya (PV) telah mempermudah proses konfigurasi dan pemantauan sistem-sistem ini. Dengan konektivitas IoT, sistem dapat berkomunikasi dan mengirim serta menerima data secara real-time. Selain itu, pengendalian jarak jauh terhadap beberapa aktuator seperti katup dan pompa juga menjadi mungkin[22]. Pengendalian otomatis motor DC tanpa sikat[23], logistik cerdas[24], pemantauan dan pelacakan ternak[25], sistem desinfeksi otomatis[26], dan manajemen parkir perkotaan[27] hanyalah beberapa contoh tercatat dari aplikasi IoT dalam literatur. Untuk sistem PV surya, pengendalian dan otomatisasi yang lebih canggih dalam manajemen termal pendinginan sistem PV surya dapat dicapai dengan integrasi IoT. Dengan IoT, pompa pendingin otomatis diprogram untuk beroperasi ketika panel surya mencapai suhu pendinginan kritis, sehingga meningkatkan proses manajemen termal. IoT juga memiliki aplikasi signifikan di luar energi surya, seperti pemantauan bencana dan sistem peringatan dini. Misalnya, sensor keamanan komunitas dan aplikasi seluler diintegrasikan untuk memantau tanggul lumpur Lapindo[28][29].

Bagaimanapun, hingga saat ini belum ada analisis mendalam mengenai sistem pendingin otomatis berbasis IoT dibandingkan dengan sistem yang dikendalikan secara manual. Pengendalian manual, seperti Pompa yang Dioperasikan Secara Jadwal, lebih murah dan sederhana, tetapi mungkin tidak dapat menangani puncak dan lembah pemanasan secara optimal. Di sisi lain, sistem IoT menghemat listrik tetapi mahal untuk dipasang. Argumen ini menjadi dasar untuk menganalisis kelebihan dan kekurangan, serta realitas konteks operasional, dari sistem pendingin yang sepenuhnya otomatis dan sepenuhnya manual.

Beberapa studi sebelumnya telah meneliti pendinginan panel surya menggunakan air, dalam sistem sirkulasi otomatis, dan dengan modul berbasis Peltier. Sebagian besar penelitian tentang topik ini memiliki cakupan yang sempit, hanya fokus pada satu metode pendinginan, dan konsumsi daya tambahan serta variasi intensitas sinar matahari diabaikan, yang menyebabkan distorsi dalam penilaian kinerja. Penilaian perbandingan langsung antara sistem manual dan sistem berbasis IoT dalam kondisi luar ruangan yang sama masih jarang ditemukan.

Inilah alasan mengapa penelitian saat ini bertujuan untuk membahas sistem pendingin manual dan sistem pendingin otomatis berbasis IoT, yang dilengkapi dengan nilai irradiance dan pengeluaran energi pompa

Karena lingkup eksperimen yang dilakukan dalam satu hari, hasilnya dimaksudkan untuk melengkapi kumpulan penelitian yang sudah ada tentang topik ini tanpa berusaha untuk menggeneralisasi hasil jangka panjang yang sangat lama

II. METODE

A. Prosedur Penelitian

Fokus penelitian ini adalah untuk menentukan keberhasilan sistem pendingin panel surya berbasis IoT melalui eksperimen perbandingan. Dalam kondisi lingkungan yang sama, tiga mode operasional berikut diamati:

1. Mode dasar (tanpa pendinginan): panel surya beroperasi sebagai PV dan didinginkan hanya oleh konveksi alami.
2. Pengendalian pompa IoT manual: pompa dan katup solenoid diaktifkan selama 5 menit setiap jam.
3. Pengendalian pompa IoT otomatis: pompa dan katup solenoid diaktifkan selama 5 menit setiap kali suhu permukaan PV mencapai 40°C atau lebih, sesuai dengan penelitian sebelumnya[17].

Untuk membandingkan setiap mode secara tepat, setiap mode dilakukan dalam kondisi luar ruangan yang sama dan dalam mode operasional yang sama (08:00 - 16:00 WIB) pada hari-hari berawan cerah berturut-turut. Suhu permukaan PV, tegangan, arus, daya keluaran, keseimbangan energi bersih, dan parameter lain dihitung setiap 5 menit dan dikirim ke Google Spreadsheet menggunakan ESP32, yang terintegrasi dalam fasilitas IoT Blynk, untuk pengamatan dan evaluasi langsung.

B. Kondisi Lingkungan dan Pengukuran Intensitas Sinar Matahari

Eksperimen ini dilakukan di luar ruangan selama satu hari, dari pukul 08:00 hingga 16:00, memastikan bahwa modul fotovoltaik (PV) tetap terpapar sinar matahari alami secara terus-menerus selama seluruh periode pengujian. Faktor lingkungan yang memengaruhi metrik kinerja PV, seperti intensitas sinar matahari, suhu lingkungan, dan kondisi langit, diukur secara terus-menerus selama eksperimen untuk mengurangi bias lingkungan dalam evaluasi data selanjutnya. Intensitas sinar matahari (W/m^2) diukur setiap 30 menit menggunakan meter daya surya digital, sementara suhu permukaan panel dipantau secara real-time melalui sensor NTC yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Selama semua uji, kondisi langit (cerah, berawan sebagian, atau berawan) diamati dan dicatat untuk memastikan paparan yang seragam di antara semua mode uji. Data ini kemudian mendukung informasi tentang intensitas matahari, suhu permukaan panel, dan daya maksimum (P_{max}) untuk meminimalkan perbedaan efek pendinginan kinerja sambil mengaitkan variasi dengan perbedaan irradiansi.

Selain itu, dampak kecepatan angin dan kelembapan diabaikan dari kerangka acuan eksperimen; oleh karena itu, data yang diabaikan menjadi batasan untuk eksperimen lapangan satu hari ini.

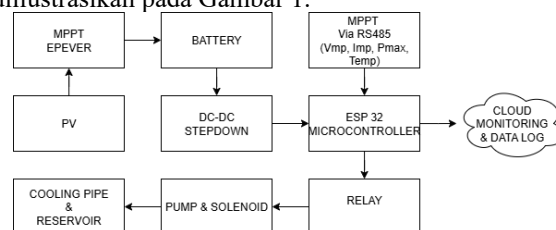
C. Alat dan Bahan Penelitian

Pengaturan eksperimen meliputi panel surya berdaya 50 Wp, pompa air DC yang dapat dikendalikan melalui IoT, mikrokontroler ESP32, termistor NTC untuk mengukur suhu permukaan panel surya, pengontrol pengisian, modul MODBUS RS485–TTL, modul relé, katup solenoid, dan pipa tembaga yang dipasang di bagian belakang panel surya yang berfungsi sebagai pendingin. Pendingin disimpan dan didistribusikan melalui tangki air dan pipa sirkulasi. Pengumpulan data dan visualisasi dilakukan melalui platform IoT Blynk dan Google Spreadsheet.

D. Desain Sistem

RS485 TTL dan sensor NTC digunakan untuk memperoleh parameter fotovoltaik dan mengambil data suhu permukaan panel masing-masing. Dalam kedua kasus tersebut, ESP32 berfungsi sebagai pengontrol pusat dan sumber untuk mengambil data. Mode operasi menentukan parameter operasi yang mengaktifkan relay pada ESP32. Dalam mode otomatis, pompa dan katup solenoid akan diaktifkan ketika suhu panel melebihi 40°C atau lebih tinggi, sedangkan dalam mode manual, pompa akan diaktifkan selama 5 menit setiap 60 menit.

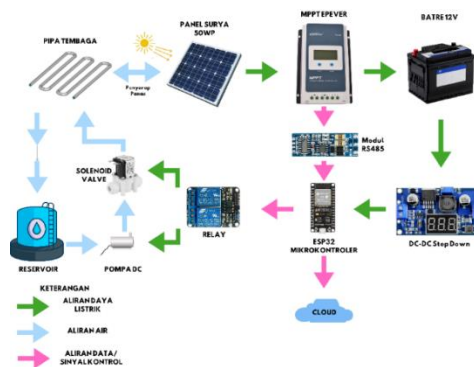
Arsitektur keseluruhan sistem diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram blok sistem pendingin PV berbasis IoT

Pada Gambar 1 diatas, ESP32 menerima data V_{mp} , I_{mp} , P_{max} , dan suhu dari MPPT melalui modul RS485, sementara NTC mencatat suhu permukaan instan. ESP32 mengontrol relay untuk mengaktifkan pompa dan katup solenoid sambil secara bersamaan mengirimkan data yang dirancang ke cloud. Pemantauan lapisan atas diproses dan dikirim ke platform untuk pencatatan data dan analisis lebih lanjut.

Rangkaian listrik terperinci ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Desain Sirkuit Listrik

Interaksi antara komponen sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2 diilustrasikan menggunakan panah hijau untuk aliran daya, panah biru untuk sirkulasi air, dan panah ungu untuk sinyal data dan kontrol. Konfigurasi ini mempertahankan kemampuan neuromorfik sistem serta kemampuannya untuk melakukan penginderaan, tindakan, dan komunikasi secara bersamaan.

Prototipe fisik mekanisme pendingin ditunjukkan pada Gambar 3.



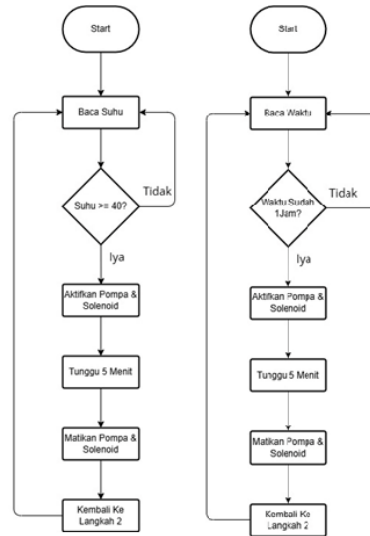
Gambar 3 Desain prototipe 3D tata letak pendingin pipa tembaga pada panel surya

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, pipa tembaga ditempatkan dalam konfigurasi aliran berlawanan untuk memaksimalkan pendinginan permukaan PV dan menangkap panas pada permukaan PV. Konfigurasi ini memberikan kinerja pendinginan yang memuaskan baik dalam mode operasi manual maupun otomatis.

E. Prosedur Penelitian

Pengembangan eksperimental dilakukan dengan menggunakan panel surya (PV) yang dilengkapi sistem pendingin menggunakan pipa tembaga, serta pemasangan ESP32 bersama sensor NTC, modul RS-485, relay, pompa, dan katup solenoid. Selama pengujian, mode-mode berikut diaktifkan: mode dasar, manual, dan otomatis. Hasilnya mencakup perekaman parameter PV dan analisis suhu panel, yang dikirim ke Google Spreadsheet setiap lima menit.

Gambar 4 menampilkan diagram alir logika pengendalian pendinginan, yang menggabungkan mode otomatis dan manual.



Gambar 4 Diagram alir sistem pendingin otomatis dan manual

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, sisi kiri adalah mode otomatis, di mana ESP32 mengaktifkan pompa dan katup solenoid berdasarkan suhu (jika suhu 40°C atau lebih tinggi), yang akan beroperasi selama 5 menit. Di sisi kanan adalah mode manual, di mana pompa dan katup solenoid akan beroperasi selama 5 menit setiap jam tanpa memandang suhu panel.

F. Rumus Matematis

Data dari pengujian dapat dianalisis menggunakan rumus-rumus berikut ini.

1. Daya PV pada setiap interval

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

2. Energi PV per interval

$$E_{pv}(t) = P_{mp}(t) \times \Delta t_h \quad (2)$$

$$\text{dengan } \Delta t_h = \frac{300}{3600} = 0,08333 \text{ jam}$$

3. Daya pompa

$$P_{pompa}(t) = V_{pompa}(t) \times I_{pompa}(t) \quad (3)$$

4. Energi pompa per interval

$$E_{pompa}(t) = P_{pompa}(t) \times \Delta t_h \quad (4)$$

5. Energi PV dan pompa harian

$$E_{pv,harian} = \sum_t E_{pv}(t) \quad (5)$$

$$E_{pompa,harian} = \sum_t E_{pompa}(t) \quad (6)$$

6. Energi harian bersih

$$E_{bersih,harian} = E_{pv,harian} - E_{pompa,harian} \quad (7)$$

7. Peningkatan relatif dibandingkan dengan baseline

$$\%Keuntungan = \frac{E_{bersih,harian}^{(mode)} - E_{bersih,harian}^{(dasar)}}{E_{bersih,harian}^{(dasar)}} \times 100\% \quad (8)$$

8. Penurunan suhu rata-rata

$$\Delta T = T_{panel}^{(dasar)} - T_{panel}^{(mode)} \quad (9)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dalam tiga mode: baseline (tanpa pendinginan), manual, dan otomatis. Data dicatat setiap lima menit dan digabungkan menjadi rata-rata 30 menit untuk memudahkan analisis. Data yang dikumpulkan meliputi suhu permukaan PV, tegangan (V_{mp}), arus (I_{mp}), daya (P_{max}), dan status pompa.

A. Tren Intensitas Radiasi Matahari Selama Percobaan

Tabel 1 di bawah ini menunjukkan hasil pengukuran intensitas radiasi matahari selama pengujian. Hasil menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari selalu meningkat secara bertahap dan menurun secara bertahap pada sore hari. Data ini digunakan sebagai acuan untuk membedakan pengaruh intensitas radiasi dan suhu panel terhadap output daya PV, sehingga perubahan P_{max} tidak disalahartikan sebagai akibat tunggal dari pendinginan.

Tabel 1 Data Intensitas Sinar Matahari & Kondisi Langit

Waktu	Intensitas Cahaya (W/M^2)	Kondisi Langit
08:00-08:30	850	Berawan Sebagian
08:30-09:00	865	Berawan Sebagian
09:00-09:30	940	Cerah
09:30-10:00	975	Sangat Cerah
10:00-10:30	890	Berawan Sebagian
10:30-11:00	905	Sebagian Besar Cerah
11:00-11:30	892	Berawan Sebagian
11:30-12:00	915	Sebagian Besar Cerah
12:00-12:30	895	Berawan Sebagian
12:30-13:00	902	Sebagian Besar Cerah
13:00-13:30	925	Sebagian Besar Cerah
13:30-14:00	720	Berawan
14:00-14:30	930	Cerah
14:30-15:00	935	Cerah
15:00-15:30	820	Berawan Sebagian
15:30-16:00	760	Berawan

Tabel 1 menunjukkan bahwa pada jam-jam pagi, intensitas radiasi matahari tinggi, kemudian meningkat secara relatif hingga mencapai puncaknya pada tengah hari. Setelah itu, intensitas radiasi menurun pada sore hari. Hal ini menunjukkan pola harian yang jelas dari radiasi matahari. Nilai maksimum intensitas radiasi yang teramati terjadi antara pukul 09:30 hingga 14:30, saat langit juga cerah kecuali pada saat-saat langit berawan sebagian. Nilai irradiansi terendah tercatat selama periode berawan tebal.

Semua variasi intensitas matahari memiliki dampak langsung pada output listrik panel PV dalam keempat skenario pendinginan. Oleh karena itu, penting untuk merujuk pada pola irradiansi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 untuk mengevaluasi hubungan antara suhu panel dan P_{max} dalam ketiga skenario. Untuk menghilangkan dampak variasi irradiansi, semua uji coba yang bergantung pada cuaca dilakukan pada hari yang serupa, dengan tingkat irradiansi standar antara pukul 09:00 dan 14:30, karena cuaca relatif konsisten selama jam-jam tersebut. Oleh karena itu, perbedaan daya dan suhu yang dibahas sepenuhnya dapat dikaitkan dengan efisiensi termal dan bukan perubahan irradiansi. Kondisi langit juga dicatat saat pengukuran untuk memastikan bahwa kondisi serupa tetap konstan dalam semua aspek.

B. Parameter PV dalam Mode Dasar

Tabel 2 menunjukkan kinerja PV tanpa pendinginan.

Tabel 2 Kinerja PV dalam mode dasar

Waktu	Temp (C)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Status Pompa
08:00-08:30	37.90	16.96	1.03	17.52	-
08:30-09:00	39.46	16.75	1.08	18.12	-
09:00-09:30	38.59	16.60	1.25	20.69	-
09:30-10:00	37.74	16.57	1.23	20.35	-
10:00-10:30	41.75	16.38	1.01	16.58	-
10:30-11:00	53.04	15.75	1.08	16.99	-
11:00-11:30	54.57	20.05	1.29	25.81	-
11:30-12:00	55.32	19.84	1.38	27.45	-
12:00-12:30	54.95	18.69	1.36	25.35	-
12:30-13:00	54.54	14.19	1.27	17.97	-
13:00-13:30	54.90	16.58	1.15	19.09	-
13:30-14:00	55.12	13.70	1.01	13.89	-
14:00-14:30	46.71	12.92	0.85	11.04	-
14:30-15:00	38.54	12.87	0.63	8.17	-
15:00-15:30	37.90	12.60	0.42	5.31	-
15:30-16:00	37.51	12.50	0.58	7.30	-

Dalam mode dasar, suhu PV meningkat selama siang hari hingga melebihi 55 °C. Peningkatan suhu ini menyebabkan penurunan output Pmax. Karena tidak ada pendinginan, hal ini mengakibatkan efisiensi terendah di antara semua mode.

C. Parameter PV dalam Mode Pendinginan Manual

Tabel 3 menunjukkan hasil kinerja PV saat pompa dijadwalkan beroperasi selama lima menit setiap jam.

Tabel 3 Kinerja PV dalam mode pendinginan manual

Waktu	Temp (C)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Status Pompa
08:00-08:30	36.87	17.05	1.41	23.99	ON
08:30-09:00	40.25	16.80	1.51	25.29	OFF
09:00-09:30	38.43	16.67	1.71	28.56	ON
09:30-10:00	38.81	16.98	1.67	28.34	OFF
10:00-10:30	39.87	16.83	1.73	29.10	ON
10:30-11:00	42.01	16.66	1.74	29.00	OFF
11:00-11:30	39.55	16.75	1.85	30.96	ON
11:30-12:00	42.42	16.77	1.72	28.77	OFF
12:00-12:30	40.54	16.94	1.62	27.42	ON
12:30-13:00	40.43	17.01	1.63	27.76	OFF
13:00-13:30	40.04	17.09	1.60	27.36	ON
13:30-14:00	41.46	17.19	1.36	23.36	OFF
14:00-14:30	40.55	17.19	1.14	19.51	ON
14:30-15:00	39.46	17.67	0.99	17.41	OFF
15:00-15:30	36.32	16.42	0.16	2.56	ON
15:30-16:00	34.73	16.19	0.11	1.86	OFF

Dalam mode manual, pompa berhasil menurunkan suhu permukaan dibandingkan dengan nilai dasar, dengan nilai rata-rata tetap di bawah 45 °C. Akibatnya, output Pmax meningkat selama siang hari. Namun, karena pompa beroperasi berdasarkan jadwal tetap, energi terkadang terbuang percuma.

D. Parameter PV dalam Mode Pendinginan Otomatis

Tabel 4 menampilkan hasil kinerja output PV saat pompa bekerja selama 5 menit ketika suhu diatas 40 °C.

Tabel 4 Kinerja PV dalam mode pendinginan otomatis

Waktu	Temp (C)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Status Pompa
08:00-08:30	38.02	16.93	1.46	24.75	OFF
08:30-09:00	35.65	16.81	1.77	29.70	ON 2X

09:00-09:30	35.64	16.63	2.03	33.77	ON 1X
09:30-10:00	35.88	16.56	2.11	34.98	ON 2X
10:00-10:30	36.34	16.49	2.10	34.63	ON 3X
10:30-11:00	36.68	16.61	1.98	32.96	ON 2X
11:00-11:30	37.51	16.71	1.86	31.13	ON 2X
11:30-12:00	38.09	16.99	1.90	32.20	ON 2X
12:00-12:30	37.72	19.92	1.90	32.16	ON 1X
12:30-13:00	37.83	16.79	1.87	31.41	ON 2X
13:00-13:30	39.26	17.09	1.73	29.53	OFF
13:30-14:00	39.14	17.21	1.54	26.53	OFF
14:00-14:30	38.23	17.21	1.56	26.88	ON 1X
14:30-15:00	38.48	16.80	1.55	31.57	OFF
15:00-15:30	37.92	17.26	1.46	25.18	OFF
15:30-16:00	34.76	15.89	0.13	2.13	OFF

Mode otomatis pada table diatas memberikan hasil pengendalian suhu yang pling efektif karena suhu panel rata-rata di pertahankan sekitar 37–39 °C. Pmax secara stabil memberikan nilai yang lebih tinggi daripada mode dasar dan manual, terutama pada waktu siang hari. Meskipun pompa menyala beberapa kali dalam interval menit, penggunaan energi lebih efisien karena pompa menyala berdasarkan kondisi panas pv secara real-time

E. Penurunan Suhu Rata-Rata

Penurunan suhu rata-rata dapat di hitung menggunakan rumus persamaan (8)

Di mana $T_{panel}^{(dasar)}$ adalah suhu permukaan PV rata-rata dalam mode dasar, dan $T_{panel}^{(mode)}$ adalah suhu rata-rata dalam operasi pendinginan manual atau otomatis. Hasilnya disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5 Penurunan suhu rata-rata dalam setiap mode

Mode	Rata-Rata Suhu(°C)	$\Delta T_{rata-rata}$ vs Dasar (°C)
Dasar	46.16	-
Manual	39.48	6.68
Otomatis	37.32	8.84

Hasil penelitian memberikan hasil bahwa pendinginan manual memberikan penurunan suhu panel sebesar 6,68 °C, sementara itu pada pendinginan otomatis penurunan suhu panel surya lebih besar lagi sebesar 8,84 °C. Hal ini menyoroiti keunggulan dari sistem pendinginan otomatis

F. Kinerja Energi PV

Menggunakan persamaan (1)–(2), output energi PV harian dihitung.

Tabel 6 Perbandingan output energi PV

Mode	Energi PV Harian (Wh)	Peningkatan Relatif vs Dasar (%)
Dasar	135.81	-
Manual	185.62	36.68
Otomatis	229.77	69.19

Pendinginan manual meningkatkan konsumsi energi harian sebesar 36,68% dibandingkan dengan nilai dasar, sementara pendinginan otomatis mencapai peningkatan tertinggi sebesar 69,19%.

G. Konsumsi Pompa dan Energi Bersih

Dengan menggunakan persamaan (3)–(7), konsumsi pompa dan energi PV bersih harian ditentukan.

Tabel 7 Konsumsi pompa dan energi surya bersih

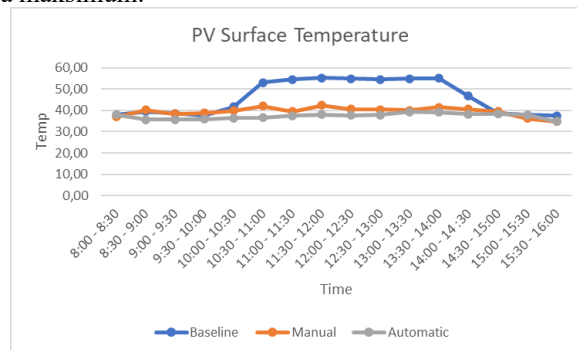
Mode	Energi Pompa (Wh)	Energi PV Bersih (Wh)	Peningkatan Relatif vs Dasar (%)
Dasar	-	135.81	-
Manual	17.50	168.12	23.79
Otomatis	45	184.78	36.05

Operasi otomatis menggunakan lebih banyak energi dari pompa dibandingkan pengaturan manual, tetapi tetap memberikan manfaat energi bersih terbesar berkat pengendalian suhu yang jauh lebih efektif. Output bersih terendah terjadi pada mode dasar. Akibatnya, peningkatan output bersih terkecil terjadi pada pendinginan manual, seperti yang diharapkan.

Untuk artikel ini, efisiensi energi didefinisikan sebagai energi yang dikumpulkan dikurangi energi yang digunakan untuk memompa air. Mode otomatis masih menggunakan lebih banyak energi pompa, tetapi dianggap lebih efisien dalam hal output energi bersih.

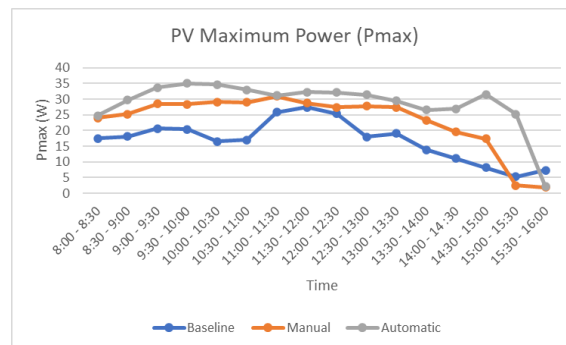
H. Analisis Grafis

Untuk memvisualisasikan efek dari strategi pendinginan, hasilnya digambarkan dalam grafik terpisah untuk suhu permukaan PV dan output daya maksimum.



Gambar 5 Suhu Permukaan PV

Seperti gambar yang ditunjukkan pada Gambar 5 diatas, mode dasar menampilkan peningkatan suhu yang melebihi 55 °C pada waktu tengah hari. Pendinginan manual menurunkan grafik suhu beberapa derajat dari mode dasar, sementara pendinginan otomatis secara stabil mempertahankan suhu terendah. Hal ini membuktikan bahwa mode pendinginan otomatis dapat memberikan pengendalian suhu yang lebih efektif dibandingkan pendinginan manual selama periode pengujian



Gambar 6 Daya Maksimum Panel Surya (Pmax)

Gambar 6 menggambarkan perubahan Pmax sepanjang hari. Panel dalam mode dasar menunjukkan penurunan output selama jam-jam dengan suhu tinggi. Pendinginan manual memberikan perbaikan tertentu selama periode yang sama. Pendinginan otomatis selalu menunjukkan output panel tertinggi, terutama sekitar tengah hari. Hal ini menunjukkan kemampuannya yang superior dalam menstabilkan efisiensi panel di bawah kondisi irradiansi dan suhu yang bervariasi.

Polanya Pmax umumnya mengikuti pola irradiansi. Implementasi pendinginan otomatis tetap menghasilkan output yang lebih tinggi dalam interval serupa di bawah kondisi irradiansi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu lebih penting dalam penelitian kami daripada stabilisasi irradiansi.

Dalam implementasi nyata, beberapa fitur teknis perlu disebutkan. Siklus air yang terus-menerus dapat menyebabkan penumpukan mineral di permukaan panel jika menggunakan air yang tidak murni. Dalam jangka panjang, hal ini dapat sedikit mengurangi transmisi cahaya. Pipa tembaga yang digunakan harus dipantau terkait kekurangan oksigen dalam air. Debu dan berat sistem pendinginan juga dapat menambah beban pada struktur PV; namun, aspek-aspek ini tidak diteliti karena lebih baik dievaluasi dalam jangka panjang dan harus diteliti di masa depan sebagai bagian dari fase berikutnya proyek kami.

IV. KESIMPULAN

Dalam kondisi cuaca cerah, penelitian ini menyoroti efektivitas teknik pendinginan berbasis IoT terhadap kinerja panel surya (PV) dibandingkan dengan mode dasar dan manual. Mode pompa otomatis mampu menurunkan suhu rata-rata panel sebesar 8,84 °C, yang pada gilirannya meningkatkan hasil energi harian PV sebesar 69,19% serta keuntungan energi bersih sebesar 36,05% dibandingkan dengan mode dasar. Sistem pendinginan manual juga menghasilkan peningkatan hasil energi harian PV, meskipun efisiensi bersihnya lebih rendah akibat interval tetap sistem.

IoT dengan sistem fotovoltaik (PV) didukung oleh algoritma efisien yang meningkatkan keuntungan energi bersih sistem pada parameter terkontrol melalui sistem IoT termal responsif dan catatan hasil energi harian. Meskipun pengamatan saat ini terbatas pada eksperimen satu hari, dataset data surya multi-hari dan parameter cuaca buruk akan mempersiapkan sistem untuk adaptabilitas lingkungan, keandalan jangka panjang, dan konsistensi kinerja.

REFERENSI

- [1] A. C. Adi, "Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 kWh/Kapita, 2024." Accessed: May 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/konsumsi-listrik-masyarakat-meningkat-tahun-2023-capai-1285-kwh-kapita>
- [2] "SEBAIKNYA KONSUMEN TAHU TENTANG PLTS & Biodiesel," Modul Pembelajaran. [Online]. Available: <https://energiterbarukan.org/assets/2020/10/BUKU-PLTS-DAN-BIODISEL.pdf>
- [3] F. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 43, 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.997.
- [4] V. Dwisari, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 2, pp. 376–384, 2023, doi: 10.37478/optika.v7i2.3322.
- [5] I. Anshory *et al.*, "Monitoring solar heat intensity of dual axis solar tracker control system: New approach," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 53, no. October 2023, p. 103791, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2023.103791.
- [6] J. Jamaaluddin *et al.*, "Heat Transfer Management of Solar Power Plant for Dryer," *Int. J. Eng. Appl.*, vol. 12, no. 3, p. 195, May 2024, doi: 10.15866/irea.v12i3.23959.
- [7] J. Jamaaluddin, I. Anshory, S. B. Sartika, Khoiri, and Mardiyono, "Utilizing Solar Power for Communication and Illumination in Disaster Zones," *Acad. Open*, vol. 8, no. 2, Aug. 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.7236.
- [8] M. R. Pratama, J. Jamaaluddin, and I. Sulistiyowati, "Electric Bicycle Battery Charging System Design Using Solar Panel," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 71–81, 2024, doi: 10.21070/jeeeu.v8i2.1698.
- [9] N. Atikah, B. Pramono Jati, and D. Nugroho, "Analisis Pengaruh Suhu Terhadap Daya Output pada Panel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline 50 Wp," *Cyclotron*, vol. 7, no. 02, pp. 18–25, 2024, doi: 10.30651/cl.v7i02.21822.
- [10] A. F. Aditya and A. Ulinuha, "Analysis of Photovoltaic Panel Performance Integrated with the Grid in a Load-Sharing Scheme," *ELKHA*, vol. 17, no. 1, pp. 53–60, Apr. 2025, doi: 10.26418/elkha.v17i1.91191.
- [11] J. T. Mesin, F. Sains, and U. B. Belitung, "PENGARUH PENDINGINAN PANEL SURYA TERHADAP EFISIENSI DAYA KELUARAN," vol. 10, no. 1, pp. 36–40, 2024.
- [12] V. F. Abast, H. J. R. Sumarawu, J. C. Kewas, F. Teknik, P. Studi, and T. Mesin, "ANALISA SUHU PERMUKAAN TERHADAP DAYA OUTPUT SOLAR CELL 10 WP TIPE MONOCRYSTALLINE Viktor," vol. 3, no. 2, pp. 1–8, 2023.
- [13] R. Y. Prasetya, S. A. Adilla, M. F. K. Farid, E. A. Hakim, and D. Suhardi, "Performance Analysis of the 1 MW Rooftop Solar Power Generation System at the Karawang," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 60–70, 2024, doi: 10.21070/jeeeu.v8i2.1685.
- [14] A. Husai Siregar and P. Harahap, "Analisis Pengaruh Suhu dan Angin Terhadap Daya dan Efisiensi Panel Surya 100 Wp," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 13, no. 02, pp. 97–102, Aug. 2024, doi: 10.35793/jtek.v13i02.55319.
- [15] J. Harie Satiyadi, R. Muhammad Hudan, and A. Asrori, "Analisis Pengaruh Suhu Panel Surya Terhadap Output Panel Performance," *J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 42–51, 2024, doi: 10.47134/jme.v1i1.2189.
- [16] Suwanti, Wahyono, and B. Prasetyo, "Analisis Pengaruh Intensitas Matahari, Suhu Permukaan & Sudut Pengarah Terhadap Kinerja Panel Surya," *Eksergi*, vol. 14, no. 3, p. 78, 2019, doi: 10.32497/eksergi.v14i3.1373.
- [17] 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.
- [18] Z. R. Tahir *et al.*, "Effect of Temperature and Wind Speed on Efficiency of Five Photovoltaic Module Technologies for Different Climatic Zones," *Sustain.*, vol. 14, no. 23, 2022, doi: 10.3390/su142315810.
- [19] F. Shaik, S. S. Lingala, and P. Veeraboina, "Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study," *Sustain. Energy Res.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40807-023-00076-x.
- [20] R. Pido, "ANALISA PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR PERMUKAAN SOLAR CELL TERHADAP DAYA OUTPUT," *Gorontalo J. Infrastruct. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 2, p. 24, Oct. 2019, doi:

- 10.32662/gojise.v2i2.683.
- [21] 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.
 - [22] Y. M. Al-Sharo, K. Al Smadi, T. Al Smadi, and Y. K. N., "Optimization of Stable Energy PV Systems Using the Internet of Things (IoT)," vol. 31, no. 1, pp. 127–137, 2024, doi: <http://doi.org/10.25130/tjes.31.1.11>.
 - [23] I. Anshory, A. Wisaksono, J. Jamaaluddin, and A. Fudholi, "Implementation of ARM STM32F4 microcontroller for speed control of BLDC motor based on bat algorithm," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 127–135, 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i1.pp127-135.
 - [24] I. Sulistiyowati, A. I. Muzaqi, M. S. Maulana, M. T. Alimova, and Supardi, "Revolutionizing package delivery with IoT-based smart boxes: Solving the Dilemma of missed deliveries," 2024, p. 020006. doi: 10.1063/5.0220240.
 - [25] S. Syahririni, A. Rifai, D. H. R. Saputra, and A. Ahfas, "Design Smart Chicken Cage Based On Internet Of Things," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 519, p. 012014, Jul. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/519/1/012014.
 - [26] A. Ahfas, M. B. Ulum, D. H. R. Saputra, and S. Syahririni, "Automatic Spray Desinfectant Chicken with Android Based on Arduino Uno," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 519, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/519/1/012013.
 - [27] A. Wisaksono and C. Aswar Ragil, "Design and Development of Parking Motor Parking Information System at Muhammadiyah University , Sidoarjo Design and Development of Parking Motor Parking Information System at Muhammadiyah University , Sidoarjo", doi: 10.1088/1757-899X/874/1/012015.
 - [28] S. D. Ayuni, S. Syahririni, and J. Jamaaluddin, "Lapindo Embankment Security Monitoring System Based on IoT," *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat. Educ.*, vol. 6, no. 1, pp. 40–48, 2021, doi: 10.21831/elinvo.v6i1.40429.
 - [29] S. D. Ayuni, S. Syahririnni, and J. Jamaaluddin, "Sosialisasi Aplikasi Monitoring Keamanan Tanggul Lapindo via Smartphone di Desa Gempolsari," *J. Pengabd. Masy. Progresif Humanis Brainstorming*, vol. 5, no. 1, pp. 154–161, 2022, doi: 10.30591/japhb.v5i1.2717.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.