

PROTOTYPE ALAT MONITORING DAN PENDINGINAN PADA PANEL SURYA DENGAN INTERNET OF THINGS

Fakhri Azhari, Muhammad Daud^{*}, Habib Muharry Yusdartono,
Muchlis Abd Muthalib dan Badriana

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia

^{*}Penulis korespondensi, E-mail: mdaud@unimal.ac.id

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar karena letaknya di garis khatulistiwa dengan intensitas matahari tinggi sepanjang tahun. Namun, suhu berlebih pada panel surya akibat radiasi matahari dapat menurunkan efisiensi dan mempercepat degradasi sistem photovoltaic. Penelitian ini mengembangkan prototipe sistem pendingin panel surya berbasis internet of things (IoT) untuk menjaga suhu panel tetap optimal. Prototipe dirancang dengan sensor suhu, mikrokontroler, modul peltier, dan kipas, yang terintegrasi dalam sistem pemantauan suhu otomatis dan dapat dikendalikan secara jarak jauh. Pengujian dilakukan selama tujuh hari berturut-turut dengan pengambilan data suhu dan daya keluaran panel, baik saat sistem pendingin aktif maupun tidak aktif. Hasil penelitian menunjukkan penurunan suhu panel hingga 39,5°C dan peningkatan daya hingga 3,35 watt pada kondisi sangat cerah. Sistem ini terbukti efektif dalam menjaga kestabilan suhu dan meningkatkan daya output panel surya secara signifikan. Kesimpulannya, penerapan sistem pendinginan berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur pakai panel surya, serta menjadi solusi aplikatif bagi pemanfaatan energi terbarukan secara optimal di wilayah tropis.

Kata kunci: Energi terbarukan, panel surya, sistem pendingin, internet of things (IoT), efisiensi energi, suhu panel.

Abstract

Indonesia holds significant potential for solar energy due to its equatorial position and consistently high solar intensity throughout the year. However, excessive heat on solar panels caused by solar radiation can reduce photovoltaic efficiency and accelerate system degradation. This study developed a solar panel cooling prototype based on the Internet of Things (IoT) to maintain optimal panel temperature. The prototype integrates temperature sensors, a microcontroller, Peltier modules, and cooling fans into an automated temperature monitoring and remote control system. Testing was conducted over seven consecutive days, recording temperature and power output data under both active and inactive cooling conditions. The results show a panel temperature reduction of up to 39.5°C and a power output increase of up to 3.35 watts under very sunny conditions. The system effectively stabilized panel temperature and significantly improved solar panel output. In conclusion, the implementation of an IoT-based cooling system can enhance energy conversion efficiency, extend solar panel lifespan, and serve as an applicable solution for optimizing renewable energy utilization, especially in tropical regions.

Keywords: Renewable energy, solar panel, cooling system, internet of things (IoT), energy efficiency, panel temperature.

1. Pendahuluan

Energi terbarukan adalah sumber daya energi yang tidak akan habis secara alami. Jenis energi ini berasal dari elemen-elemen alam yang melimpah di bumi, seperti matahari, angin, air, dan tumbuhan. Teknologi seperti tenaga surya, tenaga angin, biomassa, dan tenaga air sangat cocok digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi di wilayah terpencil dan pedesaan [1]. Sumber energi ini memiliki sifat yang tidak terbatas, karena dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan dan pulih dalam waktu yang relatif singkat. Indonesia adalah salah satu negara dengan iklim tropis dan tingginya intensitas sinar

matahari di Indonesia membuat penerapan energi baru terbarukan dapat di diterapkan [2].

Matahari memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Radiasi Matahari yang mencapai permukaan Bumi disebut insolation (incoming solar radiation), yang kemudian mengalami proses absorpsi, pemantulan, hamburan, dan radiasi. Sekitar 50% dari radiasi tersebut dapat diserap oleh bumi. Meskipun posisi Matahari dalam tata surya tetap, dari permukaan Bumi Matahari tampak bergerak melintasi langit akibat rotasi bumi. Gerakan ini menyebabkan sudut jatuh sinar Matahari pada koordinat pengamat terus berubah secara

dinamis. Posisi Matahari dapat diperkirakan berdasarkan informasi mengenai garis lintang (latitude), garis bujur (longitude), waktu, dan tanggal pengamatan [3]. Selain itu, posisi geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa mendukung penggunaan teknologi photovoltaic (PV) sebagai langkah strategis jika dikelola secara efisien

Perubahan kondisi lingkungan yang dinamis serta gangguan dari faktor eksternal menyebabkan keluaran daya photovoltaic menjadi tidak stabil. Untuk menghindari kerusakan dan penurunan performa photovoltaic, diperlukan alat yang mampu memantau kinerja dan mendinginkan ketika terjadi penurunan performa. Dengan demikian, langkah antisipasi dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan dan menjaga kualitas photovoltaic tetap optimal [4].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi panel surya melalui pendekatan sistem pendinginan. Cholish et al. (2024) merancang simulator uji panel surya berbasis elemen Peltier untuk mengendalikan variasi suhu dan intensitas cahaya secara terukur, meskipun belum diintegrasikan dengan sistem IoT [5]. Sementara itu, Wahyu (2023) mengembangkan sistem hybrid panel surya dan termoelektrik dengan metode monitoring berbasis Visual Basic, menunjukkan bahwa susunan campuran termoelektrik menghasilkan efisiensi tertinggi namun tanpa fitur kontrol otomatis berbasis sensor suhu [6]. Mubarok et al. (2024) memperkenalkan sistem pendinginan otomatis berbasis mikrokontroler yang terintegrasi dengan platform IoT Thingspeak, namun fungsi kendalinya lebih terfokus pada pembacaan dan pemantauan data, bukan kontrol aktif berbasis ambang suhu [7]. Studi oleh Bayu et al. (2023) juga menyoroti pentingnya pengaruh suhu dan kecepatan angin terhadap performa panel surya, namun lebih menekankan aspek pengamatan efek eksternal dan belum menerapkan sistem pendingin adaptif berbasis IoT [8].

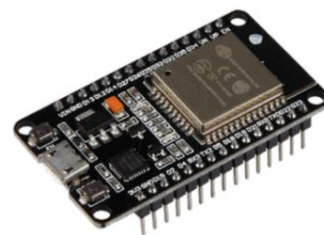
Berdasarkan tinjauan tersebut, masih terdapat celah penelitian untuk mengembangkan sistem pendinginan panel surya yang secara otomatis aktif berdasarkan pembacaan suhu real-time serta menyediakan monitoring dan kontrol berbasis Internet of Things (IoT). Penelitian ini merancang sebuah prototipe alat pendingin panel surya berbasis IoT, dengan sistem kendali otomatis yang mengaktifkan pendingin ketika suhu permukaan melebihi batas optimal, serta menyediakan pemantauan data jarak jauh secara real-time melalui platform blynk. Teknologi IoT memungkinkan integrasi sensor, mikrokontroler, serta konektivitas internet untuk memberikan pembaruan data secara berkala dan akses kendali jarak jauh. Dengan memanfaatkan potensi energi terbarukan secara cerdas dan adaptif melalui pendekatan IoT, sistem ini dapat menjadi solusi aplikatif untuk mendukung transisi energi berkelanjutan, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia.

1.1. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan sistem berbasis internet yang memungkinkan benda fisik dan digital saling terhubung dan berinteraksi melalui sensor, dengan dukungan koneksi jaringan internet [9][10]. merupakan serangkaian sensor yang saling terhubung melalui jaringan internet, berfungsi seperti sistem internet itu sendiri dengan menyediakan koneksi terbuka secara terus-menerus dan memungkinkan pertukaran data secara langsung (real-time) [11]. Dengan dukungan sebuah program, Internet of Things (IoT) memungkinkan perangkat saling terhubung secara otomatis tanpa memerlukan interaksi langsung dari manusia. Setiap program yang dikembangkan menciptakan hubungan komunikasi antar mesin (machine-to-machine) [12].

1.2. ESP32

Mikrokontroler adalah suatu sistem komputer yang komponennya terintegrasi dalam satu chip atau sirkuit terpadu (IC), sehingga sering disebut sebagai komputer mikro satu chip [13]. ESP32 adalah mikrokontroler multifungsi yang hemat daya, dilengkapi dengan Wi-Fi dan bluetooth low energy (BLE) terintegrasi pada board nya [14] dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk memprogram ESP32 dapat digunakan software Integrated development environment (IDE), yaitu aplikasi yang mencakup editor, compiler, dan uploader sketch. Aplikasi ini digunakan untuk menulis dan mengunggah program ke dalam ESP32 dengan bahasa C sebagai bahasa pemrogramannya [15].



Gambar 1. ESP32 Wroom32

1.3. Sensor Daya INA226

Sensor INA226 merupakan perangkat yang dirancang untuk mengukur arus dan tegangan DC dalam sebuah rangkaian listrik dapat dilihat pada Gambar 2. Modul ini menggunakan antarmuka komunikasi I2C untuk berinteraksi dengan mikrokontroler, dan mampu memantau tegangan pada shunt serta tegangan pada bus rangkaian. Rentang tegangan bus yang dapat dideteksi oleh sensor ini adalah antara 0 hingga 36 volt. Proses kerja sensor ini dimulai dengan mendeteksi tegangan shunt dan tegangan bus secara bergantian, kemudian sinyal analog yang diterima dikonversi menjadi sinyal digital oleh konverter ADC internal. Data digital tersebut

kemudian dikirimkan ke register tegangan dan arus. Nilai daya pada sensor ini dihitung dengan mengalikan hasil pembacaan tegangan dan arus dari masing-masing register tersebut [16].



Gambar 2. Sensor INA226

1.4. Sensor Suhu DS18B20

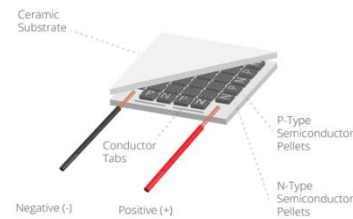
Sensor suhu DS18B20 adalah sensor suhu digital buatan Maxim Integrated (sebelumnya dikenal sebagai Dallas Semiconductor sebelum diakuisisi oleh Maxim Integrated Products) dapat dilihat pada Gambar 3. Sensor ini memiliki kemampuan membaca suhu dengan tingkat ketelitian antara 9 hingga 12 bit dan rentang suhu yang dapat diukur berkisar antara -55°C hingga 125°C dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Sensor DS18B20 berbentuk kabel dengan panjang sekitar satu meter, terdiri atas tiga kabel kecil berwarna merah, kuning, dan hitam. Kabel merah digunakan untuk tegangan positif, kabel kuning untuk keluaran nilai suhu yang akan dibaca oleh ESP32, dan kabel hitam untuk tegangan negatif [17].



Gambar 3. Sensor DS18B20

1.5. Peltier

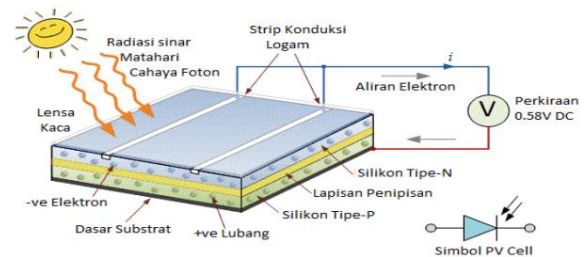
Peltier adalah material yang dapat langsung mengubah energi panas menjadi energi listrik (generator termoelektrik) atau berfungsi sebagai penyerap panas (pendingin termoelektrik) dapat dilihat pada Gambar 4. Proses ini berlangsung tanpa menghasilkan emisi gas beracun seperti karbon dioksida atau polutan lain, termasuk logam berat. Peltier bekerja dengan mengalirkan listrik melalui dua logam yang disambungkan dalam satu rangkaian. Ketika arus listrik mengalir, panas diserap pada salah satu sambungan logam dan dilepaskan pada sambungan lainnya. Proses pelepasan dan penyerapan panas ini bergantung pada arah arus listrik yang mengalir ini kemudian dikenal sebagai efek peltier [18].



Gambar 4. Peltier

1.6. Panel Surya

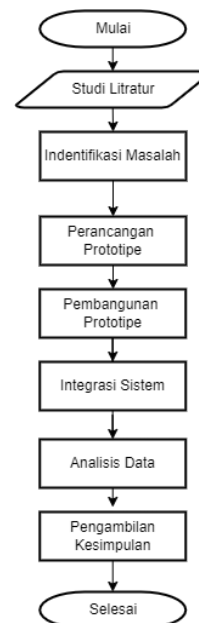
Panel surya terdiri atas tiga lapisan yaitu lapisan panel P di bagian atas, lapisan pembatas di tengah, dan lapisan panel N di bagian bawah. Pada efek fotoelektrik, sinar matahari menyebabkan elektron pada lapisan panel P terlepas, yang mengakibatkan proton mengalir dari lapisan P ke lapisan N dapat dilihat pada Gambar 5. Aliran proton ini menghasilkan arus listrik [19].



Gambar 5. Panel Surya

2. Metode

2.1. Diagram Alir Penelitian

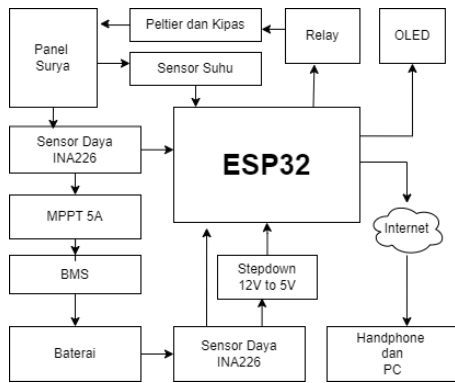


Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang dirancang secara sistematis agar proses penelitian berjalan lebih terstruktur, terarah, dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Alur tahapan penelitian ini dapat dilihat secara visual pada Gambar 6.

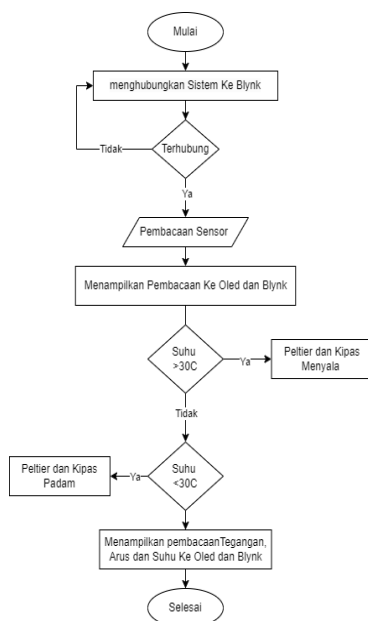
2.2. Diagram Blok Sistem

Blok diagram sistem pada penelitian ini disusun untuk menggambarkan hubungan antar komponen utama secara terstruktur dalam prototipe monitoring dan pendinginan panel surya berbasis IoT. Diagram ini menunjukkan alur kerja sistem mulai dari sumber energi, proses akuisisi data sensor suhu dan daya, pengolahan oleh mikrokontroler, hingga pengendalian pendingin dan pengiriman data ke platform blynk. Visualisasi pada Gambar 7 memudahkan pemahaman terhadap fungsi dan integrasi tiap komponen dalam sistem.



Gambar 7. Diagram Blok Sistem

2.3. Diagram Alir Sistem



Gambar 8. Diagram Alir Sistem

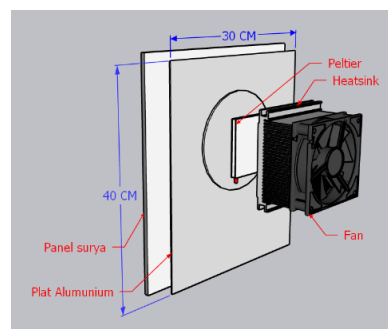
Diagram alir sistem pada penelitian ini disusun untuk menggambarkan alur proses kerja secara sistematis dan terstruktur dari sistem yang dikembangkan. Diagram ini menjelaskan tahapan-tahapan utama mulai dari input yang diterima oleh sistem, proses pengolahan data, hingga keluaran yang dihasilkan. Setiap komponen dan relasi antar proses digambarkan pada Gambar 8. visual untuk memudahkan pemahaman terhadap logika kerja sistem.

2.4. Perancangan Prototipe

Pada penelitian ini, perancangan alat prototipe sistem pendingin panel surya dilakukan menggunakan pendekatan berbasis internet of things (IoT). Desain prototipe digunakan software sketchup, mencakup desain rangka, kotak kendali, sistem pendinginan yang dirancang sesuai kebutuhan sistem. Proses perancangan mencakup penempatan komponen, dimensi, serta perakitan prototipe fisik yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Desain Rancangan Prototipe

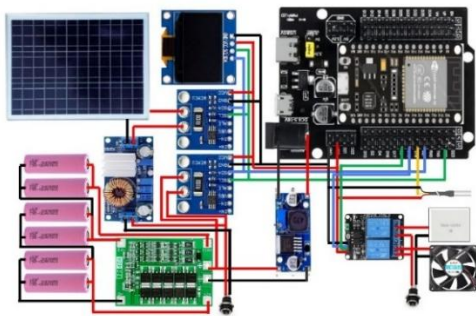


Gambar 10. Desain Sistem Pendinginan Prototipe

Desain rancangan prototipe sistem pendingin panel surya berbasis internet of things (IoT). Struktur utama prototipe terdiri dari rangka besi siku lubang namun kokoh yang berfungsi menopang seluruh komponen. Di bagian atas rangka terdapat panel surya sebagai sumber energi utama, dengan sensor suhu yang terpasang di panel surya untuk mendeteksi perubahan suhu secara real-time. Tepat di bawah panel, terpasang modul peltier dan kipas (fan)

yang berfungsi sebagai sistem pendingin aktif ketika suhu melebihi ambang batas tertentu. Sementara itu, untuk sistem pendinginan digunakan plat aluminium 1mm sebagai penyebar suhu dingin dari peltier ke panel surya dan terdapat heatsink sebagai pembuangan panas dari sisi peltier yang panas dan di bantu kipas untuk membuat suhu panas ke suhu sekitar dapat dilihat pada Gambar 10.

Pada prototipe ini digunakan ESP32 untuk mikrokontrolernya selanjutnya digunakan sensor daya INA226 sebagai pengukur tegangan dan arus panel surya dan juga mengukur tegangan baterai dan terdapat modul mppt 5a sebagai penurun tegangan dan penstabilan tegangan yang masuk ke BMS, lalu ada relay 2 channel untuk menghidupkan dan mematikan peltier dan kipas lalu ada OLED sebagai layar untuk menampilkan hasil monitoring pada kotak sistem kendali untuk rangkaian elektronis dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Wiring Diagram Prototipe



Gambar 12. Desain Antarmuka Blynk

Desain antarmuka sistem monitoring panel surya berbasis blynk ditampilkan pada Gambar 12. Antarmuka ini dirancang untuk menyajikan informasi secara real-time terkait kondisi sistem, termasuk tegangan panel surya, arus panel surya, tegangan baterai, dan suhu permukaan panel. Setiap parameter ditampilkan dalam bentuk gauge digital dengan indikator warna yang berbeda untuk memudahkan pemantauan visual. Pada bagian bawah antarmuka, terdapat indikator berbentuk tombol yang menunjukkan status aktivasi sistem pendinginan. Antarmuka ini menggunakan pendekatan visual yang minimalis dan responsif agar dapat diakses dengan mudah melalui perangkat seluler. Integrasi dengan mikrokontroler berbasis IoT memungkinkan data dikirim dan diperbarui secara langsung melalui koneksi internet, sehingga pengguna dapat memantau kondisi panel surya dari jarak jauh secara praktis dan efisien.

Persamaan untuk menghitung daya dapat dilihat pada persamaan 1 berikut.

$$P = V \times I \tag{1}$$

dimana

P = Daya (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Table 1. Spesifikasi Panel Surya Polikristalin

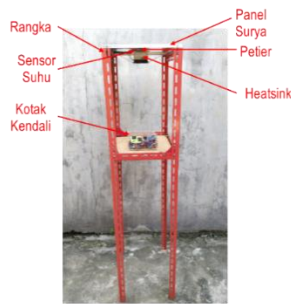
Spesifikasi	Nilai
Peak Power (Pmax)	20Wp
Voltase (Vmp)	18V
Arus (Imp)	1,14A
Voltase Sirkuit Terbuka (Vo)	21,6V
Temperature Cell	25°C

Table 2. Spesifikasi Modul Peltier 12706

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	15V
Arus	6A
Suhu	-30 to 70
Daya	60W

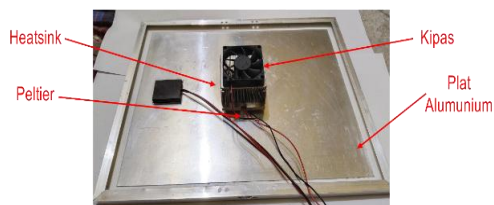
3. Hasil dan Pembahasan

Prototipe sistem pendingin panel surya berbasis internet of things (IoT) telah berhasil dirancang dan direalisasikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Alat ini terdiri dari panel surya sebagai sumber energi utama, sensor suhu untuk pemantauan kondisi termal, modul Peltier sebagai pendingin aktif, heatsink untuk pembuangan panas, serta kotak kendali yang memuat rangkaian mikrokontroler dan komponen elektronik pendukung lainnya. Rangka utama alat dibuat dari bahan besi siku lubang yang kokoh dan ringan, sehingga memudahkan proses pemasangan dan perawatan.



Gambar 13. Hasil Rancangan Prototipe

Pada Gambar 13 ditunjukkan komponen utama dari sistem pendinginan yang digunakan dalam prototipe. Sistem ini terdiri dari modul peltier, heatsink, kipas, dan plat aluminium sebagai media penghantar panas. Modul Peltier bekerja berdasarkan prinsip efek termoelektrik, yaitu menghasilkan perbedaan suhu ketika dialiri arus listrik. Salah satu sisi modul Peltier menjadi dingin dan ditempelkan pada plat aluminium yang bersentuhan langsung dengan bagian bawah panel surya, sedangkan sisi lainnya menghasilkan panas yang kemudian diserap oleh heatsink. Untuk mempercepat proses pelepasan panas dari heatsink, ditambahkan kipas yang membantu sirkulasi udara dan meningkatkan efisiensi pendinginan.



Gambar 13. Hasil Rancangan Sistem Pendinginan



Gambar 14. Tampilan Antarmuka Aplikasi Blynk untuk Monitoring Panel Surya

Gambar 14 menunjukkan tampilan antarmuka blynk yang berhasil digunakan sebagai media monitoring sistem panel surya secara real-time. Aplikasi ini menampilkan beberapa parameter penting, di antaranya: tegangan panel surya, arus panel surya, daya keluaran panel, tegangan baterai, serta suhu permukaan panel surya. Seluruh data ini ditampilkan secara dinamis menggunakan widget gauge yang terhubung langsung dengan sensor melalui mikrokontroler ESP32. Selain itu, terdapat indikator status relay yang menunjukkan apakah sistem pendingin kipas dan peltier sedang aktif atau tidak, berdasarkan ambang batas suhu yang telah diprogram.

blynk berperan penting sebagai komponen utama dari sistem IoT pada penelitian ini. Melalui integrasi dengan ESP32 dan koneksi Wi-Fi, data sensor dikirimkan secara terus-menerus ke aplikasi blynk, sehingga pengguna dapat memantau performa panel surya dan status pendinginan dari jarak jauh. Fungsi ini sangat krusial untuk mengidentifikasi kondisi suhu ekstrem yang dapat menurunkan efisiensi panel, sekaligus memastikan sistem pendingin bekerja secara tepat waktu. Dengan adanya platform ini, prototipe yang dikembangkan tidak hanya bersifat otomatis dan adaptif, tetapi juga memberikan transparansi data yang real-time, sehingga selaras dengan konsep sistem energi cerdas berbasis IoT.

Pengujian sistem pendinginan dilakukan selama tujuh hari berturut-turut dari tanggal 26 Mei 2025 hingga 1 Juni 2025, dengan pemantauan daya keluaran panel surya setiap jam mulai pukul 08.00 hingga 16.00 menggunakan dua panel yang berbeda dengan spesifikasi yang sama. Data diperoleh dalam dua kondisi yaitu pendingin aktif dan pendingin tidak aktif, untuk mengevaluasi pengaruh sistem pendinginan terhadap performa panel surya.

Dari hasil menunjukkan bahwa penggunaan sistem pendinginan berbasis modul Peltier dan kipas memberikan peningkatan daya keluaran panel surya yang signifikan, terutama pada kondisi cuaca cerah hingga sangat cerah. Selisih daya (ΔW) tertinggi terjadi pada Hari ke-6 pukul 10.00, dengan perbedaan 3,13 W, diikuti oleh Hari ke-4 pukul 13.00 sebesar 3,35 W. Hal ini menandakan bahwa sistem pendinginan bekerja sangat efektif ketika suhu panel meningkat tajam akibat intensitas radiasi matahari yang tinggi.

Pada hari-hari dengan cuaca mendung atau gerimis (seperti Hari ke-1 dan sebagian Hari ke-2), selisih daya relatif kecil, berkisar antara 0,00 hingga 0,58 W, menunjukkan bahwa sistem pendinginan kurang memberikan efek signifikan ketika suhu lingkungan rendah. Namun demikian, bahkan pada kondisi cuaca yang tidak terlalu terik, sistem pendinginan masih mampu mempertahankan daya keluaran lebih tinggi dibandingkan saat tidak aktif.

Table 3. Data Hasil Pengujian Sistem Pendinginan

Hari	Waktu	Pendingin Aktif (W)	Pendingin Tidak Aktif (W)	Selisih (W)	Kondisi cuaca
1	08.00	1,16	1,04	0,12	Berawan
	09.00	2,32	1,73	0,58	Mendung
	10.00	3,59	3,24	0,35	Mendung
	11.00	1,16	1,16	0,00	Gerimis
	12.00	3,96	3,72	0,25	Berawan
	13.00	4,91	4,44	0,47	Berawan
	14.00	3,97	3,61	0,36	Berawan
	15.00	4,88	4,76	0,12	Berawan
	16.00	3,02	2,67	0,35	Berawan
	08.00	2,24	1,76	0,48	Mendung
2	09.00	2,83	2,47	0,36	Mendung
	10.00	3,90	3,64	0,26	Berawan
	11.00	4,84	4,36	0,48	Berawan
	12.00	5,12	4,17	0,95	Berawan
	13.00	8,25	7,99	0,26	Berawan
	14.00	6,24	5,75	0,49	Berawan
	15.00	5,44	5,15	0,28	Berawan
	16.00	5,16	4,92	0,24	Berawan
	08.00	2,37	1,77	0,60	Cerah
	09.00	9,78	8,92	0,87	Cerah
3	10.00	10,24	9,38	0,87	Sangat Cerah
	11.00	10,66	9,80	0,86	Sangat Cerah
	12.00	11,10	10,57	0,53	Sangat Cerah
	13.00	9,90	9,54	0,37	Cerah
	14.00	10,48	9,98	0,51	Sangat Cerah
	15.00	8,49	7,88	0,61	Cerah
	16.00	2,30	1,81	0,49	Caerah
	08.00	1,31	0,83	0,48	Cerah
	09.00	2,27	1,31	0,96	Cerah
	10.00	10,27	8,87	1,40	Cerah
4	11.00	3,83	2,95	0,89	Cerah Berawan
	12.00	8,40	5,57	2,83	Cerah
	13.00	12,21	8,86	3,35	Cerah
	14.00	10,44	9,41	1,03	Sangat Cerah
	15.00	8,87	7,41	1,46	Berawan
	16.00	2,01	1,17	0,84	Mendung
	08.00	0,57	0,23	0,34	Sangat Cerah
	09.00	7,17	6,80	0,37	Sangat Cerah
	10.00	9,68	8,68	1,00	Sangat Cerah
	11.00	10,72	9,33	1,39	Sangat Cerah
5	12.00	11,43	9,94	1,49	Sangat Cerah
	13.00	11,20	10,10	1,10	Sangat Cerah
	14.00	10,36	8,97	1,39	Sangat Cerah
	15.00	8,56	7,23	1,33	Sangat Cerah
	16.00	5,93	5,68	0,25	Sangat Cerah
	08.00	0,34	0,23	0,11	Cerah
	09.00	6,81	6,57	0,24	Cerah
	10.00	11,86	8,72	3,13	Sangat Cerah
	11.00	3,99	3,40	0,59	Sangat Cerah
	12.00	9,74	9,22	0,52	Sangat Cerah
6	13.00	11,75	9,70	2,05	Sangat Cerah
	14.00	10,18	9,15	1,04	Sangat Cerah
	15.00	8,20	7,00	1,19	Cerah
	16.00	2,02	1,30	0,72	Berawan
	08.00	0,80	0,45	0,34	Cerah
	09.00	5,20	4,84	0,36	Cerah
	10.00	7,59	7,09	0,50	Sangat Cerah
	11.00	9,45	8,83	0,62	Sangat Cerah
	12.00	11,01	10,11	0,90	Sangat Cerah
	7	13.00	10,76	9,65	1,12
14.00		9,69	8,83	0,86	Sangat Cerah
15.00		8,14	6,68	1,46	Sangat Cerah
16.00		5,52	4,09	1,43	Cerah

Table 4. Data Perbandingan Suhu Panel Surya

Hari	Waktu	Pendingin Aktif (°C)	Pendingin Tidak Aktif (°C)	Selisih (°C)	Kondisi cuaca
1	08.00	28,9	29,8	0,9	Berawan
	09.00	29,1	30,3	1,2	Mendung
	10.00	31,2	32,4	1,2	Mendung
	11.00	28,7	31,9	3,2	Gerimis
	12.00	30,5	31,7	1,2	Berawan
	13.00	31,6	33,8	2,2	Berawan
	14.00	31,2	33,4	2,2	Berawan
	15.00	30,8	31,1	0,3	Berawan
	16.00	29,4	30,9	1,5	Berawan
	08.00	29,5	31,2	1,7	Mendung
2	09.00	30,5	33,5	3	Mendung
	10.00	31,9	34,1	2,2	Berawan
	11.00	32,7	35,7	3	Berawan
	12.00	32,4	35,4	3	Berawan
	13.00	34,8	37,1	2,3	Berawan
	14.00	33,5	36,2	2,7	Berawan
	15.00	32,7	34,1	1,4	Berawan
	16.00	33,6	35,5	1,9	Berawan
	08.00	29,3	29,4	0,1	Cerah
	09.00	32,7	35,6	2,9	Cerah
3	10.00	33,4	51,2	17,8	Sangat Cerah
	11.00	35,3	57,4	22,1	Sangat Cerah
	12.00	38,2	62,4	24,2	Sangat Cerah
	13.00	39,6	65,5	25,9	Cerah
	14.00	39,3	64,8	25,5	Sangat Cerah
	15.00	37,9	58,2	20,3	Cerah
	16.00	34,9	39,6	4,7	Caerah
	08.00	29,5	30,1	0,6	Cerah
	09.00	31,4	32,8	1,4	Cerah
	10.00	35,8	52,4	16,6	Cerah
4	11.00	35,7	64,1	28,4	Cerah Berawan
	12.00	37,3	61,9	24,6	Cerah
	13.00	38,9	59,2	20,3	Cerah
	14.00	38,7	59,8	21,1	Sangat Cerah
	15.00	37,1	54,1	17	Berawan
	16.00	32,1	38,3	6,2	Mendung
	08.00	29,7	29,9	0,2	Sangat Cerah
	09.00	34,1	45,2	11,1	Sangat Cerah
	10.00	35,8	58,9	23,1	Sangat Cerah
	11.00	39,1	73,3	34,2	Sangat Cerah
5	12.00	37,4	76,9	39,5	Sangat Cerah
	13.00	41,6	73,3	31,7	Sangat Cerah
	14.00	40,7	74,1	33,4	Sangat Cerah
	15.00	39,4	64,9	25,5	Sangat Cerah
	16.00	34,5	38,2	3,7	Sangat Cerah
	08.00	30,1	30,4	0,3	Cerah
	09.00	34,3	49,7	15,4	Cerah
	10.00	36,2	66,1	29,9	Sangat Cerah
	11.00	37,9	60,8	22,9	Sangat Cerah
	12.00	40,7	76,1	35,4	Sangat Cerah
6	13.00	45,3	82,2	36,9	Sangat Cerah
	14.00	40,1	62,7	22,6	Sangat Cerah
	15.00	38,2	56,9	18,7	Cerah
	16.00	33,6	40,9	7,3	Berawan
	08.00	30,2	30,8	0,6	Cerah
	09.00	33,7	45,4	11,7	Cerah
	10.00	34,7	48,6	13,9	Sangat Cerah
	11.00	38,9	68,8	29,9	Sangat Cerah
	12.00	40,8	71,1	30,3	Sangat Cerah
	7	13.00	41,1	76,6	35,5
14.00		40,1	69,3	29,2	Sangat Cerah
15.00		39,1	61,2	22,1	Sangat Cerah
16.00		35,2	43,8	8,6	Cerah

Dari data juga terlihat bahwa tren selisih daya mulai meningkat signifikan sejak pukul 10.00 hingga 14.00 setiap harinya, yang merupakan rentang waktu intensitas cahaya matahari tertinggi. Ini memperkuat bukti bahwa sistem pendinginan perlu diaktifkan secara otomatis pada waktu-waktu tersebut untuk menjaga efisiensi konversi panel tetap optimal.

Secara keseluruhan, rata-rata peningkatan daya selama tujuh hari menunjukkan bahwa sistem pendinginan mampu memberikan kontribusi positif terhadap performa panel surya, dengan total penghematan panas yang ditransformasikan menjadi peningkatan daya hingga >3 W dalam kondisi ideal. Selain menjaga suhu panel tetap rendah, sistem ini juga berpotensi memperpanjang usia pakai panel dan meningkatkan efisiensi energi dalam jangka panjang.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas sistem pendinginan berbasis IoT dalam menurunkan suhu permukaan panel surya. Data diambil selama 7 hari, setiap jam dari pukul 08.00 hingga 16.00, pada dua kondisi: dengan pendingin aktif dan tanpa pendingin. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem pendingin memiliki dampak signifikan dalam mengurangi suhu, terutama pada kondisi cuaca cerah hingga sangat cerah. Pada hari-hari dengan intensitas cahaya rendah seperti berawan, mendung, atau gerimis (Hari ke-1 dan Hari ke-2), selisih suhu antara panel dengan pendingin dan tanpa pendingin berkisar antara 0,3°C hingga 3°C. Hal ini dapat dimaklumi karena suhu permukaan panel tidak terlalu tinggi, sehingga sistem pendingin tidak menunjukkan perbedaan ekstrem. Meski demikian, sistem tetap menunjukkan konsistensi dalam menurunkan suhu meskipun dalam kondisi lingkungan yang lembap atau kurang optimal.

Perbedaan mencolok terlihat pada hari cerah dan sangat cerah (Hari ke-3 hingga Hari ke-7). Misalnya, pada Hari ke-5 pukul 12.00, suhu panel tanpa pendingin mencapai 76,9°C, sementara dengan pendingin hanya 37,4°C, menghasilkan selisih 39,5°C. Selisih tertinggi tercatat pada Hari ke-6 pukul 13.00, yaitu 36,9°C, yang membuktikan efektivitas sistem pendingin dalam mengendalikan suhu pada kondisi ekstrem.

Secara umum, pada jam-jam puncak intensitas matahari (10.00–14.00), selisih suhu cenderung lebih tinggi, sering kali mencapai lebih dari 20°C. Ini menunjukkan bahwa sistem pendingin aktif bekerja optimal ketika suhu panel meningkat drastis akibat paparan radiasi matahari maksimum. Penurunan suhu ini sangat penting, karena suhu berlebih dapat menurunkan efisiensi konversi energi panel surya serta mempercepat degradasi material sel surya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian selama tujuh hari berturut-turut terhadap prototipe sistem pendinginan panel surya berbasis internet of things (IoT) menunjukkan bahwa penurunan suhu panel secara signifikan meningkatkan daya listrik yang dihasilkan. Sistem yang terdiri dari modul peltier, heatsink, dan kipas ini mampu menurunkan suhu panel hingga 20–30°C saat cuaca sangat cerah, dibandingkan kondisi tanpa pendingin yang bisa mencapai lebih dari 76°C. Penurunan suhu ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi panel, dengan daya tambahan mencapai 3,35 watt pada jam-jam puncak. Temuan ini menunjukkan korelasi kuat antara kestabilan termal dan kinerja panel, menjadikan sistem pendingin ini efektif untuk memperpanjang umur panel dan meningkatkan output energi, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia.

Referensi

- [1]. T. Artiningrum and J. Havianto, "Meningkatkan Peran Energi Bersih Lewat Pemanfaatan Sinar Matahari," *Geoplanart*, vol. 2, no. 2, pp. 100–115, 2020.
- [2]. M. Mungkin, H. Satria, J. Yanti, G. B. A. Turnip, and S. Suwarno, "Perancangan Sistem Pemantauan Panel Surya Polycrystalline Menggunakan Teknologi Web Firebase Berbasis IoT," *INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science*, vol. 3, no. 2, pp. 319–327, 2020.
- [3]. B. S. Panulisan *et al.*, "Kelayakan Potensi Sumber Daya Energi Terbarukan Sebagai Solusi Keterbatasan Daya Listrik Di Pedesaan Dengan Metode Sel Surya," *Indonesian Journal of Thousand Literacies*, vol. 1, no. 3, pp. 279–288, 2023.
- [4]. M. A. R. Effendy, "Sistem Monitoring Kinerja Panel Surya Berbasis IoT Menggunakan Arduino Uno Pada PLTS Pematang Johar," *TEKTONIK: Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 1, no. 1, pp. 32–39, 2023.
- [5]. M. Rusdi, R. Rahmawaty, M. A. Pulungan, A. Azis, S. Irawan, and Z. Othman, "Analisis Variasi Suhu Terhadap Variasi Cahaya Pada Rancang Bangun Solar Test Simulator Menggunakan Peltier," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 7, no. 1, 2024.
- [6]. W. Wahyu, "Desain dan Analisis Sistem Hybrid Panel Surya dan Termoelektrik," *MSI Transaction on Education*, vol. 4, no. 1, pp. 45–58, 2023.
- [7]. H. Mubarak, R. Rusman, T. Muzakkir, W. Yuniarto, and H. Hasan, "Rancang Bangun Sistem Peningkatan Daya Output Pada Solar Panel Dengan Metode Pendinginan Otomatis Berbasis Mikrokontroler," *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 4, no. 6, pp. 61–70, 2024.
- [8]. J. I. Bayu, I. B. Sulistiyawati, and N. P. Agustini, "Monitoring Pengaruh Suhu Pada Panel Surya Terhadap Performa Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Jurnal FORTECH*, vol. 4, no. 1, pp. 27–32, 2023.

- [9]. M. Daud, M. Y. Zulfikar, A. Hasibuan, and M. Isa, "Prototype Of Automatic Watering And Fertilizing System For Oil Palm Seeds Based On Internet Of Things," *Andalas Journal Of Electrical And Electronic Engineering Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, May 2023, doi: doi.org/10.25077/ajeet.v3i1.37.
- [10]. R. K. Kamila, N. P. D. A. Martini, and L. Krisnawati, "Sistem Pemantauan Dan Kendali Konsumsi Listrik Rumah Tangga Dengan Logika Fuzzy Berbasis Internet Of Things," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 26, no. 4, pp. 214–223, Nov. 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.4.214-223.
- [11]. R. D. Yulianto, S. I. Haryudo, L. Rakhmawati, and T. Rijanto, "Perancangan Dan Pembuatan Prototype Water Spray Pembersih Panel Surya Berbasis Internet Of Things," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 26, no. 3, pp. 139–146, Jul. 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.3.139-146.
- [12]. M. Munawarah, M. Daud, and A. Mardhiah, "Prototipe Ayunan Bayi Otomatis Berbasis Internet of Things dan Aplikasi Telegram," *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, vol. 7, no. 1, pp. 122–137, 2023.
- [13]. A. H. Bakriansyah, M. Daud, T. Taufiq, and A. Asran, "Prototype of Automatic Monitoring and Control System for Water Supply, Acidity, and Nutrition in Internet of Things Based DFT Hydroponics," *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 339–350, 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i2.235.
- [14]. Anton Prafanto, Edy Budiman, Putut Pamilih Widagdo, Gubtha Mahendra Putra, and Reza Wardhana, "PENDETEKSI KEHADIRAN MENGGUNAKAN ESP32 UNTUK SISTEM PENGUNCI PINTU OTOMATIS," *Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, 2021.
- [15]. A. Sanaris and I. Suharjo, "Prototype Alat Kendali Otomatis Penjemur Pakaian Menggunakan NodeMCU ESP32 Dan Telegram Bot Berbasis Internet of Things (IOT) Prototype Automatic Drying Tool Using NodeMCU ESP32 and Telegram Bot Based on Internet of Things (IOT)," Gejayan, 2021.
- [16]. F. Fahrurrozi, G. A. Buntoro, and J. S. Habiby, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Sistem Hybrid Tenaga Air Dan Surya Dengan Sistem Kontrol Berbasis Arduino," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: dx.doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6300.
- [17]. H. P. Ramadhan, C. Kartiko, and A. Prasetiadi, "Monitoring Kualitas Air Tambak Udang Menggunakan NodeMCU, Firebase, dan Flutter," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 6, no. 1, 2020.
- [18]. M. Akbar, T. A. Rizal, and R. Syntia, "Pengujian Kinerja Pendinginan Thermo Electric Cooling (TEC) Menggunakan Heatsink Dengan Variasi Dimensi dan Jenis Material," *JURUTERA-Jurnal Umum Teknik Terapan*, vol. 8, no. 01, pp. 19–28, 2021.
- [19]. A. Pengaruh *et al.*, "Analisa pengaruh Intesitas Sinar Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Sel Surya Jenis Monokristal," *Mesil*, vol. 1, no. 2, pp. 99–106, Dec. 2020.