

ANALISIS PENINGKATAN EFISIENSI TRACKING PANEL SURYA DUAL AXIS 100 WP TERHADAP SUHU PANEL DI KAMPUS 2 ITN MALANG

Trio Nur Prawito¹, Ni Putu Agustini², Alfarid Hendro Yuwono³
Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional, Malang Indonesia

¹trionurprawito3@gmail.com, ²ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id, ³alfaridhendroyuwono@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang sangat potensial di Indonesia, namun kinerja panel surya dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan suhu operasionalnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan efisiensi panel surya polikristalin 100 watt peak dengan mengaplikasikan sistem pelacakan (tracking) dan pendinginan aktif. Metode penelitian meliputi perancangan sistem pengujian berbagai konfigurasi panel surya secara bersamaan, dengan data diambil menggunakan sensor yang terhubung pada mikrokontroler ESP32 untuk mengukur suhu, intensitas cahaya, tegangan, dan arus secara akurat dan waktu nyata. Hasil menunjukkan panel dengan sistem single-axis tracking mencapai efisiensi 16.40 persen dengan energi rata-rata 176.31 watt-jam, lebih tinggi dibandingkan panel statis yang hanya 15.30 persen dan 146.83 watt-jam. Penerapan dual-axis tracking bersama pendinginan aktif meningkatkan efisiensi sampai 17.58 persen dan energi rata-rata 179.35 watt-jam, lebih baik dibanding panel tanpa pendingin yang mencapai 16.89 persen dan 159.38 watt-jam. Kesimpulannya, kombinasi tracking dan pendinginan aktif terbukti efektif untuk meningkatkan penyerapan cahaya, menjaga suhu panel, serta memperbaiki performa sistem secara keseluruhan.

Kata kunci panel surya, efisiensi, dual axis tracking, pendinginan aktif, energi terbarukan

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi sangat penting bagi kehidupan manusia dan memiliki dampak yang signifikan terhadap berbagai bidang, termasuk ekonomi, kesehatan, pendidikan, dan transportasi. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan kemajuan teknologi di Indonesia, begitu pula dengan kebutuhan energi di negara ini. Namun, ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi telah meningkatkan emisi karbon, yang berdampak buruk terhadap lingkungan dan berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global. Selain itu, semakin menipisnya persediaan bahan bakar fosil mengharuskan penggunaan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan. Oleh karena itu, melalui

Peraturan Pemerintah No. 79/2014, pemerintah Indonesia bertujuan untuk meningkatkan porsi energi baru terbarukan dalam bauran energi negara hingga tahun 2050[1].

Energi matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan di Indonesia. Indonesia memiliki banyak potensi untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena Indonesia merupakan negara yang berada di dekat garis khatulistiwa dan menerima sinar matahari dalam jumlah yang cukup sepanjang tahun[2]. Bagian utama dari PLTS, panel surya, menggunakan efek fotovoltaiik untuk mengubah energi matahari menjadi tenaga listrik. Namun, sejumlah variabel, seperti jumlah sinar matahari, suhu di sekitarnya, sudut datangnya cahaya, dan kebersihan permukaan panel, memiliki dampak yang signifikan terhadap efisiensi panel surya[3].

Salah satu kelemahan utama dari sistem panel surya tradisional adalah lokasinya yang tidak bergerak, yang mengakibatkan penyerapan energi matahari yang tidak optimal sepanjang hari. Teknologi pelacakan matahari diciptakan untuk mengatasi masalah ini dengan mengoptimalkan orientasi panel terhadap arah sinar matahari yang masuk. Teknik ini meningkatkan efisiensi konversi energi dengan memungkinkan panel surya untuk bergerak seiring dengan posisi matahari. Banyak teknik pelacakan yang telah digunakan, termasuk pelacakan sumbu ganda dan pelacakan sumbu tunggal. Sistem pelacakan sumbu ganda memiliki manfaat untuk menyerap lebih banyak energi daripada sistem sumbu tetap atau tunggal[4].

Meskipun sistem pelacakan matahari dapat meningkatkan penyerapan energi matahari, sistem ini juga dapat menyebabkan panel surya menjadi terlalu panas karena meningkatnya paparan sinar matahari. Peningkatan suhu ini mengurangi efisiensi pembangkit listrik karena sel fotovoltaiik berkinerja lebih buruk pada suhu yang lebih tinggi. Studi

menunjukkan bahwa peningkatan suhu panel sebesar 1°C dapat menurunkan efisiensi konversi energi sebesar 0,4-0,5%[5]. Oleh karena itu, sistem pendingin panel surya sangat penting untuk menjaga suhu panel dalam kisaran terbaik dan meningkatkan efisiensi sistem tenaga surya.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis mengenai pengaruh peningkatan suhu pada panel surya yang menggunakan sistem dual-axis tracking, serta pengembangan sistem pendinginan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi daya yang dihasilkan oleh panel surya. Dengan adanya sistem pendingin yang efektif, diharapkan kinerja panel surya dapat ditingkatkan, sehingga energi yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah pembangkit listrik bertenaga surya yang menggunakan media fotovoltaik (atau sel surya) untuk mengubah radiasi foton dari matahari menjadi energi listrik. Lapisan tipis bahan semikonduktor silikon (Si) murni dan bahan semikonduktor lainnya digunakan untuk membuat sel surya (fotovoltaik) ini. Prinsip kerjanya adalah jika bahan sel surya menerima energi foton dari sinar matahari, maka akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas, yang pada akhirnya akan menghasilkan tegangan listrik arus searah (DC)[6]. Setelah dihasilkan oleh sel surya, arus searah (DC) disalurkan ke inverter, yang mengubahnya menjadi arus bolak-balik (AC), yang sering digunakan pada peralatan listrik di rumah-rumah. Selain itu, sistem panel surya dapat dilengkapi dengan baterai untuk menyimpan listrik ekstra yang dihasilkan pada siang hari untuk digunakan pada malam hari atau dalam kondisi kurang cahaya.

B. Panel surya Polycrystalline

Panel surya polikristalin dibuat dengan melebur silikon cair yang kemudian dituangkan ke dalam cetakan untuk sinkronisasi dan dipadatkan, menghasilkan wafer yang terdiri atas banyak kristal silikon berukuran bervariasi. Struktur kristal majemuk ini memberikan ciri khas berupa pola bercak biru pada panel. Proses produksi yang lebih sederhana dan penggunaan silikon yang lebih sedikit menjadikan panel ini lebih hemat biaya dibandingkan panel monokristalin. Meskipun efisiensinya sedikit lebih rendah, yaitu berkisar antara 15% hingga 17%, kemajuan teknologi terus memperkecil selisih efisiensi tersebut, menjadikan panel polikristalin sangat cocok untuk instalasi skala besar yang mengutamakan efisiensi biaya[7]. Berdasarkan kondisi uji standar (Standard Test Condition/STC), panel surya dioperasikan pada suhu standar sebesar 25°C [8]. Penetapan suhu ini sebagai acuan bertujuan agar pengukuran efisiensi dan parameter kinerja panel surya berlangsung dalam kondisi laboratorium yang konsisten dan dapat direplikasi. Standarisasi ini diberlakukan secara internasional, sehingga kinerja data yang tercantum pada spesifikasi produsen dapat dibandingkan secara tujuan antar berbagai jenis panel surya. Namun, dalam lingkungan operasional sebenarnya, panel surya sering mengalami kenaikan suhu akibat paparan langsung radiasi matahari, sehingga suhu panel dapat

melampaui 25°C [9]. Struktur kristal majemuk ini memberikan ciri khas berupa pola bercak biru pada panel. Gambar 1 menunjukkan contoh visual dari panel surya polycrystalline.



Gambar 1. Panel Surya Polycrystalline

C. Kinerja Panel Surya

Kinerja panel surya mengacu pada tingkat efektivitas dan kemampuan suatu modul fotovoltaik dalam mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Parameter ini merupakan indikator penting untuk efisiensi serta produktivitas suatu sistem pembangkit listrik tenaga surya. Analisis kinerja mencakup beberapa aspek teknis yang saling berkaitan.

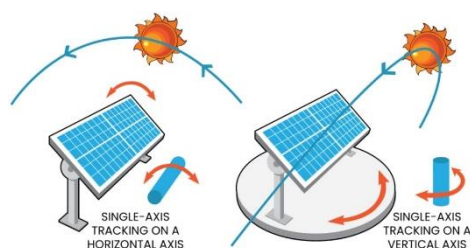
- Aspek Utama Kinerja Panel Surya
 - Efisiensi Konversi (η) didefinisikan sebagai perbandingan dalam persentase antara daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dengan intensitas radiasi matahari yang diterima pada luas permukaan modul aktif. Semakin tinggi nilai efisiensi tersebut, semakin besar pula proporsi energi surya yang berhasil mengkonversi menjadi energi listrik, sehingga memungkinkan panel menghasilkan daya yang lebih besar meskipun dengan area pemasangan yang relatif kecil.
 - Daya Keluaran Maksimum (P_{max} atau P_{mp}) merupakan kemampuan maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya pada titik operasi optimalnya, yang dikenal sebagai Titik Daya Maksimum (Maximum Power Point/MPP), yang dicapai pada kombinasi tegangan spesifik dan arus operasional.
 - Energi (kWh) yang dihasilkan panel surya mengacu pada jumlah total energi yang diproduksi dalam rentang waktu tertentu seperti harian, bulanan, atau tahunan dan dinyatakan dalam satuan kilowatt-jam (kWh). Parameter ini merupakan indikator operasional yang mencerminkan kontribusi nyata sistem fotovoltaik dalam memenuhi kebutuhan energi.
- Indeks Kinerja Tambahan
 - Tegangan Sirkuit Terbuka (Open Circuit Voltage, V_{oc}) yang dihasilkan oleh panel surya pada kondisi tanpa beban, atau ketika arus yang mengalir bernilai nol, dikenal sebagai tegangan sirkuit terbuka. Parameter ini merupakan salah satu karakteristik listrik penting dalam spesifikasi teknis panel surya

- Arus Hubung Singkat (Short Circuit Current, I_{sc}) dihasilkan oleh panel surya terjadi ketika terminal outputnya dalam keadaan hubung singkat (tegangan nol), dikenal sebagai arus hubung singkat.
- Faktor Isi (Fill Factor, FF) didefinisikan sebagai perbandingan antara daya maksimum (P_{max}) yang dihasilkan panel surya dengan hasil perkalian tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) dan arus hubung singkat (I_{sc}). Nilai FF yang mendekati 1 menunjukkan karakteristik kinerja modul fotovoltaik yang semakin ideal.

D. Panel Surya Tracker Single Axis dan Dual Axis

- Single Axis

Sistem pelacakan surya sumbu tunggal umumnya menghasilkan output energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem fotovoltaik statis (tetap). Keunggulan ini berasal dari kemampuan sistem pelacakan untuk menyesuaikan orientasinya mengikuti pergerakan harian matahari, sehingga memperpanjang durasi paparan sinar matahari langsung ke panel surya. Peningkatan durasi paparan ini secara langsung meningkatkan energi yang dikirimkan ke panel dan memaksimalkan daya puncak yang dihasilkan. Sebaliknya, sistem statis mengalami kerugian energi karena ketidakmampuannya mempertahankan paparan sinar matahari langsung secara optimal sepanjang hari. Kerugian ini dapat secara signifikan dikurangi dengan implementasi pelacak surya, yang berkontribusi pada peningkatan substansial dalam produksi daya surya[10]. Sistem pelacakan surya sumbu tunggal umumnya menghasilkan output energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem fotovoltaik statis (tetap). Cara kerja sistem ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Panel Surya Tracker Single Axis

- Dual Axis

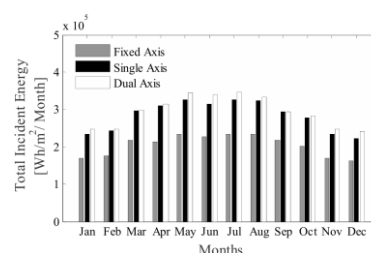
Perangkat yang dikenal sebagai panel surya pelacak sumbu ganda memungkinkan panel surya untuk secara otomatis mendeteksi pergerakan matahari pada dua sumbu: vertikal (elevasi) dan horisontal (azimuth). Berbeda dengan sistem statis, teknologi ini memungkinkan panel surya untuk tetap berada pada posisi terbaik terhadap matahari sepanjang hari, meningkatkan efisiensi penyerapan energi matahari. Pendorong utama di balik perlunya sistem pelacak matahari untuk meningkatkan output energi listrik PV surya adalah efisiensi energi. Namun, rendahnya

efisiensi yang dihasilkan oleh panel surya sekitar 16% merupakan penghalang yang signifikan untuk penerapannya[11]. Sensor cahaya, mikrokontroler, dan aktuator seperti motor servo atau stepper adalah beberapa bagian utama dari sistem tersebut. Sensor cahaya mengukur jumlah sinar matahari dan meneruskan informasi tersebut ke mikrokontroler, yang pada gilirannya mengarahkan aktuator untuk memindahkan panel ke posisi yang tepat untuk pencahayaan yang optimal[12]. Panel surya dual axis bekerja dengan prinsip pelacakan matahari untuk memaksimalkan penerimaan energi matahari. Sistem ini memungkinkan panel surya bergerak secara otomatis mengikuti pergerakan matahari di langit, baik secara horizontal maupun vertikal, sehingga sudut penyerapan cahaya matahari selalu optimal[13]. Perangkat yang dikenal sebagai panel surya pelacak sumbu ganda memungkinkan panel surya untuk secara otomatis mendeteksi pergerakan matahari pada dua sumbu: vertikal (elevasi) dan horisontal (azimuth). Bentuk fisiknya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Panel Surya Tracker Dual Axis

Didapatkan hasil dari penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa sistem pelacakan surya sumbu tunggal mampu menghasilkan energi rata-rata 38.31% lebih banyak dibandingkan dengan sistem statis (tetap). Sementara itu, pelacak surya sumbu ganda menunjukkan peningkatan produksi energi yang lebih signifikan, yaitu rata-rata 43.79% lebih tinggi dibandingkan sistem tetap. Oleh karena itu, penggunaan pelacak sumbu ganda dapat menghasilkan penambahan energi tahunan rata-rata sebesar 5.47% dibandingkan dengan pelacak sumbu tunggal[14]. Oleh karena itu, penggunaan pelacak sumbu ganda dapat menghasilkan penambahan energi tahunan rata-rata sebesar 5.47% dibandingkan dengan pelacak sumbu tunggal. Perbedaan peningkatan energi bulanan dari berbagai sistem pelacakan dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 4.



Gambar 4. Perhitungan Energi Bulanan Untuk Berbagai Sistem Pelacakan

Sistem pelacakan surya dual-axis secara signifikan meningkatkan jumlah energi yang dihasilkan dibandingkan dengan sistem pelacakan sumbu tunggal maupun sistem tetap. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan energi dari penggunaan pelacak dual-axis berkisar antara 20% hingga 45% secara global[15]. Khususnya pada iklim tropis seperti di Indonesia, peningkatan tersebut dapat mencapai 42% hingga 60%[16].

E. Pengaruh Suhu terhadap Efisiensi Solar Tracker

Efektivitas sistem pelacak matahari secara signifikan dipengaruhi oleh suhu. Tegangan output (Voc) dapat turun ketika suhu panel surya meningkat, yang akan mengurangi jumlah listrik yang dihasilkan panel. Untuk setiap kenaikan suhu 1°C, efisiensi panel surya dapat turun 0.4% hingga 0.5%[5]. Hal ini dikarenakan panel surya bekerja secara optimal pada suhu 25°C, sehingga peningkatan suhu panel akan berdampak langsung pada penurunan daya yang dihasilkan[17].

F. PSH (Peak Sun Hour)

PSH merupakan representasi total energi radiasi matahari yang diterima oleh permukaan seluas satu meter persegi dalam satu hari, yang kemudian dikonversikan ke dalam jam ekuivalen pada intensitas puncak 1.000 W/m², yang artinya dalam suatu lokasi menerima total energi surya sebesar 6.650 Wh/m² dalam sehari, maka lokasi tersebut secara efektif memiliki 6.65 PSH[18]. PSH juga faktor penentu utama dalam menghitung ukuran (kapasitas) sistem panel surya yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, semakin tinggi nilai PSH rata-rata di suatu lokasi maka akan semakin efisien panel surya dapat beroperasi. Potensi rata-rata radiasi matahari global harian di Kota Malang dapat mencapai sekitar 4.8 kWh/m², yang artinya nilai PSH sebesar 4.5 jam/hari[19].

G. Motor DC

Motor DC adalah komponen penting dalam sistem solar tracker dual axis karena kemampuannya untuk menggerakkan panel surya dengan presisi mengikuti arah pergerakan matahari. Penggunaan motor DC memungkinkan penyesuaian posisi panel surya secara tepat, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam penyerapan energi matahari. Selain itu, motor DC memiliki kelebihan berupa kemudahan dalam pengendalian serta kemampuan untuk diintegrasikan secara optimal dengan sistem elektronik lainnya, menjadikannya pilihan yang ideal untuk aplikasi solar tracker[20].



Gambar 5. Motor DC

Pada gambar 5, menunjukkan motor dc yang di pilih karena kemampuannya dalam mengendalikan gerakan putar dengan mudah. Motor ini berfungsi sebagai aktuator yang memutar panel surya agar selalu menghadap ke matahari.

H. Baterai

Baterai berperan sebagai komponen penyimpan energi dalam sistem solar tracker dual axis, yang bertugas menyediakan daya bagi motor penggerak serta berbagai komponen elektronik lainnya. Pemilihan jenis baterai yang sesuai sangat penting untuk menjamin kinerja sistem yang efisien dan berkelanjutan. Jenis baterai yang sering digunakan dalam aplikasi ini meliputi baterai asam timbal, lithium-ion, dan nikel-metal hidrida, masing-masing memiliki karakteristik khusus seperti kapasitas penyimpanan energi, umur pakai, efisiensi pengisian daya, dan toleransi terhadap siklus pengisian ulang[21].



Gambar 6. Baterai

Pada gambar 6, digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan, juga berperan penting sebagai cadangan daya agar sistem tetap beroperasi.

I. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang luas digunakan dalam bidang energi listrik dan elektronika untuk implementasi kontrol otomatis serta antarmuka sensor. Perangkat ini dirancang untuk menghubungkan sistem teknologi konvensional maupun modern melalui jaringan komunikasi berkat integrasi modul Wi-Fi dan Bluetooth 4.2. Arsitektur dual-core Tensilica Xtensa 32-bit memungkinkan pemrosesan data paralel dengan kapasitas komputasi tinggi, sementara sejumlah pin GPIO mendukung fungsi input/output, PWM (Pulse Width Modulation), serta antarmuka dengan periferal. Fitur konektivitas nirkabel terpadu memungkinkan ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi dan bertukar data dengan perangkat lain via protokol Bluetooth. Konfigurasi tersebut menjadikannya komponen kunci dalam pengembangan aplikasi Internet of Things (IoT) yang memerlukan skalabilitas, efisiensi daya, dan integrasi sistem yang fleksibel[22].

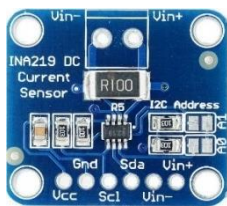


Gambar 7. ESP32

Pada gambar 7, digunakan sebagai otak dari seluruh sistem, yang berfungsi untuk memproses data dari sensor dan mengendalikan motor serta komponen lainnya.

J. Sensor Tegangan dan Arus (INA219)

Sensor INA219 adalah sensor yang berfungsi untuk mengukur arus dan tegangan, khususnya pada sistem panel surya. Sensor ini memanfaatkan komunikasi berbasis I2C, yang memungkinkan penghubungan beberapa sensor hanya dengan menggunakan dua jalur kabel[23]. Fitur unggulan dari sensor INA219 meliputi pengukuran arus resolusi tinggi hingga $\pm 3.2A$, pengukuran tegangan tinggi hingga 26V, dan akurasi pembacaan daya yang tinggi. Untuk menjamin hasil pengukuran yang akurat dan konsisten, sensor ini juga memiliki fitur kalibrasi internal. INA219 sangat cocok untuk aplikasi pemantauan daya di berbagai perangkat listrik dan sistem energi terbarukan karena gabungan fitur-fitur ini.



Gambar 8. Sensor Tegangan dan Arus

Pada gambar 8, digunakan untuk pengukuran tegangan dan arus panel surya.

K. Sensor Suhu (DS18B20)

Sensor suhu DS18B20 adalah komponen elektronik yang mampu mengubah perubahan suhu lingkungan menjadi sinyal listrik. Sensor ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui protokol digital berbasis komunikasi 1-Wire. Salah satu keunggulan DS18B20 adalah setiap sensor memiliki kode serial unik, sehingga memungkinkan penggunaan beberapa sensor secara bersamaan dalam satu jalur komunikasi 1-Wire. Sensor ini dapat membaca suhu dengan tingkat ketelitian antara 9 hingga 12 bit, menjadikannya pilihan yang andal untuk berbagai aplikasi pengukuran suhu. Karakteristik sensor DS18B20 mencakup kemampuan beroperasi pada tegangan 3-5V, tingkat akurasi dengan margin kesalahan $\pm 0.5^{\circ}C$, serta jangkauan pengukuran suhu dari $-10^{\circ}C$ hingga $85^{\circ}C$. Sensor ini memiliki kabel merah untuk VCC, kabel hitam untuk GND, dan kabel kuning untuk data. Diameter kabelnya adalah 4 mm dengan panjang mencapai 90 cm[24].



Gambar 9. Sensor Suhu

Pada gambar 9, digunakan dalam pengukuran suhu panel, yang ditempatkan di bagian belakang panel untuk mendapatkan data suhu operasional secara real-time.

L. Sensor Intensitas Cahaya (BH1750)

Sensor BH1750 merupakan sensor cahaya digital yang berfungsi untuk mengukur intensitas pencahayaan dalam satuan lux (lx). Sensor ini bekerja dengan antarmuka komunikasi I²C, sehingga memungkinkan proses integrasi yang mudah dengan berbagai mikrokontroler, seperti Arduino Uno atau Arduino Nano. Rentang pengukuran BH1750 berada antara 1 hingga 65.535 lux, dengan sensitivitas tinggi dan konsumsi daya rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi pemantauan intensitas cahaya baik di dalam maupun di luar ruangan[25].



Gambar 10. Sensor Intensitas Cahaya

Pada gambar 10, digunakan sebagai pengukur intensitas cahaya dan membantu sistem melacak posisi matahari secara optimal.

M. Relay DC

Relay adalah sakelar yang dioperasikan secara elektrik yang terdiri dari dua komponen elektromekanis utama yaitu mekanik (kontak sakelar) dan elektromagnet (koil)[26]. Relai beroperasi berdasarkan prinsip elektromagnetik, yang menggerakkan kontak sakelar untuk menghantarkan listrik bertegangan lebih tinggi dengan arus listrik yang tidak terlalu besar (daya rendah). Relai biasanya memiliki kumparan inti besi yang, ketika terkena listrik, berubah menjadi magnet dan menarik kontak. Hal ini menyebabkan relai beralih dari kondisi normally open (NO) ke normally close (NC) untuk mengalirkan listrik.



Gambar 11. Relay

Pada gambar 11, digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengendalikan sistem pendingin secara otomatis.

N. Buck Converter

DC-to-DC buck converter adalah jenis konverter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari sumber daya ke tingkat yang lebih rendah sesuai kebutuhan. Prinsip kerja buck converter melibatkan penggunaan switch yang beroperasi

secara terus-menerus dalam mode ON-OFF, dikendalikan oleh teknik PWM (Pulse Width Modulation) dan Duty Cycle. Duty Cycle menentukan durasi waktu switch berada dalam keadaan ON, yang secara langsung memengaruhi tegangan output. Dengan sistem ini, buck converter mampu menghasilkan tegangan output yang stabil dan efisien untuk berbagai perangkat elektronik[27].



Gambar 12. Buck Converter

Pada gambar 12, digunakan untuk menyesuaikan tegangan yang masuk ke mikrokontroler dan memastikan semua komponen mendapat daya dengan tegangan yang sesuai.

O. Ultrasonic Ceramic Humidifier Mist

Ultrasonic Ceramic Humidifier Mist adalah perangkat yang menggunakan teknologi ultrasonik untuk menghasilkan uap atau kabut dingin dengan memanfaatkan getaran frekuensi tinggi dari cakram keramik. Selain meningkatkan kelembapan udara, kabut yang dihasilkan membantu menurunkan suhu ruangan secara alami tanpa memerlukan panas. Dengan melepaskan partikel air yang sangat kecil ke atmosfer, mekanisme ini menghasilkan efek pendinginan yang lebih baik



Gambar 13. Ultrasonic Ceramic Humidifier Mist

Pada gambar 13, digunakan pada sistem pendingin aktif, yang berfungsi menyemprotkan kabut air untuk menurunkan suhu panel.

P. Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) adalah perangkat lunak resmi yang dirancang untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah kode ke berbagai modul Arduino. Sistem ini menyediakan editor teks untuk menulis program, area pesan untuk memberikan umpan balik selama penyimpanan atau ekspor, konsol teks untuk menampilkan output, serta toolbar dengan tombol fungsi umum. Bahasa pemrograman yang digunakan dalam Arduino IDE mirip dengan bahasa C dan C++, menjadikannya fleksibel dan mudah dipahami bahkan oleh pemula. Selain itu, IC mikrokontroler pada Arduino dilengkapi dengan program bootloader yang berfungsi sebagai penghubung antara compiler dan mikrokontroler, sehingga proses pengunggahan kode menjadi lebih sederhana.



Gambar 14. Tampilan dari Arduino IDE

Pada gambar 14, sebagai tempat program untuk mikrokontroler ESP32 dibuat menggunakan Arduino IDE.

Q. Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Variasi kondisi lingkungan sekitar dapat berdampak langsung terhadap performa panel surya, sehingga memengaruhi jumlah energi listrik yang dapat dihasilkan. Untuk menganalisis hal ini, digunakan sejumlah persamaan tertentu dalam proses perhitungannya[28][29].

Rumus Daya Input:

$$P_{in} = I_r \times A \quad (1)$$

Ket :

P_{in} : daya input (watt)

I_r : intensitas irradiasi matahari (W/m^2)

A : luas area modul surya (m^2)

Rumus Fill factor (faktor pengisian):

Fill factor merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menilai kinerja sel surya. Fill factor didefinisikan sebagai rasio antara daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya dengan hasil kali tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) dan arus sirkuit pendek (I_{sc}). Sebagai besaran tanpa satuan, fill factor memberikan gambaran mengenai efisiensi konversi energi yang dilakukan oleh sel surya[28].

$$FF = \frac{V_{pm} \times I_{pm}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2)$$

Ket :

V_{pm} : tegangan pada titik kerja maksimum

I_{pm} : arus pada titik kerja maksimum

V_{oc} : tegangan rangkaian terbuka (open circuit)

I_{sc} : arus hubung singkat (short circuit)

Ketika resistansi variabel mencapai nilai tak terhingga atau dalam kondisi sirkuit terbuka, arus yang mengalir akan mendekati nol, sementara tegangannya akan berada pada titik maksimum. Tegangan ini dikenal sebagai tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}). Sebaliknya, saat resistansi variabel bernilai nol, arus akan mencapai maksimum dan tegangannya akan berada pada titik minimum, yang disebut sebagai arus hubung singkat (I_{sc}). Dari penjelasan ini, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai fill factor (FF) pada sel surya, semakin baik pula kinerja sel tersebut, yang diindikasikan dengan koefisien konversi energi yang lebih efisien[28].

Rumus Daya Output:

$$p_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (3)$$

Ket :

p_{out} : Daya keluaran (Watt)

V_{oc} : Tegangan rangkaian terbuka sel surya (volt)

I_{sc} : Arus short circuit sel surya (Ampere)

Rumus Efisiensi Panel Surya:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

Ket :

η : Efisiensi modul fotovoltaik (%)

P_{out} : Daya yang dihasilkan sel fotovoltaik (W)

P_{in} : Daya masukan yang diterima sel fotovoltaik (W)

Efisiensi panel surya (η) sangat dipengaruhi oleh suhu sel surya. Peningkatan suhu sel dapat menyebabkan penurunan tegangan keluaran, yang pada akhirnya mengurangi daya dan efisiensi panel secara keseluruhan[5]. Rumus matematis yang digunakan untuk memodelkan hubungan ini sebagai berikut:

Rumus Efisiensi Suhu :

$$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})] \quad (5)$$

Keterangan :

η_c : Efisiensi pada suhu operasional

η_{Tref} : Efisiensi panel pada suhu referensi

β_{ref} : Koefisien suhu daya ($^{\circ}C$)

T_c : Suhu sel actual ($^{\circ}C$)

T_{ref} : Suhu referensi ($^{\circ}C$)

Dimana koefisien suhu daya dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

Rumus Koefisien Suhu Daya :

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (6)$$

Keterangan :

T_0 : Suhu di mana efisiensi 0 ($^{\circ}C$)

T_{ref} : Suhu referensi ($^{\circ}C$)

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di area luar lantai empat Gedung Elektro S-1, kampus II ITN Malang untuk pengambilan data nya.

B. Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, proses perakitan alat memerlukan sejumlah komponen dan bahan yang terdiri dari berbagai elemen penting, tabel 1 menunjukkan komponen yang akan dipakai dalam penelitian ini.

Tabel 1. Kebutuhan Alat dan Bahan

Nama Perangkat	Jenis	Jumlah
Panel Surya Tracker Dual Axis 100 WP	Poly-Crystalline	2
Solar charge controller	Max 10 Ampere	1
Motor DC	DC 12 V	2
Baterai	Tag 12 V 45 Ah	1
Mikrokontroler ESP32	Dev-Module	1
Sensor Tegangan dan Arus	INA219	2
Sensor Suhu	DS18B20	2
Sensor Intensitas Cahaya	BH1750	2
Relay DC	Normally-Open	1
Modul Buck Converter	Max 5 A	1
Ultrasonic Ceramic Humidifier Mist		12

C. Flowchart Keseluruhan Sistem



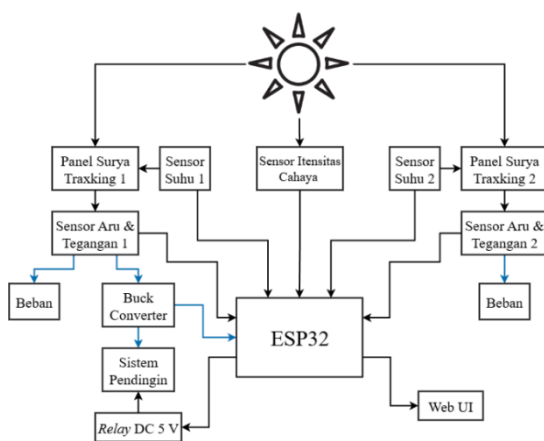
Gambar 15. Flowchart Keseluruhan Sistem

Gambar 15, memperlihatkan alur kerja sistem secara keseluruhan, penjelasan algoritma flowchart sistem tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mulai
2. Input Data
Data yang dikumpulkan berupa tegangan, arus, intensitas cahaya dan suhu panel surya menggunakan sensor INA219, sensor BH1750 dan sensor DS11B20. Pengumpulan data dilakukan pada panel surya dengan 2 skenario
3. Perancangan dan Pembuatan Alat
Merancang dan membuat alat pendingin kabut air untuk mendinginkan suhu panel surya *dual axis*
4. Skenario 1 & Skenario 2
skenario pertama dengan kondisi panel statis dan panel *single axis*, untuk skenario ke dua dengan kondisi panel *dual axis* dan panel *dual axis* + pendingin

5. Perhitungan Efisiensi tanpa Pendingin
Pada skenario 2 untuk panel *dual axis* dilakukan perhitungan efisiensi yang terdapat beberapa perhitungan yaitu perhitungan Pin, FF, Pout, Efisiensi dan Efisiensi suhu operasi
6. Perhitungan Efisiensi dengan Pendingin
Pada skenario 2 untuk panel *dual axis* dengan pendingin juga dilakukan perhitungan efisiensi yang terdapat beberapa perhitungan yaitu perhitungan Pin, FF, Pout, Efisiensi dan Efisiensi suhu
7. Cek kondisi
Apakah Efisiensi dengan Pendingin (panel dual axis + pendingin) Lebih Besar dari Efisiensi tanpa Pendingin (panel dual axis)?
 - Apabila efisiensi dengan pendingin tetap atau tidak terdapat kenaikan efisiensi pada panel *dual axis* yang menggunakan system pendingin maka dilakukan penambahan *Ultrasonic Ceramic Humidifier Mist* sehingga lebih maksimal dalam mengontrol suhu, kemudian kembali ke poin 3 untuk perancangan alat yang lebih baik.
 - Apabila terdapat kenaikan efisiensi pada panel surya *dual axis* dengan system pendingin maka control suhu panel bekerja dengan baik dan lanjut ke hasil dan analisa.
8. Hasil dan Analisa
Hasil yang diperoleh dari perhitungan akan dianalisis dan di buat kesimpulan
9. Selesai

D. Blok Diagram Alat

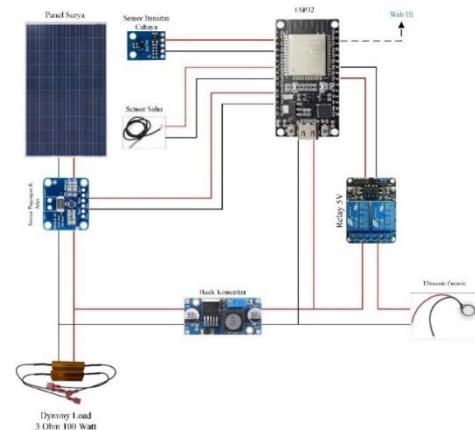


Gambar 16. Blok Diagram Alat

Pada gambar 16, menunjukan alur diagram blok yaitu, penelitian ini menggunakan panel surya yang dilengkapi sistem tracking dual axis yang terdapat dua motor DC untuk menggerakkan panel surya, kemudian daya keluar panel surya di ukur terlebih dahulu menggunakan sensor arus dan tegangan (INA219) kemudian diteruskan ke beban dan buck converter, kemudian tegangan yang sudah diturunkan menjadi 5 V menggunakan *buck converter* untuk menghidupkan mikrokontroler ESP32. Fungsi ESP32 adalah untuk mengontrol dan juga mengambil data keluaran daya yang

sudah terbaca oleh sensor tegangan dan sensor arus (INA219) serta data keluaran suhu dan intensitas cahaya menggunakan sensor suhu DS18B20 dan sensor BH1750 yang dipasang pada panel surya *tracking dual axis*. Setelah data sensor sensor sudah terkirim ke mikrokontroler akan menjalankan program yang ada sehingga bisa menghidup dan mematikan relay sesuai program untuk menyalakan sistem pendingin panel surya. ESP32 juga mengirim data ke web ui untuk memantau secara *real-time*.

E. Perancangan Perangkat Keras



Gambar 17. Perancangan Perangkat Keras

Pada gambar 17, menunjukkan perancangan perangkat keras yaitu, sistem pendingin panel surya menggunakan *solar tracking dual axis* membutuhkan beberapa komponen seperti, *solar tracking*, sensor arus dan tegangan (INA219), sensor intensitas cahaya (BH1750), sensor suhu (DS18B20), ESP32, *buck converter*, relay 5V, *dummy load* dan *Ultrasonic Ceramic* agar dapat menjalankan sistem sesuai dengan kinerja yang diinginkan.

IV. HASIL DAN ANALISA

A. Hasil Pengukuran Panel Surya Statis dan Panel Surya Single Axis

a. Hasil Pengujian Sensor Suhu dan Radiasi

Pada tahap pertama dilakukan proses pengukuran intensitas cahaya dan suhu panel surya 1 (kondisi panel tetap/ statis) dan panel surya 2 (panel *single axis*) yang diterima oleh modul surya selama 7 hari dari tanggal 3-9 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 2. Hasil Rata-Rata Pengukuran Sensor Suhu & Radiasi

Hari	Suhu (°C) PV 1	Suhu (°C) PV 2	Radiasi (W/m ²)	Cuaca
Hari ke - 1	49.14	52.59	1306.18	Cerah
Hari ke - 2	43.05	45.55	811.36	Cerah
Hari ke - 3	50.14	52.91	1315.27	Cerah

Hari ke - 4	50.21	52.73	1311.65	Cerah
Hari ke - 5	43.85	46.19	816.36	Cerah
Hari ke - 6	48.25	48.06	1027.73	Cerah
Hari ke - 7	49.03	51.91	1311.65	Cerah

Dari tabel 2 hasil pengukuran data menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara radiasi matahari dan suhu panel surya, di mana peningkatan radiasi menyebabkan kenaikan suhu panel. Meskipun suhu pada PV 1 dan PV 2 mengalami fluktuasi, perubahan suhu tersebut cenderung lebih stabil dibandingkan dengan variasi radiasi. Hal ini disebabkan oleh adanya inersia termal pada panel serta penggunaan sistem single-axis tracking pada salah satu panel, yang membantu menjaga suhu agar tetap lebih konstan dengan terus menyesuaikan orientasi panel terhadap posisi matahari.

b. Hasil Pengujian Sensor Tegangan dan Arus

Pada tahap kedua dilakukan proses pengukuran tegangan dan arus panel surya 1 (kondisi panel tetap/ statis) dan panel surya 2 (panel *single axis*) selama 7 hari dari tanggal 3-9 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 3. Hasil Rata-Rata Pengukuran Sensor Tegangan & Arus

Hari	Tegangan PV 1 (V)	Arus PV 1 (V)	Tegangan PV 2 (V)	Arus PV 2 (V)
1	14.65	3.8	15.7	4.49
2	14.14	3.44	15.19	4.23
3	14.43	3.69	15.52	4.4
4	14.55	3.82	15.55	4.1
5	14.41	3.54	15.31	4.32
6	15.1	3.85	15.52	4.37
7	14.46	3.8	15.55	4.2

Dari tabel 3 hasil pengukuran dapat dilihat bahwa keluaran tegangan dan arus dari panel surya mengalami penurunan dan kenaikan. Hal tersebut dipengaruhi oleh cuaca di lingkungan sekitar.

c. Hasil Pengukuran Voc dan Isc

Pada tahap ketiga dilakukan proses pengukuran tegangan dan arus panel surya 1 (kondisi panel tetap/ statis) dan panel surya 2 (panel *single axis*) selama 7 hari dari tanggal 3-9 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 4. Hasil Rata-Rata Pengukuran Voc dan Isc

Hari	Voc PV 1 (V)	Isc PV 1 (A)	Voc PV 2 (V)	Isc PV 2 (A)
1	20.15	5.2	20.79	6.14
2	19.88	4.06	21.62	4.67
3	20.19	5.11	20.52	6.22
4	20.19	5.29	20.52	6.13
5	20.29	4.35	21.45	5.05
6	20.13	5.05	21.01	5.76
7	20.27	5.25	21.02	6.09

Berdasarkan tabel 4 hasil pengukuran, nilai tegangan dari kedua panel relatif stabil dengan Voc panel statis

(PV1) berada pada kisaran 20.13–20.29 V, sedangkan Voc panel tracking (PV2) sedikit lebih tinggi yaitu antara 20.52–21.62 V. Sementara itu, nilai arus menunjukkan fluktuasi yang lebih signifikan, di mana Isc PV1 berada pada rentang 4.06–5.29 A, sedangkan Isc PV2 lebih tinggi, yaitu 4.67–6.22 A.

d. Perhitungan Efisiensi Maksimal Daya Output Panel

Pada tahap keempat yaitu proses perhitungan Pin, FF, Pout, Efisiensi dan Efisiensi pada suhu operasional pada kedua panel surya (statis & *single axis*) selama 7 hari dari tanggal 3-9 Agustus 2025 WIB, perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan 1-4.

Contoh perhitungan pada tanggal 3 Agustus 2025 :

Panel 1

Menentukan daya input (Pin)

$$P_{in} = 1306.18 \times 0.6834$$

$$P_{in} = 892.64 \text{ W}$$

Menentukan FF (factor pengisian)

$$FF = \frac{16.3 \times 4.4}{20.4 \times 6.7}$$

$$FF = 0,52472$$

Menentukan Daya Keluar (Pout)

$$p_{out} = 20.4 \times 6,7 \times 0.52472$$

$$p_{out} = 71.72 \text{ W}$$

Menentukan Efisiensi (%)

$$\eta = \frac{71.72}{892.64} \times 100\%$$

$$\eta = 8,03\%$$

Panel 2

Menentukan daya input (Pin)

$$P_{in} = 1306.18 \times 0.6834$$

$$P_{in} = 892.64 \text{ W}$$

Menentukan FF (factor pengisian)

$$FF = \frac{16.2 \times 4.9}{23.1 \times 6.97}$$

$$FF = 0.493022$$

Menentukan Daya Keluar (Pout)

$$p_{out} = 23.1 \times 6,97 \times 0.493022$$

$$p_{out} = 79.38 \text{ W}$$

Menentukan Efisiensi (%)

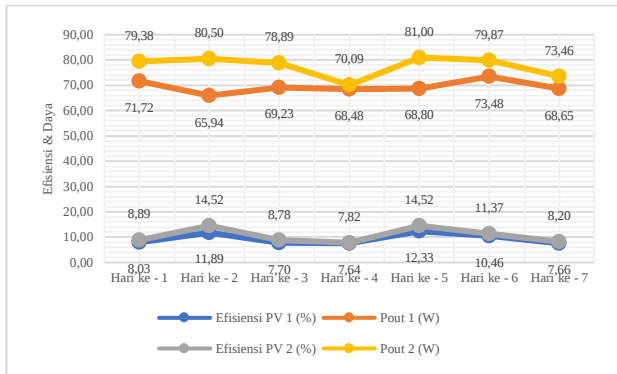
$$\eta = \frac{79.37}{892.64} \times 100\%$$

$$\eta = 8.89\%$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Efisiensi Pada Panel Surya

Hari	Pin 1 (W)	FF 1	Pout 1 (W)	η 1 (%)	Pin 2 (W)	FF 1	Pout 2 (W)	η 2 (%)
1	892.6	0.5	71.72	8	892.6	0.4	79.38	8.89
2	554.4	0.6	65.94	11.8	554.4	0.6	80.5	14.52
3	898.8	0.5	69.23	7.7	898.8	0.4	78.89	8.78
4	896.3	0.4	68.48	7.6	896.3	0.4	70.09	7.82
5	557.9	0.6	68.8	12.3	557.9	0.5	81	14.52
6	702.3	0.5	73.48	10.4	702.3	0.5	79.87	11.37
7	896.3	0.4	68.65	7.6	896.3	0.4	73.46	8.2

Dari tabel 5 hasil perhitungan tersebut, dapat dilihat bahwa Pout dan efisiensi dari panel *tracking* (Panel 2) secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan panel statis (Panel 1). Meskipun terjadi fluktuasi pada kedua panel, yang kemungkinan disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca seperti awan atau hujan, panel *tracking* berhasil mempertahankan performa yang lebih baik.



Gambar 18. Grafik Efisiensi & Daya Panel Surya

Gambar 18 menunjukkan perbedaan performa daya keluaran (Pout) dan efisiensi antara kedua panel. Pada sebagian besar hari, daya keluaran panel 2 (Pout 2) tampak lebih tinggi dibandingkan dengan daya keluaran panel 1 (Pout 1). Demikian pula, efisiensi panel 2 juga cenderung lebih tinggi daripada efisiensi panel 1. Hal ini menunjukkan bahwa panel surya yang dilengkapi dengan sistem *single-axis tracking* (panel 2) mampu menangkap radiasi matahari dengan lebih maksimal karena dapat mengikuti pergerakan matahari. Sementara itu, panel 1 yang dalam kondisi statis memiliki keterbatasan dalam memaksimalkan penyerapan radiasi karena kondisi panel yang tetap.

e. Menentukan Energi dan Beban Total pada Panel Surya Statis dan Panel Single Axis

Pada tahap kelima dilakukan perhitungan energi total beban dan energi total panel surya pada panel surya statis dan panel surya single axis yang dilakukan pengujian pada tanggal 3-9 Agustus 2025 selama 7 hari dari jam 08.00-13.00, sebagai berikut:

Menentukan beban total panel statis:

$$E_{beban\ total} = P \times t$$

$$E_{beban\ total} = 55.69 \times 5$$

$$E_{beban\ total} = 278.44\ W/h$$

Menentukan beban total panel *single axis*:

$$E_{beban\ total} = P \times t$$

$$E_{beban\ total} = 70.51 \times 5$$

$$E_{beban\ total} = 352.54\ W/h$$

Menentukan energi total panel surya statis:

$$E_{panel\ surya} = P \times t$$

$$E_{panel\ surya} = 105.36 \times 5$$

$$E_{panel\ surya} = 523.78\ W/h$$

$$E_{total} = E_{panel\ surya} - E_{beban\ total}$$

$$E_{total} = 523.78 - 278.44$$

$$E_{total} = 245.35\ W/h$$

Menentukan energi total panel surya *single axis*:

$$E_{panel\ surya} = P \times t$$

$$E_{panel\ surya} = 127.58 \times 5$$

$$E_{panel\ surya} = 637.90\ W/h$$

$$E_{total} = E_{panel\ surya} - E_{beban\ total}$$

$$E_{total} = 637.90 - 352.54$$

$$E_{total} = 285.37\ W/h$$

Tabel 6. Hasil Perhitungan Energi dan Beban Total Panel Surya

Hari	Beban PV 1	Beban PV 2	Energi PV 1	Energi PV 2
1	278.44	352.54	245.35	285.37
2	242.89	321.08	161.07	184
3	266.25	341.4	249.54	296.9
4	278.02	318.38	255.85	310.12
5	254.78	330.54	187.01	211.07
6	290.33	339.28	218.34	266.26
7	274.98	326.23	256.9	314.16

Berdasarkan tabel 6 hasil perhitungan, terlihat dengan jelas bahwa panel surya yang menggunakan sistem *single-axis tracking* (PV 2) secara konsisten menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan panel surya statis (PV 1), baik dari segi pemenuhan beban harian maupun total energi yang dihasilkan. Selama tujuh hari pengamatan, PV 2 selalu menghasilkan beban dan energi dalam jumlah lebih besar, yang membuktikan secara teknis bahwa sistem tracking mampu mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari.

B. Hasil Pengukuran Panel Surya Dual Axis dan Panel Surya Dual Axis dengan Pendingin

a. Hasil Pengujian Sensor Suhu dan Radiasi

Pada tahap pertama dilakukan proses pengukuran intensitas cahaya dan suhu panel surya 1 (kondisi panel *dual axis*) dan panel surya 2 (panel *dual axis* + pendingin) yang diterima oleh modul surya selama 7 hari dari tanggal 10-16 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 7. Hasil Rata-Rata Pengukuran Sensor Suhu & Radiasi

Hari	Suhu (°C) PV 1	Suhu (°C) PV 2	Radiasi (W/m2)	Cuaca
Hari ke - 1	52.95	28.87	702.69	Berawan
Hari ke - 2	53.55	28.78	711.4	Berawan
Hari ke - 3	55.59	28.93	1244.95	Berawan
Hari ke - 4	55.95	28.65	1272.76	Berawan
Hari ke - 5	38.5	28.82	295.8	Berawan
Hari ke - 6	53.95	28.79	719.58	Berawan
Hari ke - 7	56.27	28.99	1292.35	Berawan

Berdasarkan data tabel 7, terlihat adanya perbedaan yang mencolok pada suhu kedua panel surya meskipun keduanya mengalami kondisi cuaca berawan. Suhu PV 1 mengalami fluktuasi cukup besar, berkisar antara 38.50°C hingga 56.27°C, yang sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari. Sebaliknya, suhu PV 2 tetap sangat stabil dan konstan di sekitar 28°C, dengan variasi yang sangat kecil, terlepas dari besarnya radiasi yang diterima. Hal ini membuktikan bahwa sistem pendingin pada PV 2 bekerja dengan sangat efektif dalam menjaga suhu panel agar tetap rendah dan stabil.

b. Hasil Pengujian Sensor Tegangan dan Arus

Pada tahap kedua dilakukan proses pengukuran tegangan dan arus panel surya (kondisi panel *dual axis*) dan panel surya 2 (panel *dual axis* + pendingin) selama 7 hari dari tanggal 10-16 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 8. Hasil Rata-Rata Pengukuran Sensor Tegangan & Arus

Hari	Tegangan PV 1 (V)	Arus PV 1 (V)	Tegangan PV 2 (V)	Arus PV 2 (V)
1	15.43	3.93	16.17	4.65
2	15.66	4.21	16.29	4.67
3	17.2	5.86	17.65	6.16
4	17.3	5.96	17.75	6.26
5	15.7	3.8	15.13	3.23
6	15.1	3.27	16.4	4.68
7	17.4	6.06	17.85	6.36

Dari tabel 8 hasil pengukuran dapat dilihat bahwa keluaran tegangan dan arus dari panel surya mengalami penurunan dan kenaikan. Hal tersebut dipengaruhi oleh cuaca di lingkungan sekitar.

c. Hasil Pengukuran Voc dan Isc

Pada tahap ketiga dilakukan proses pengukuran tegangan dan arus panel surya 1 (kondisi panel *dual axis*) dan panel surya 2 (panel *dual axis* + pendingin) yang diterima oleh modul surya selama 7 hari dari tanggal 10-16 Agustus 2025, dengan setiap harinya dilakukan pengukuran dari jam 08.00-13.00 WIB.

Tabel 9. Hasil Rata-Rata Pengukuran Voc dan Isc

Hari	Voc PV 1 (V)	Isc PV 1 (A)	Voc PV 2 (V)	Isc PV 2 (A)
1	20.9	4.96	21.23	5.74
2	21	4.92	21.43	5.76
3	21.21	5.97	21.21	6.64
4	21.31	6.1	21.31	6.59
5	21.1	3.6	21.71	3.32
6	19.61	4.06	21.11	5.4
7	21.3	6.17	21.41	6.75

Berdasarkan tabel 9 hasil pengukuran, nilai tegangan open circuit (Voc) dari kedua panel surya, PV1 dan PV2, menunjukkan nilai yang relatif stabil, meskipun Voc pada panel PV2 sedikit lebih tinggi dari panel PV1, kemudian nilai arus short circuit (Isc) pada kedua panel menunjukkan fluktuasi yang lebih signifikan, dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari harian yang tidak tetap. Namun, secara keseluruhan, Isc pada Panel PV2 secara konsisten lebih tinggi dibandingkan Panel PV1. Perbedaan yang mencolok, terutama pada nilai arus, membuktikan bahwa sistem pendingin pada panel PV2 efektif dalam memaksimalkan performa sel surya.

d. Perhitungan Efisiensi Maksimal Daya Output Panel

Pada tahap keempat yaitu proses perhitungan Pin, FF, Pout, Efisiensi dan Efisiensi pada suhu operasional

pada kedua panel surya (*dual axis* & *dual axis* + pendingin) selama 7 hari dari tanggal 10-16 Agustus 2025 WIB, perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan 1-6.

Contoh perhitungan pada tanggal 10 Agustug 2025:

Panel 1

Menentukan daya input (Pin)	Menentukan FF (factor pengisian)
$P_{in} = 613.59 \times 0.6834$	$FF = \frac{16 \times 4}{23.50 \times 5.7}$
$P_{in} = 419.33 \text{ W}$	$FF = 0,48$
Menentukan Daya Keluar (Pout)	Menentukan Efisiensi (%)
$p_{out} = 23.50 \times 5,7 \times 0.48$	$\eta = \frac{64}{419.33} \times 100\%$
$p_{out} = 64 \text{ W}$	$\eta = 15.26\%$
Menentukan Koefisien Suhu Daya	Menentukan Efisiensi pada suhu operasional
$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}}$	$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})]$
$\beta_{ref} = \frac{1}{270 - 25}$	$\eta_c = 17.6[1 - 0.408(56 - 25)]$
$\beta_{ref} = 0.00408$	$\eta_c = 0.176[1 - (0.00408)(31)]$
$\beta_{ref} = 0.408\%$	$\eta_c = 0.176[1 - (0.12555)]$
	$\eta_c = 0.176[0.87445]$
	$\eta_c = 0.1537 \text{ atau } 15.37\%$

Panel 2

Menentukan daya input (Pin)	Menentukan FF (factor pengisian)
$P_{in} = 702.69 \times 0.6834$	$FF = \frac{16.5 \times 4.9}{23.2 \times 6.9}$
$P_{in} = 480.22 \text{ W}$	$FF = 0.51$
Menentukan Daya Keluar (Pout)	Menentukan Efisiensi (%)
$p_{out} = 23.2 \times 6.9 \times 0.51$	$\eta = \frac{80.85}{480.22} \times 100\%$
$p_{out} = 80.85 \text{ W}$	$\eta = 16.84\%$
Menentukan Koefisien Suhu Daya	Menentukan Efisiensi pada suhu operasional
$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}}$	$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})]$
$\beta_{ref} = \frac{1}{270 - 25}$	$\eta_c = 17.6[1 - 0.408(30.50 - 25)]$
$\beta_{ref} = 0.00408$	$\eta_c = 0.176[1 - (0.00408)(5.5)]$
$\beta_{ref} = 0.408\%$	$\eta_c = 0.176[1 - (0.02244)]$
	$\eta_c = 0.176[0.97756]$
	$\eta_c = 0.1721$
	$\eta_c = 17.21\%$

Tabel 10. Hasil Perhitungan Efisiensi Pada Panel Surya Dual Axis

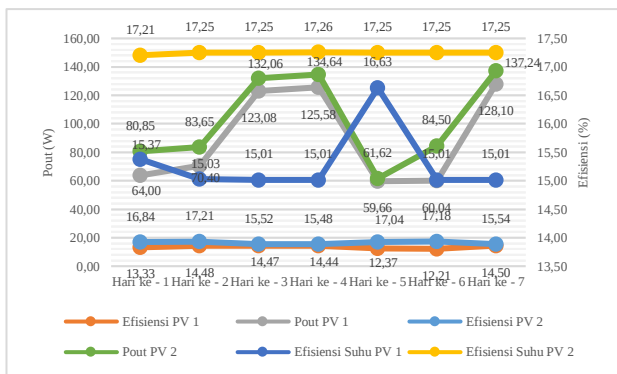
Hari	Pin 1 (W)	FF 1	Pout 1 (W)	Efisiensi 1 (%)	Efisiensi Suhu 1 (%)
1	480.2	0.4	64	13.33	15.07
2	486.1	0.5	70.4	14.48	15.03
3	850.8	0.7	123	14.47	15.01
4	869.8	0.7	125.5	14.44	15.01
5	482.2	0.7	59.66	12.37	16.63

6	491.7	0.6	60.04	12.21	15.01
7	883.1	0.7	128.1	14.5	15.01

Tabel 11. Hasil Perhitungan Efisiensi Pada Panel Surya Dual Axis dengan Pendingin

Hari	Pin 2 (W)	FF 2	Pout 2 (W)	Efisiensi 2 (%)	Efisiensi Suhu 2 (%)
1	480.22	0.51	80.85	16.84	17.21
2	486.17	0.52	83.65	17.21	17.25
3	850.8	0.72	132.06	15.52	17.25
4	869.81	0.75	134.64	15.48	17.26
5	361.61	0.66	61.62	17.04	17.25
6	491.76	0.61	84.5	17.18	17.25
7	883.19	0.75	137.24	15.54	17.25

Dari data tabel 10 dan 11 tersebut, dapat dilihat bahwa daya keluaran (Pout) dan efisiensi dari Panel PV 2 (*dual axis* + pendingin) secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan Panel PV 1 (*dual axis*). Meskipun kedua panel mengalami fluktuasi kinerja dari hari ke hari, kemungkinan besar disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari, Panel PV 2 tetap menunjukkan performa yang lebih unggul.



Gambar 19. Grafik Efisiensi & Daya Panel Surya

Gambar 19 menunjukkan perbedaan performa yang jelas pada daya keluaran (Pout) dan efisiensi antara panel PV 1 dan panel PV 2. Terlihat bahwa Pout dan efisiensi panel PV 2 secara konsisten berada di atas nilai yang dihasilkan oleh panel PV 1. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sistem pendingin yang dipasang pada Panel PV 2 berhasil menjaga suhu operasional pada level yang lebih rendah, sehingga mencegah penurunan efisiensi akibat efek panas. Sebaliknya, panel PV 1, yang beroperasi tanpa pendingin, cenderung memiliki suhu yang lebih tinggi, yang berdampak negatif pada efisiensi dan daya keluaran.

- e. Menentukan Energi dan Beban Total pada Panel Surya Dual Axis dan Panel Dual Axis dengan Pendingin

Pada tahap kelima dilakukan perhitungan energi total beban dan energi total panel surya pada panel surya dual axis dan panel surya dual axis dengan pendingin yang dilakukan pengujian pada tanggal 10-16 Agustus 2025 selama 7 hari dari jam 08.00-13.00, sebagai berikut:

Menentukan beban total panel *dual axis*:

$$E_{beban\ total} = P \times t$$

$$E_{beban\ total} = 60.65W \times 5$$

$$E_{beban\ total} = 303.25\ W/h$$

Menentukan beban total panel *dual axis* dengan pendingin:

$$E_{beban\ total} = P \times t$$

$$E_{beban\ total} = 75.12 \times 5$$

$$E_{beban\ total} = 357.59\ W/h$$

Menentukan energi total panel surya *dual axis*:

$$E_{panel\ surya} = P \times t$$

$$E_{panel\ surya} = 103.74 \times 5$$

$$E_{panel\ surya} = 518.70\ W/h$$

$$E_{total} = E_{panel\ surya} - E_{beban\ total}$$

$$E_{total} = 518.70 - 303.25$$

$$E_{total} = 215.45\ W/h$$

Menentukan energi total panel surya *dual axis* dengan pendingin:

$$E_{panel\ surya} = P \times t$$

$$E_{panel\ surya} = 121.84 \times 5$$

$$E_{panel\ surya} = 609.22\ W/h$$

$$E_{total} = E_{panel\ surya} - E_{beban\ total}$$

$$E_{total} = 609.22 - 357.59$$

$$E_{total} = 233.64\ W/h$$

Tabel 12. Hasil Perhitungan Energi dan Beban Total Panel Surya

Hari	Beban PV 1	Beban PV 2	Energi PV 1	Energi PV 2
1	303.25	375.59	215.45	233.64
2	329.72	380.09	186.59	237.31
3	504.27	543.8	129.11	159.96
4	515.85	555.76	133.88	146.09
5	298.3	244.1	81.5	116.27
6	247.03	383.91	151.39	185.75
7	527.54	567.81	129.86	155.14

Berdasarkan data tabel 12 yang ditampilkan, terlihat bahwa beban total harian PV 2 (*dual-axis* + pendingin) secara konsisten lebih tinggi dibandingkan PV 1 (*dual-axis*) kecuali pada hari ke-5. Peningkatan beban ini mengindikasikan bahwa sistem pendingin pada PV 2 efektif dalam menjaga suhu operasional panel tetap optimal, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi konversi energi. Kondisi suhu yang lebih rendah dan stabil pada PV 2 meminimalkan kerugian daya (power loss) yang biasa terjadi akibat panas berlebih, sehingga panel dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar dan memenuhi kebutuhan beban yang lebih tinggi. Perbedaan ini secara teknis membuktikan keunggulan panel yang dilengkapi dengan sistem pendingin, karena mampu memaksimalkan performa produksi energi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

- Penerapan sistem single-axis tracking pada panel surya 100 WP terbukti mampu meningkatkan efisiensi dan energi yang dihasilkan dibandingkan dengan panel surya statis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya dengan sistem single-axis tracking memiliki efisiensi rata-rata 16.40% dan menghasilkan energi rata-rata 176.31 W/h. Angka ini lebih tinggi dari panel surya statis yang hanya memiliki efisiensi rata-rata 15.30% dan energi rata-rata 146.83 W/h. Hal ini membuktikan bahwa kemampuan sistem pelacakan untuk mengikuti pergerakan matahari secara horizontal atau vertikal secara efektif memaksimalkan penyerapan intensitas cahaya.
- Penerapan sistem pendinginan aktif pada panel surya dual-axis tracking sangat berpengaruh signifikan terhadap efisiensi daya output yang dihasilkan. Efisiensi rata-rata panel surya dual-axis dengan sistem pendingin adalah 17.58% , yang lebih tinggi dari panel dual-axis tanpa pendingin dengan efisiensi rata-rata 16.89%. Demikian pula, energi rata-rata yang dihasilkan oleh panel dengan pendingin mencapai 179.35 W/h, sedangkan panel tanpa pendingin hanya menghasilkan 159.38 W/h. Hasil ini secara jelas membuktikan bahwa sistem pendinginan efektif dalam menjaga suhu operasional panel tetap optimal, sehingga mencegah penurunan efisiensi akibat efek panas dan meningkatkan kinerja keseluruhan system.
- Suhu panel surya memiliki pengaruh substansial terhadap efisiensi sistem secara keseluruhan. Hal ini dibuktikan melalui perbandingan panel dual-axis tracking yang menggunakan sistem pendingin dan tanpa pendingin. Panel dengan sistem pendingin memiliki efisiensi rata-rata 17.58%, sementara panel tanpa sistem pendingin hanya mencapai efisiensi rata-rata 16.89%. Perbedaan efisiensi ini secara langsung menunjukkan bahwa suhu operasional yang lebih rendah (terjadi pada panel dengan pendingin) mampu meningkatkan kinerja dan daya output panel.

B. Saran

- Untuk pengembangan penelitian lebih lanjut, disarankan untuk melakukan pengujian sistem dalam jangka waktu yang lebih panjang dan pada berbagai kondisi cuaca ekstrem, serta menambahkan fitur pemantauan dan kontrol jarak jauh melalui aplikasi seluler atau web-based, agar pemantauan kinerja panel surya dan sistem pendingin dapat dilakukan secara real-time dan lebih efisien, sekaligus memungkinkan analisis data jangka panjang yang lebih komprehensif.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Pambudi dkk., "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, hlm. 2342, Jan 2023, doi: 10.3390/su15032342.
- [2] F. Paundra dan A. Nurdin, "Study Of The Potential And Development Of Renewable Energy Power In Indonesia : A Review," *Steam Engineering*, vol. 3, no. 2, hlm. 62–72, Mar 2022, doi: 10.37304/jptm.v3i2.4024.
- [3] F. Afif dan A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 6, no. 1, hlm. 43, Mei 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.997.
- [4] B. F. Luista, A. B. Setiawan, dan A. Sumarahinsih, "Sistem Pembangkit Panel Surya Menggunakan Solar Traker Dual Axis Untuk Memaksimalkan Keluaran Daya," *Mars : Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 4, hlm. 190–207, Agu 2024, doi: 10.61132/mars.v2i4.256.
- [5] E. B. Agyekum, S. PraveenKumar, N. T. Alwan, V. I. Velkin, dan S. E. Shcheklein, "Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation," *Heliyon*, vol. 7, no. 9, hlm. e07920, Sep 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07920.
- [6] P. Gunoto dan S. Sofyan, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 WP Untuk Penerangan Lampu di Ruang Selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan," *SIGMA TEKNIKA*, vol. 3, no. 2, hlm. 96–106, Nov 2020, doi: 10.33373/sigma.v3i2.2754.
- [7] E. Enasel dan G. Dumitraşcu, "Assessment of Polycrystalline, Monocrystalline, and Amorphous Solar Panels Under Dynamic Environmental Conditions: Performance Insights for Renewable Energy Applications," *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi. Machine constructions Section*, vol. 70, no. 1, hlm. 27–46, Mar 2024, doi: 10.2478/bipcm-2024-0002.
- [8] T. E. K. Zidane, M. R. Bin Adzman, M. F. N. Tajuddin, S. Mat Zali, dan A. Durusu, "Optimal configuration of photovoltaic power plant using grey wolf optimizer: A comparative analysis considering CdTe and c-Si PV modules," *Solar Energy*, vol. 188, hlm. 247–257, Agu 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.002.
- [9] J. Harie Satiyadi, R. Muhamad Hudan, dan A. Asrori, "Analisis Pengaruh Suhu Panel Surya Terhadap Output Panel Performance," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, hlm. 42–51, Jan 2024, doi: 10.47134/jme.v1i1.2189.
- [10] A.-H. I. Mourad, H. Shareef, N. Ameen, A. H. Alhammadi, M. Iratni, dan A. S. Alkaabi, "A state-of-the-art review: Solar trackers," dalam *2022 Advances in Science and Engineering Technology International*

- Conferences (ASET)*, IEEE, Feb 2022, hlm. 1–5. doi: 10.1109/ASET53988.2022.9735074.
- [11] A. C. W. P. Gusti, A. U. Krismanto, dan R. P. M. D. Labib, “Desain Sistem Kendali Dual Axis Solar Tracker Berbasis Fuzzy Type 2,” *Magnetika*, vol. 8, no. 2, hlm. 183–193, Nov 2024, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.itn.ac.id/magnetika/article/view/10295>
- [12] A. U. Krismanto, R. P. M. D. Labib, H. Setiadi, A. Lomi, dan M. Abdillah, “Hardware implementation of type-2 fuzzy logic control for single axis solar tracker,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 35, no. 1, hlm. 102–112, Jul 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v35.i1.pp102-112.
- [13] M. Pardawantara, F. Antony, dan Rachmansyah, “Perancangan Sistem Solar Tracking Dual Axis Untuk Optimasi Panel Surya Menggunakan Sensor LDR Dan Gyroscope Berbasis Internet Of Things (IoT),” *Journal of Intelligent Networks and IoT Global*, vol. 1, no. 2, hlm. 98–106, Des 2023, doi: 10.36982/jinig.v1i2.3645.
- [14] H. M. Fahad, A. Islam, M. Islam, Md. F. Hasan, W. F. Brishty, dan Md. M. Rahman, “Comparative Analysis of Dual and Single Axis Solar Tracking System Considering Cloud Cover,” dalam *2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*, IEEE, Mei 2019, hlm. 1–5. doi: 10.1109/CEPE.2019.8726646.
- [15] I. H. Rosma, J. Asmawi, S. Darmawan, B. Anand, N. D. Ali, dan B. Anto, “The Implementation and Analysis of Dual Axis Sun Tracker System to Increase Energy Gain of Solar Photovoltaic,” dalam *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*, IEEE, Okt 2018, hlm. 187–190. doi: 10.1109/ICon-EEI.2018.8784321.
- [16] M. Efendi, R. I. Mainil, dan A. Aziz, “Comparison of the Efficiency of Solar PV Fixed, Single-Axis, and Dual-Axis Solar Trackers: A Review,” *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 10, no. 1, hlm. 84–93, Jan 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.1.9.
- [17] P. K. Tiyas dan M. Widyartono, “Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya,” *JTE*, vol. 9, no. 1, Agu 2019, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v9n1.p%25p>.
- [18] P. Megantoro, M. A. Syahbani, I. H. Sukmawan, S. D. Perkasa, dan P. Vigneshwaran, “Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, no. 5, hlm. 2442–2449, Okt 2022, doi: 10.11591/eei.v11i5.3962.
- [19] K. Witono, A. Asrori, dan A. Harijono, “The Comparison of Performance Polycrystalline and Amorphous Solar Panels under Malang City Weather Conditions,” *Bulletin of Science Education*, vol. 1, no. 2, hlm. 124, Feb 2021, doi: 10.51278/bse.v1i2.107.
- [20] A. D. Putra, A. B. Pulungan, dan I. Yelfianhar, “Optimalisasi Penyerapan Energi Matahari Menggunakan Sistem Solar Tracking Dua Sumbu,” *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, hlm. 187, Jun 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i2.108552.
- [21] I. Abadi, C. Imron, M. Musa Bachrowi, dan D. Nur Fitriyanah, “Design and implementation of battery charging system on solar tracker based stand alone PV using fuzzy modified particle swarm optimization,” *AIMS Energy*, vol. 8, no. 1, hlm. 142–155, Mar 2020, doi: 10.3934/energy.2020.1.142.
- [22] P. T. Wikantama dan R. Puspitasari, “Perancangan Perangkat Pengukur Ketinggian Banjir dengan ESP32 dan Telegram Berbasis IoT,” *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, vol. 13, no. 02, hlm. 107–114, Nov 2023, doi: 10.47709/elektriase.v13i02.3108.
- [23] M. Mungkin, H. Satria, J. Yanti, G. B. A. Turnip, dan 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, hlm. 319–327, Des 2020, doi: 10.31539/intecom.v3i2.1861.
- [24] M. Bagus, R. Huda, dan W. D. Kurniawan, “Analisa Sistem Pengendalian Temperatur Menggunakan sensor Ds18b20 Berbasis Mikrokontroler Arduino,” *JRM*, vol. 7, no. 2, hlm. 18–23, Jul 2022, doi: <https://doi.org/10.26740/jrm.v7i02.47897>.
- [25] M. Y. Albustomi, I. M. Wartana, dan A. U. Krismanto, “Merancang Sistem Monitoring dan Menganalisa Kinerja Realtime pada PLTS Skala Kecil,” *Magnetika*, vol. 7, no. 2, hlm. pp.357-364, Des 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.itn.ac.id/magnetika/article/view/8630>
- [26] A. Budiyanto, G. B. Pramudita, dan S. Adinandra, “Kontrol Relay dan Kecepatan Kipas Angin Direct Current (DC) dengan Sensor Suhu LM35 Berbasis Internet of Things (IoT),” *Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, vol. 19, no. 01, hlm. 43–54, Apr 2020, doi: 10.31358/techn.v19i01.224.
- [27] F. Musahiroh, “Desain dan Implementasi Buck Converter Pada Sistem Power Supply Untuk Mesin Cuci Dengan Menggunakan Panel Surya,” *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 11, no. 1, hlm. 8–14, Apr 2023, doi: 10.32487/jtt.v11i1.1506.
- [28] Z. Syahtuta dan M. Haryanti, “Rancang Bangun Solar Tracker Dual Axis Berbasis Iot (Internet Of Thing),” *Jurnal Teknik Industri*, vol. 12, no. 2, 2023, doi: <https://doi.org/10.35968/jti.v12i2.1118>.
- [29] Ferdi Kurniawan dkk., “Analysis Effect of Light Intensity on Efficiency of the GH 100 WP-72 Solar Cell,” *BIOMEJ*, vol. 4, no. 2, hlm. 23–29, Nov 2024, doi: 10.33005/biomej.v4i2.136.

VII. BIODATA PENULIS



Trio Nur Prawito, lahir di Malang, 08 Maret 2003. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMA Nasional Malang tahun 2021 penulis melanjutkan Pendidikan Studi diperguruan tinggi swasta Institut

Teknologi Nasional Malang program studi Teknik Elektro S-1 dengan konsentrasi Teknik Energi Listrik. Akhir kata dari penulis mengucapkan terimakasih dan rasa syukur yang sebanyak-banyaknya atas selesainya penelitian ini dengan judul “Analisis Peningkatan Efisiensi Tracking Panel Surya Dual Axis 100 WP Terhadap Suhu Panel Di Kampus 2 ITN”.