

Optimalisasi pembangkit energi surya dengan teknologi otomasi dan artificial intelligence

Mas Efendi^{a,1}, Dodi Sofyan Arief^b, Eddy Elfiano^c

^aProgram Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

^bProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

^cProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 28284

¹Email korespondensi: masefendi318@gmail.com

Abstrak. Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial di Indonesia karena letaknya di daerah tropis dengan paparan matahari rata-rata 10–12 jam per hari. Namun, efisiensi panel fotovoltaik (PV) yang dipasang secara statis masih terbatas akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari sehingga hanya menghasilkan daya optimal pada waktu tertentu. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini merancang dan menguji sistem solar tracker dual-axis berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) dan dikendalikan menggunakan algoritma fuzzy logic. Sistem dirancang dengan empat sensor LDR sebagai pendeteksi intensitas cahaya, dua motor servo ber-torsi tinggi sebagai aktuator pada sumbu azimuth dan elevasi, serta modul ESP32 yang memproses data secara cerdas menggunakan fuzzy logic untuk menentukan orientasi optimal panel surya. Selain itu, integrasi IoT memungkinkan pemantauan parameter listrik secara real-time melalui aplikasi blynk. Pengujian dilakukan selama tiga hari pada panel monokristalin 30 Wp dengan kondisi irradiance bervariasi. Data yang dikumpulkan meliputi tegangan, arus, daya, energi, efisiensi panel, serta irradiance sebagai parameter pembandingan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya panel meningkat seiring dengan kenaikan irradiance, sedangkan efisiensi cenderung stabil pada kisaran 10–12%. Rata-rata efisiensi panel surya yang menggunakan solar tracker dual-axis tercatat sebesar 11,43%, meningkat lebih dari tiga kali lipat dibandingkan dengan panel statis yang hanya mencapai 2,7%. Meskipun sistem solar tracker memerlukan tambahan energi listrik untuk menggerakkan aktuator, energi tersebut sepenuhnya diperoleh dari panel surya yang disimpan dalam baterai. Dengan demikian, sistem dapat beroperasi secara mandiri, dan peningkatan efisiensi yang dihasilkan jauh melampaui konsumsi energi untuk penggerakannya sehingga tetap menghasilkan surplus energi bersih.

Kata kunci: energi surya, solar tracker, efisiensi panel surya

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/kml1y302>

PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial di Indonesia [1], [2]. Sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia menerima paparan sinar matahari rata-rata selama 10–12 jam per hari dengan intensitas radiasi mencapai 4–5 kWh/m² per hari [3]. Kondisi ini menjadikan energi surya sebagai sumber energi yang melimpah dan berkelanjutan untuk mendukung transisi menuju bauran energi nasional yang lebih hijau. Pemerintah Indonesia melalui RUEN (Rencana Umum Energi Nasional) menargetkan bauran energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, di mana energi surya diproyeksikan menjadi salah satu kontributor utama [4], [5], [6].

Namun, pemanfaatan energi surya masih menghadapi kendala teknis, salah satunya terkait efisiensi panel fotovoltaik (PV). Panel surya yang dipasang secara statis memiliki keterbatasan dalam menangkap cahaya matahari secara optimal karena posisi matahari berubah-ubah sepanjang hari dan sepanjang musim. Akibatnya, panel statis hanya mampu menghasilkan energi maksimal pada waktu tertentu, umumnya pada siang hari ketika matahari berada pada posisi tegak lurus. Kondisi ini mengurangi

potensi pemanfaatan energi surya secara penuh sehingga diperlukan teknologi yang mampu meningkatkan kinerja panel [7], [8], [9].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, para peneliti mengembangkan sistem solar tracker, yaitu mekanisme yang memungkinkan panel bergerak mengikuti pergerakan matahari. Terdapat dua jenis utama solar tracker, yaitu single-axis yang hanya mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat (azimuth), dan dual-axis yang dapat menyesuaikan baik sudut azimuth maupun elevasi sehingga orientasi panel selalu tegak lurus terhadap sinar matahari [10]. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa single-axis tracker mampu meningkatkan energi sekitar 15–25% [11], [12], sedangkan dual-axis tracker dapat meningkatkan efisiensi hingga 30–40% dibandingkan sistem statis [13], [14], [15].

Meskipun demikian, sebagian besar sistem solar tracker yang dikembangkan masih menggunakan metode kontrol konvensional seperti PID (Proportional-Integral-Derivative) atau algoritma berbasis perhitungan astronomis. Metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan. Pemanfaatan Artificial Intelligence (AI) dalam kendali solar tracker masih terbatas, meskipun terdapat beberapa penelitian yang menggunakan fuzzy logic; implementasinya

belum dioptimalkan pada sistem dual-axis berbasis ESP32 yang memiliki kemampuan komputasi tinggi sekaligus konektivitas nirkabel.

Seiring perkembangan teknologi, penggunaan AI dalam sistem solar tracker semakin relevan untuk meningkatkan keandalan dan adaptabilitas. Salah satu metode AI yang banyak digunakan adalah fuzzy logic control, yang dikategorikan sebagai bagian dari computational intelligence [16], [17]. Fuzzy logic mampu meniru cara berpikir manusia dalam pengambilan keputusan berdasarkan aturan linguistik tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Keunggulan ini membuat fuzzy logic lebih sesuai untuk sistem non-linear, seperti pergerakan matahari yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Dengan membaca selisih intensitas cahaya dari sensor, fuzzy logic dapat menghasilkan keputusan cerdas untuk menggerakkan aktuator sehingga panel selalu menghadap ke arah optimal [18].

Berdasarkan kajian penelitian sebelumnya, dapat diidentifikasi adanya kesenjangan penelitian. Implementasi solar tracker masih banyak terbatas pada sistem single-axis maupun dual-axis dengan kendali konvensional, yang kurang adaptif terhadap kondisi dinamis. Integrasi sistem kendali berbasis AI, khususnya fuzzy logic, dengan dukungan IoT untuk pemantauan real-time masih jarang dilakukan. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengkombinasikan dual-axis solar tracker berbasis ESP32 dengan algoritma fuzzy logic dan monitoring IoT masih sangat terbatas.

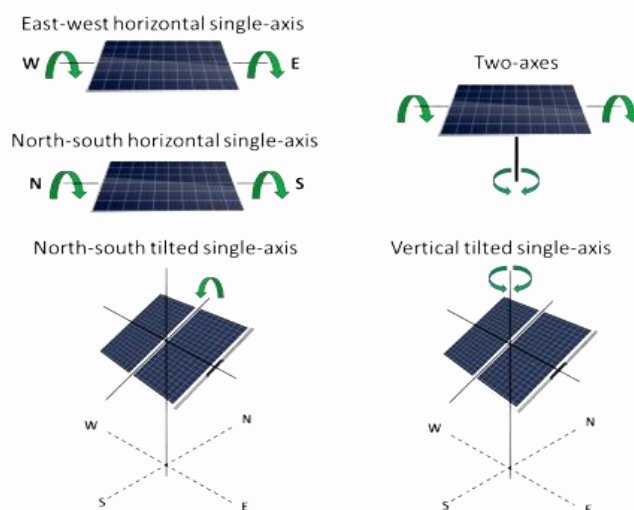
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sistem AI-based dual-axis solar tracker berbasis ESP32 dengan integrasi IoT. Sistem ini menggunakan sensor Light Dependent Resistor (LDR) untuk mendeteksi

intensitas cahaya, dua motor servo untuk menggerakkan panel pada sumbu azimuth dan elevasi, serta algoritma fuzzy logic untuk menentukan posisi optimal panel. Data performa berupa tegangan, arus, daya, energi, dan efisiensi dipantau secara real-time melalui platform IoT.

METODOLOGI

Solar tracker

Solar tracker adalah sistem mekanis dan elektronik yang berfungsi menggerakkan panel surya agar selalu menghadap ke arah sinar matahari sehingga energi listrik yang dihasilkan lebih maksimal dibanding panel statis. Solar tracker dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis pergerakan, derajat kebebasan, dan metode kontrol. Berdasarkan jenis pergerakannya, tracker surya terbagi menjadi pasif dan aktif, di mana tracker pasif bekerja dengan memanfaatkan perbedaan densitas akibat perubahan suhu tanpa memerlukan komponen elektronik, seperti yang telah diproduksi secara komersial oleh Zomeworks Corporation sejak 1969, namun kelemahannya sangat bergantung pada kondisi cuaca sehingga kurang efisien. Sebaliknya, tracker aktif kini lebih banyak digunakan karena mengandalkan motor, roda gigi, dan perangkat kontrol untuk menggerakkan struktur secara lebih andal. Dari sisi derajat kebebasan, tracker surya terbagi menjadi single-axis (satu sumbu) dan dual-axis (dua sumbu), yang masing-masing dapat dikonfigurasi dalam berbagai bentuk, seperti single-axis horizontal timur-barat, single-axis vertikal dengan kemiringan sesuai lintang, single-axis horizontal utara-selatan, single-axis miring utara-selatan dengan kemiringan sesuai lintang, serta dual-axis [19].

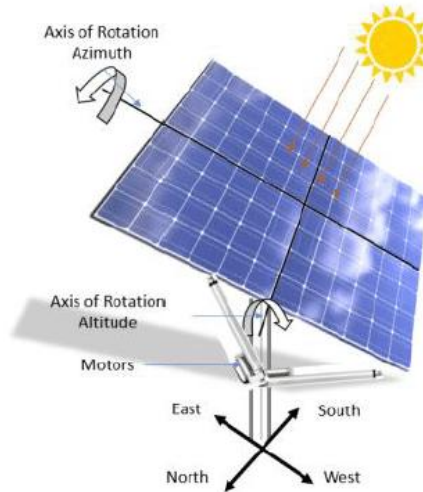


Gambar 1. Skema dari jenis-jenis utama solar tracker [19]

Solar tracker dual axis

Solar tracker dual axis adalah sistem pelacak matahari yang dapat bergerak pada dua sumbu, yaitu timur–barat (azimuth) dan utara–selatan (elevasi), sehingga panel surya selalu tegak lurus terhadap arah datangnya

sinar matahari sepanjang hari dan sepanjang tahun. Dengan dua derajat kebebasan ini, sistem mampu mengikuti pergerakan matahari secara lebih presisi dibandingkan single-axis tracker yang hanya bergerak pada satu arah.



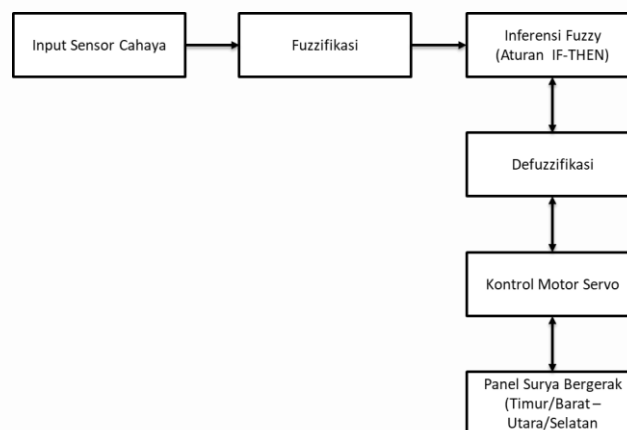
Gambar 2. Solar tracker dual-axis [20]

Algoritma fuzzy logic

Algoritma fuzzy logic sebagai bentuk kecerdasan buatan (AI) bekerja dengan meniru cara manusia mengambil keputusan pada kondisi yang tidak pasti, ambigu, atau samar. Tidak seperti logika biner konvensional yang hanya mengenal nilai 0 dan 1, fuzzy logic memungkinkan adanya nilai di antaranya (misalnya 0,3; 0,6; 0,9) untuk merepresentasikan tingkat kebenaran suatu kondisi. Algoritma ini umumnya terdiri dari tiga tahapan utama: (1) fuzzifikasi, yaitu mengubah input numerik menjadi himpunan fuzzy berupa variabel linguistik (misalnya suhu → dingin, hangat, panas); (2) inferensi, yaitu proses pengambilan keputusan berdasarkan aturan IF-

THEN yang menghubungkan input fuzzy dengan output; dan (3) defuzzifikasi, yaitu mengubah hasil fuzzy kembali ke bentuk numerik yang dapat digunakan sebagai output sistem.

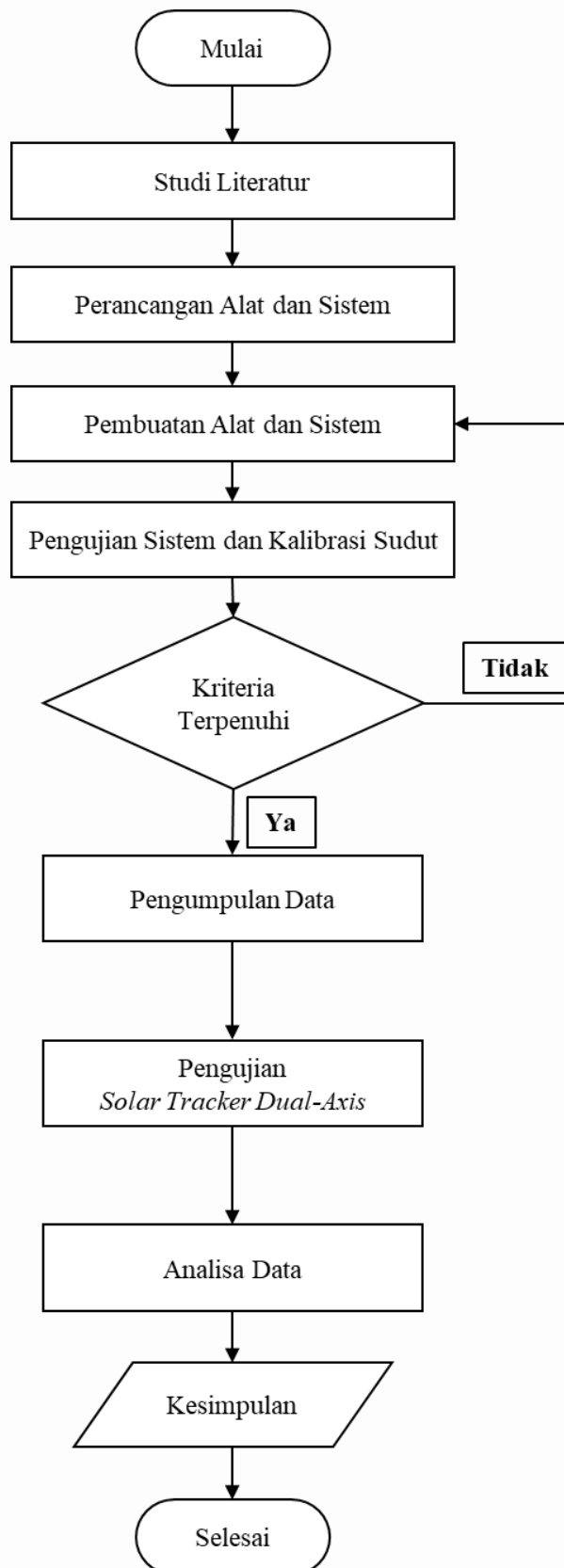
Sebagai bagian dari AI, algoritma fuzzy logic banyak digunakan pada sistem kontrol cerdas karena kemampuannya beradaptasi dengan data yang dinamis tanpa memerlukan model matematis yang rumit. Contoh penerapannya antara lain pada sistem pendingin ruangan (AC), mesin cuci, kendaraan otonom, hingga solar tracker dual axis, di mana fuzzy logic digunakan untuk mengatur posisi panel agar selalu menghadap arah dengan intensitas cahaya maksimum.



Gambar 3. Algoritma Fuzzy Logic pada Solar Tracker

DIAGRAM ALIR

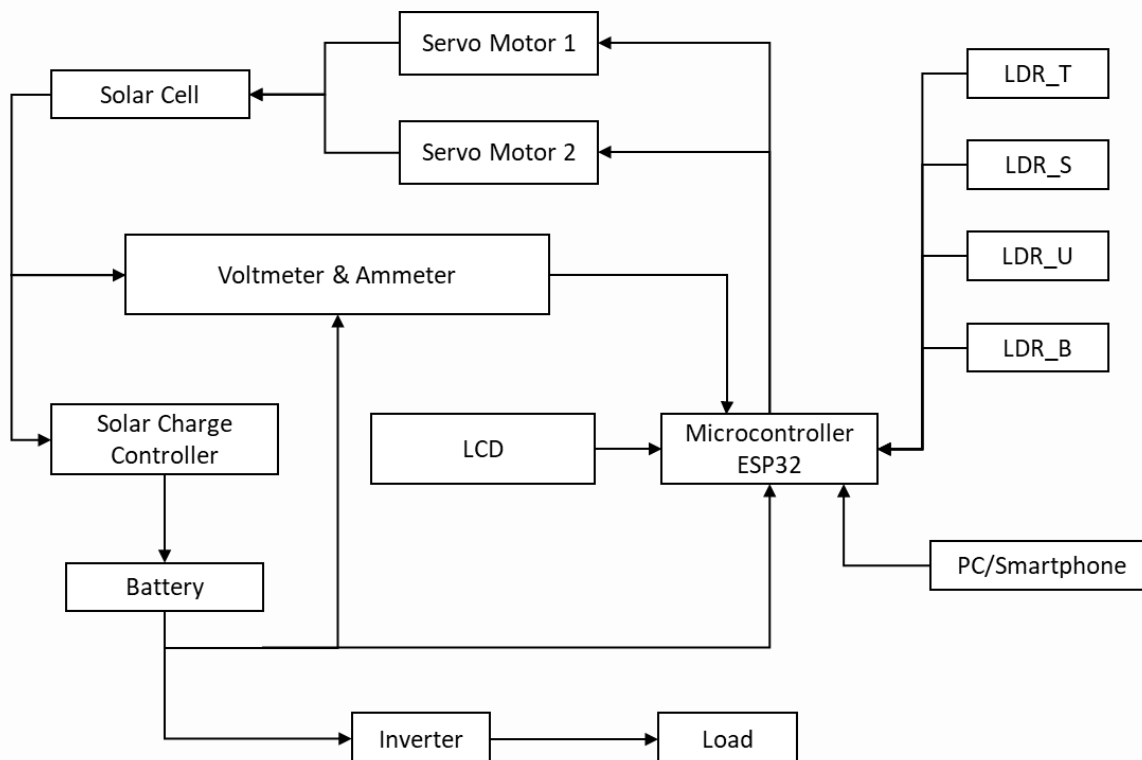
Tahapan penelitian terdiri dari perancangan sistem, perakitan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi IoT, dan pengujian kinerja.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

Perancangan Sistem

Perancangan sistem dimulai dengan menyusun blok diagram yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:



Gambar 5. Blok diagram sistem AI-based dual-axis solar tracker berbasis ESP32

Diagram blok pada Gambar 5. Merepresentasikan rancangan sistem dual-axis solar tracker berbasis kecerdasan buatan (AI) dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Sumber energi utama berasal dari modul fotovoltaik monokristalin berkapasitas 30 Wp yang berfungsi sebagai objek penelitian. Sistem deteksi radiasi matahari dilakukan melalui empat sensor Light-Dependent Resistor (LDR) yang ditempatkan dalam konfigurasi kuadran (utara, selatan, timur, dan barat) untuk memperoleh perbedaan intensitas cahaya dari berbagai arah. Data hasil akuisisi sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan algoritma fuzzy logic control, yang termasuk dalam kategori kecerdasan buatan, guna menghasilkan keputusan kendali yang adaptif. Perintah kendali tersebut diteruskan ke dua aktuator berupa motor servo torsi tinggi, masing-masing

bertugas menggerakkan modul fotovoltaik pada sumbu azimuth (timur–barat) dan sumbu elevasi (utara–selatan), sehingga orientasi panel selalu tegak lurus terhadap arah datangnya radiasi matahari. Untuk pemantauan parameter listrik, sistem dilengkapi dengan voltmeter–ammeter digital serta LCD display yang menampilkan informasi secara lokal. Energi listrik yang dihasilkan panel dialirkan melalui solar charge controller untuk mengisi baterai 12 V DC, yang selanjutnya dapat digunakan untuk beban melalui inverter. Selain itu, ESP32 memiliki konektivitas nirkabel yang memungkinkan integrasi dengan platform Internet of Things (IoT) Blynk, sehingga kinerja sistem dapat dipantau dan dianalisis secara real-time melalui perangkat smartphone maupun komputer.

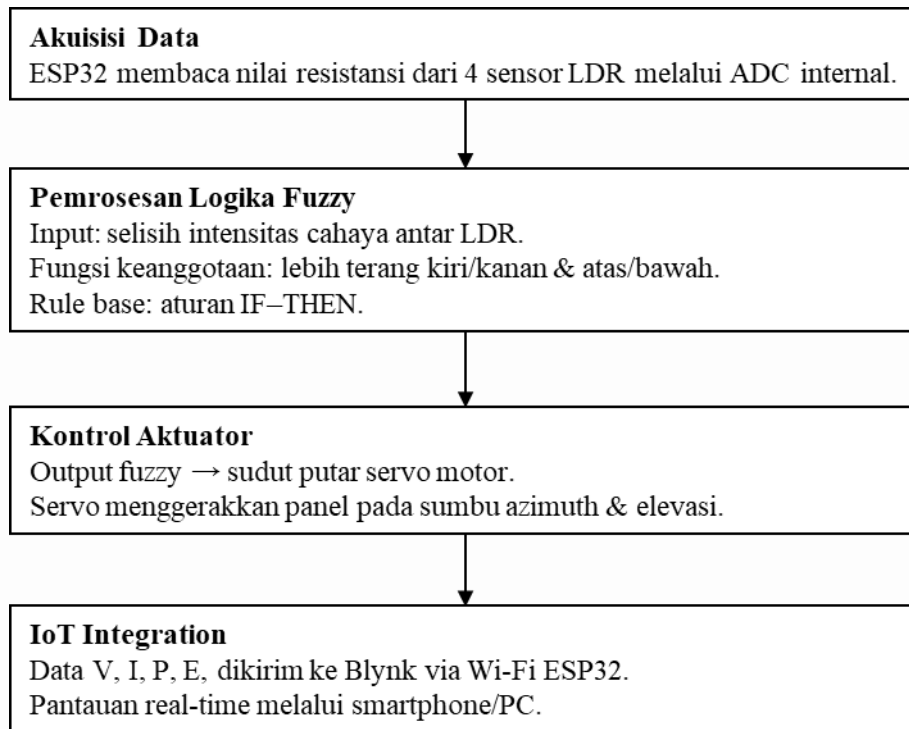
Perangkat Keras (Hardware)

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Keras sistem AI-based dual-axis solar tracker berbasis ESP32

No	Komponen	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	ESP32 dengan dukungan Wi-Fi
2	Panel Surya	Monocrystalline 30 Wp, luas permukaan 0,19 m ²
3	Sensor Cahaya (LDR)	4 unit LDR (5–10 kΩ)
4	Aktuator	2 motor servo high torque (azimuth & elevasi)
5	Rangka Mekanik	Aluminium dengan sistem dudukan dua sumbu
6	Power Supply	Baterai 12 V DC 20Ah + solar charge controller

Perangkat Lunak (Software)

Pengembangan perangkat lunak mencakup pemrograman ESP32 dengan bahasa Arduino IDE yang menggunakan logika fuzzy. Beberapa tahapannya adalah:



Gambar 6. Blok diagram tahapan pemrograman fuzzy logic untuk solar tracker dual-axis

Tahapan pemrograman sistem dual-axis solar tracker berbasis fuzzy logic seperti terlihat pada gambar 6. Proses diawali dengan akuisisi data, di mana mikrokontroler ESP32 membaca nilai resistansi dari empat sensor Light Dependent Resistor (LDR) melalui modul Analog to Digital Converter (ADC) internal sebagai dasar pengendalian. Data tersebut selanjutnya diproses menggunakan logika fuzzy, dengan perbedaan intensitas cahaya antar sensor sebagai input yang dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan untuk kondisi relatif pencahayaan seperti “lebih terang kiri/kanan” dan “lebih terang atas/bawah”, kemudian diturunkan aturan berbasis if-then guna menghasilkan keputusan pengendalian arah panel. Keluaran sistem fuzzy berupa sudut putar servo motor yang menggerakkan panel pada sumbu azimuth dan elevasi sehingga orientasi panel selalu menghadap ke arah intensitas cahaya maksimum. Tahap akhir berupa integrasi Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan konektivitas Wi-Fi pada ESP32, di mana parameter tegangan, arus, daya, energi, serta sudut panel dikirim secara periodik ke platform cloud seperti Thingspeak atau Blynk sehingga kinerja sistem dapat dipantau secara real-time melalui perangkat smartphone maupun komputer untuk mendukung analisis performa dan peningkatan efisiensi energi surya.

Implementasi Algoritma Fuzzy Logic pada ESP32

Implementasi algoritma fuzzy logic pada mikrokontroler ESP32 menghadirkan beberapa tantangan teknis, khususnya terkait kompleksitas komputasi dan keterbatasan sumber daya sistem tertanam. Proses fuzzy logic terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi berbasis aturan (rule base), dan defuzzifikasi, yang masing-masing memerlukan operasi aritmatika floating-point serta evaluasi sejumlah fungsi keanggotaan. Pada sistem dual-axis solar tracker ini, input fuzzy berasal dari selisih intensitas cahaya antar sensor LDR, sehingga jumlah aturan fuzzy harus dirancang secara efisien agar tidak membebani kinerja mikrokontroler.

Meskipun demikian, ESP32 memiliki keunggulan dibandingkan mikrokontroler konvensional seperti Arduino Uno karena dibekali prosesor dual-core 32-bit dengan frekuensi hingga 240 MHz serta dukungan hardware floating-point unit (FPU). Kemampuan ini memungkinkan ESP32 menjalankan algoritma fuzzy logic secara real-time tanpa menyebabkan keterlambatan respons aktuator yang signifikan. Optimalisasi dilakukan dengan membatasi jumlah fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy pada tingkat minimum yang masih mampu merepresentasikan kondisi sistem secara akurat, sehingga kompleksitas

komputasi tetap terkendali dan konsumsi energi sistem dapat diminimalkan.

Integrasi Sistem Kendali dan Internet of Things

Integrasi fuzzy logic dengan ESP32 dan platform IoT juga menimbulkan tantangan tambahan, terutama dalam manajemen waktu proses (timing) dan komunikasi data. Proses pengambilan keputusan fuzzy harus berjalan secara sinkron dengan pembacaan sensor dan pengiriman data ke cloud agar tidak mengganggu kestabilan sistem kendali. Oleh karena itu, sistem dirancang dengan pembagian tugas yang jelas, di mana proses fuzzy logic dijalankan secara periodik dengan interval tertentu, sementara komunikasi IoT dilakukan secara non-blocking menggunakan konektivitas Wi-Fi ESP32. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem tetap responsif terhadap perubahan posisi matahari sekaligus mampu menyediakan data monitoring secara real-time.

Pengujian

Pengujian sistem dilakukan selama tiga hari dengan kondisi cuaca bervariasi mulai dari cerah hingga berawan. Pada penelitian ini digunakan satu buah panel surya yang terintegrasi dengan mekanisme dual-axis solar tracker berbasis logika fuzzy, sehingga panel

dapat bergerak secara otomatis mengikuti arah pergerakan matahari untuk memperoleh intensitas radiasi maksimum. Parameter utama yang diamati meliputi tegangan keluaran panel (V_{pv}), arus keluaran panel (I_{pv}), daya keluaran panel (P_{pv}), energi total harian (E_{pv}), efisiensi panel (η), serta intensitas radiasi matahari (G) yang diukur menggunakan pyranometer yang terhubung langsung ke komputer untuk akuisisi data. Selain itu, dilakukan pula pemantauan terhadap parameter beban yang meliputi tegangan beban (V_{load}), arus beban (I_{load}), daya beban (P_{load}), dan energi beban (E_{load}), dengan tujuan untuk mengevaluasi besarnya energi listrik yang benar-benar digunakan oleh sistem solar tracker dual-axis. Seluruh parameter listrik dikoleksi secara periodik setiap 1 menit melalui mikrokontroler ESP32, kemudian dikirimkan secara real-time ke komputer dan platform Internet of Things (IoT) guna keperluan penyimpanan, visualisasi, serta analisis performa sistem.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem panel surya yang terintegrasi dengan mekanisme dual-axis solar tracker berbasis logika fuzzy [21], [22] [23].

1) Efisiensi Panel Surya

Efisiensi dihitung pada setiap interval waktu 1 Menit

$$\eta = \frac{P_{pv}}{G \times A} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \times FF \quad (2)$$

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{pv} \times I_{pv}}$$

Dimana η adalah efisiensi panel (%), P_{pv} adalah daya panel (W), G adalah intensitas radiasi matahari (W/m^2) dan A adalah luas penampang panel.

2) Persentase Peningkatan Efisiensi

Dihitung terhadap nilai referensi panel surya yang terpasang secara statis dari literatur

$$\eta = \frac{\eta_{tracker} - \eta_{fixed}}{\eta_{fixed}} \times 100\% \quad (2)$$

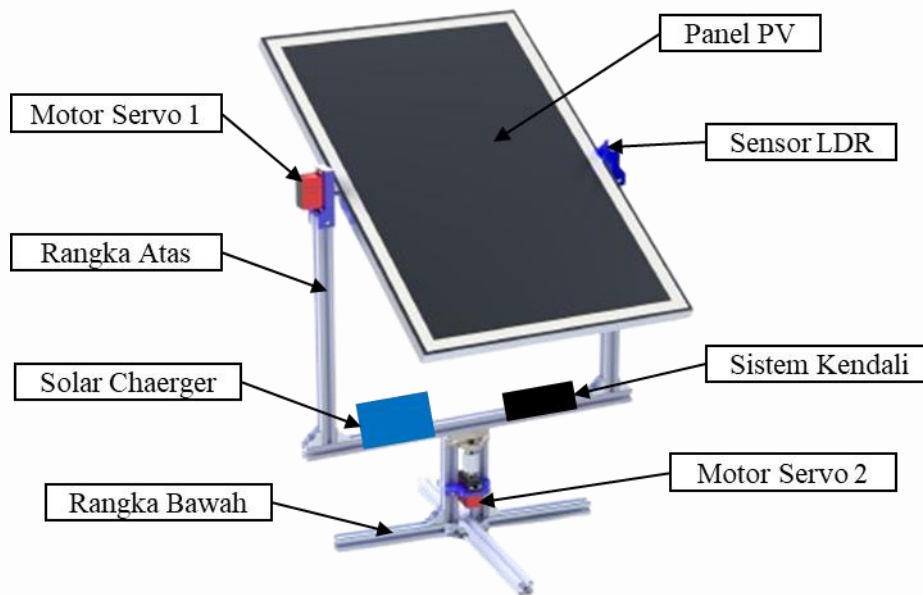
Dimana $\eta_{tracker}$ adalah efisiensi panel yang menggunakan solar tracker dan η_{fixed} adalah panel surya yang terpasang secara statis (fixed).

3) Visualisasi Data

Data yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara:

- Intensitas radiasi matahari (G) terhadap daya panel (P_{pv}).
- Energi panel (E_{pv}) harian terhadap energi beban (E_{load}).
- Perbandingan daya panel (P_{pv}) dan daya beban (P_{load}) sepanjang waktu pengukuran.

Desain sistem solar tracker PV panel



Gambar 7. Desain solar tracker PV panel

HASIL DAN PEMBAHASAN

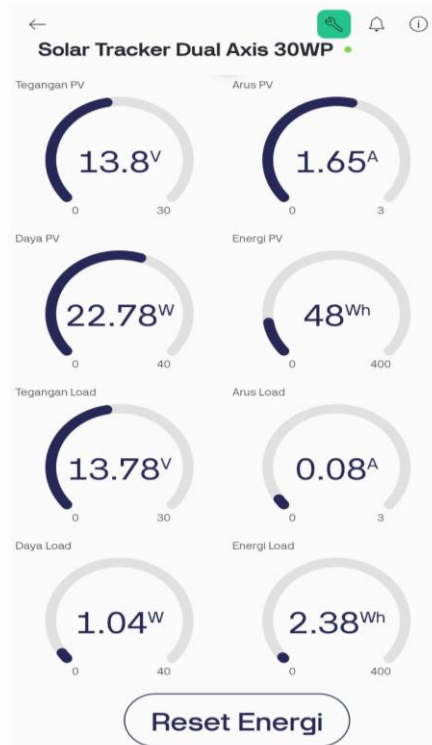
Sistem solar tracker yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, dengan empat sensor LDR (Light-Dependent Resistor) yang ditempatkan pada keempat sisi panel surya untuk mendeteksi intensitas cahaya. Data sensor diolah menggunakan algoritma fuzzy logic yang berfungsi sebagai sistem kecerdasan buatan (AI) dalam menentukan arah pergerakan panel. Dua buah servo

motor torsi tinggi digunakan untuk menggerakkan panel pada sumbu horizontal (azimuth) dan vertikal (elevasi), sehingga sistem berfungsi sebagai dual-axis solar tracker.

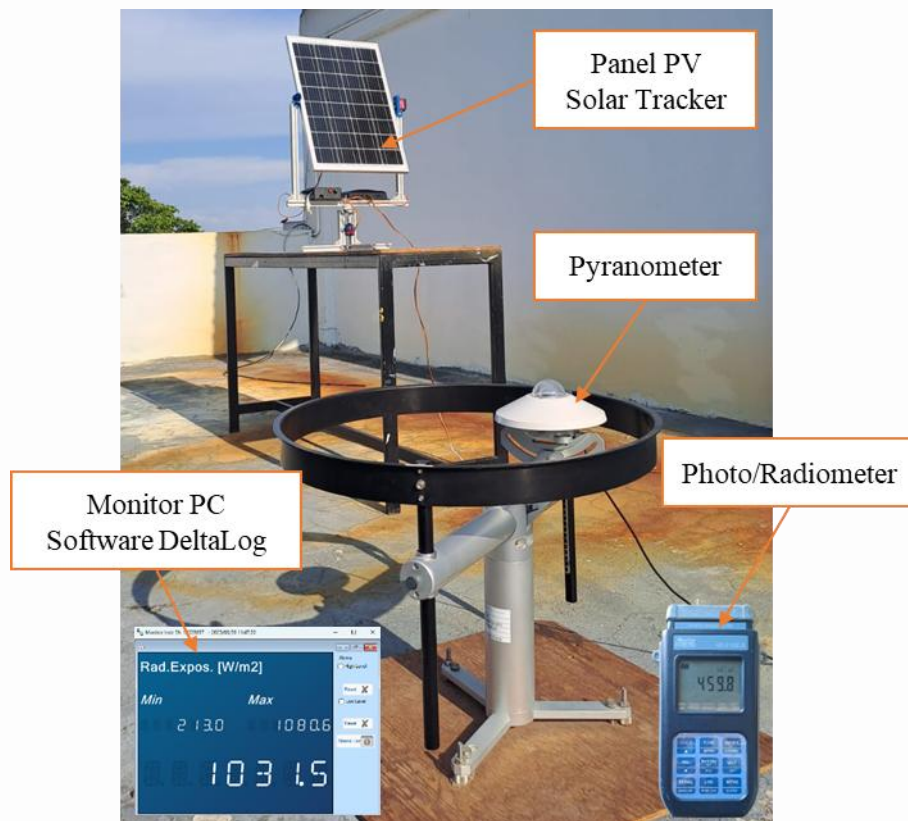
Selain itu, ESP32 dilengkapi dengan modul Wi-Fi yang memungkinkan integrasi dengan platform IoT (Internet of Things). Data real-time seperti intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya panel dikirimkan ke server cloud Blynk sehingga dapat dipantau melalui aplikasi mobile atau dashboard berbasis web.



Gambar 8. Panel surya menggunakan solar tracker dual-axis



Gambar 9. Pemantauan Kinerja Panel Surya Berbasis IoT



Gambar 10. Pemantauan intensitas radiasi matahari menggunakan alat pyranometer

Gambar 9. Merupakan tampilan hasil monitoring sistem **Solar Tracker Dual Axis 30 WP berbasis IoT**, di mana seluruh parameter kinerja panel surya dapat dipantau secara real-time melalui aplikasi. Data yang

ditampilkan meliputi tegangan PV sebesar 13,8 V dan arus PV 1,65 A yang menghasilkan daya 22,78 W dengan akumulasi energi panel 48 Wh, sedangkan pada sisi beban tercatat tegangan 13,78 V dengan arus

0,08 A yang menghasilkan daya 1,04 W dan energi terakumulasi 2,38 Wh. Dari data tersebut terlihat bahwa energi yang dihasilkan panel lebih besar dibandingkan energi yang dikonsumsi oleh beban sehingga sistem berada pada kondisi surplus daya, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk penyimpanan energi dalam baterai. Pemantauan berbasis IoT ini memberikan kemudahan bagi pengguna untuk mengetahui performa panel surya, efisiensi pemanfaatan energi, serta kestabilan daya yang disuplai ke beban tanpa perlu melakukan pengukuran manual di lapangan.

Pada pengujian ini digunakan alat ukur pyranometer untuk mengukur intensitas radiasi matahari selama proses pengujian berlangsung. Data dari pyranometer berfungsi sebagai acuan pembandingan terhadap hasil pengukuran tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya, sehingga dapat divalidasi bahwa peningkatan kinerja sistem solar tracker benar-benar dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari.

Gambar 10. Menunjukkan alat ukur pyranometer saat pengujian panel surya yang menggunakan solar tracker dual-axis, pyranometer terhubung ke data logger photo/radiometer, lalu hasil pengukuran dikirim ke komputer. Gambar 10. Adalah contoh hasil pengukuran intensitas radiasi matahari menggunakan pyranometer dengan satuan W/m^2 . Nilai minimum radiasi yang tercatat adalah $213,0 W/m^2$ yang biasanya terjadi pada pagi hari atau kondisi mendung, sedangkan nilai maksimum mencapai $1080,6 W/m^2$ yang umumnya terjadi saat siang hari ketika matahari berada pada posisi tertinggi dengan cuaca cerah. Pada saat pengambilan data, nilai radiasi berada pada $1031,5 W/m^2$ yang menunjukkan kondisi radiasi sangat tinggi dan mendekati nilai maksimum.

Ketiga grafik pada Gambar 11. Memperlihatkan hubungan antara daya panel surya (PV) dan daya beban terhadap irradiance selama tiga hari pengujian. Secara umum, daya PV meningkat seiring bertambahnya irradiance, namun terdapat variasi pola pada tiap hari akibat perbedaan kondisi cuaca dan stabilitas irradiance. Pada hari pertama (a), daya PV fluktuatif dengan nilai berkisar 5–20 W, menunjukkan kondisi irradiance yang tidak stabil. Pada hari kedua (b), daya PV lebih konsisten dan mencapai kisaran 15–25 W, menandakan irradiance stabil dibandingkan dengan hari pertama. Sedangkan pada hari ketiga (c), grafik menunjukkan daya PV lebih stabil dan membentuk kurva menyerupai parabola terbalik, mengikuti pola kenaikan dan penurunan irradiance sepanjang hari. Sementara itu, daya beban (daya load) relatif konstan dan jauh lebih kecil daripada daya PV pada ketiga hari, menegaskan bahwa output panel surya yang menggunakan sistem solar tracker dual-axis mampu

mencukupi kebutuhan beban meskipun terdapat variasi irradiance.

Gambar 12. Memperlihatkan grafik akumulasi energi panel surya (Energi PV) dan energi beban (Energi Load) terhadap waktu selama tiga hari pengujian. Secara keseluruhan, energi PV menunjukkan tren peningkatan linier seiring berjalannya waktu, menandakan panel surya secara konsisten menghasilkan energi sesuai dengan intensitas radiasi matahari harian. Pada hari pertama (a), energi PV mencapai sekitar 75 Wh, sedangkan pada hari kedua (b) dan hari ketiga (c) akumulasi energi lebih tinggi, mendekati 150 Wh, yang mengindikasikan kondisi pencahayaan lebih optimal dibanding hari pertama. Sementara itu, energi load relatif konstan dan jauh lebih kecil dari energi PV pada semua hari pengujian, menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan panel surya mencukupi kebutuhan beban sekaligus menghasilkan surplus energi.

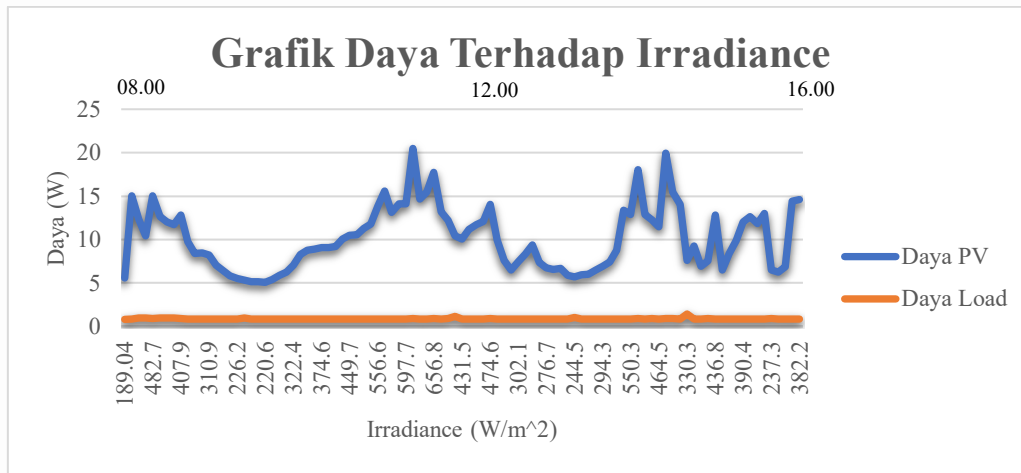
Gambar 12. Menunjukkan hubungan antara irradiance terhadap efisiensi panel surya selama tiga hari pengujian. Secara umum, grafik memperlihatkan bahwa efisiensi cenderung menurun pada saat irradiance meningkat, yang dapat dikaitkan dengan kenaikan temperatur sel surya yang menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan berdampak pada turunnya efisiensi. Pada hari pertama (a), efisiensi PV relatif stabil dalam rentang 8–14% meskipun terdapat fluktuasi kecil. Hari kedua (b) memperlihatkan pola yang mirip, namun dengan nilai efisiensi yang sesekali menunjukkan lonjakan tidak wajar, kemungkinan disebabkan oleh gangguan pengukuran atau noise sensor. Pada hari ketiga (c), tren efisiensi lebih konsisten dengan kecenderungan menurun di irradiance tinggi dan kembali naik di irradiance rendah. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa efisiensi panel surya sangat dipengaruhi oleh variabilitas iradiasi dan temperatur.

Tabel 2. Menunjukkan bahwa peningkatan irradiance berpengaruh langsung terhadap kenaikan arus dan daya keluaran panel surya, sementara tegangan relatif stabil pada kisaran 13,3–13,5 V. Pada hari pertama dengan irradiance rata-rata $389,74 W/m^2$, panel hanya menghasilkan daya 10,11 W dengan efisiensi 10,51%. Pada hari kedua ketika irradiance meningkat menjadi $708,41 W/m^2$, daya naik secara signifikan menjadi 20,30 W dengan efisiensi 11,95%. Selanjutnya, pada hari ketiga dengan irradiance $773,33 W/m^2$, daya mencapai 21,88 W dengan efisiensi 11,83%. Jika dirata-ratakan, nilai irradiance sebesar $623,83 W/m^2$ menghasilkan tegangan 13,42 V, arus 1,29 A, daya 17,43 W, dan efisiensi 11,43%.

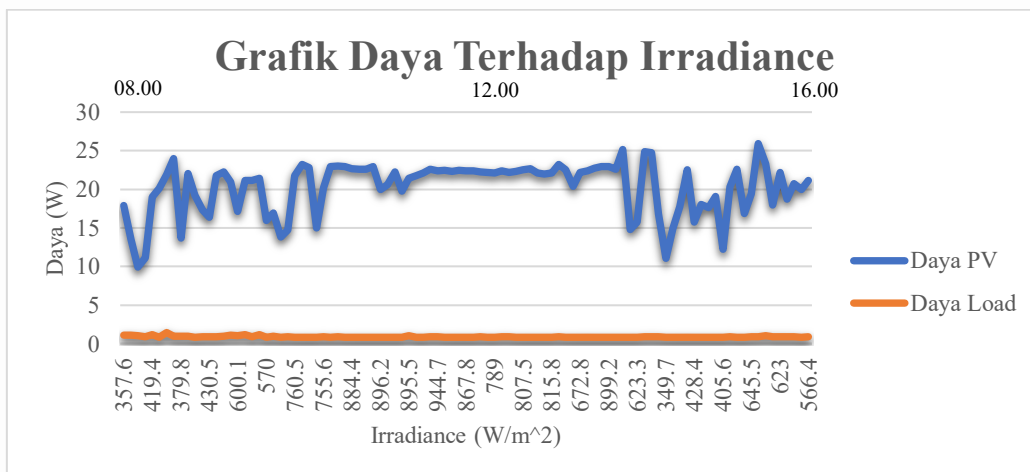
Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata efisiensi panel surya dengan solar tracker dual-axis adalah sebesar 11,43%, sedangkan panel surya yang terpasang secara statis hanya mencapai 2,7% [24]. Hal ini

menunjukkan adanya peningkatan efisiensi yang sangat signifikan. Dengan kata lain, penggunaan solar tracker dual-axis mampu meningkatkan efisiensi lebih dari tiga kali lipat dibandingkan sistem statis.

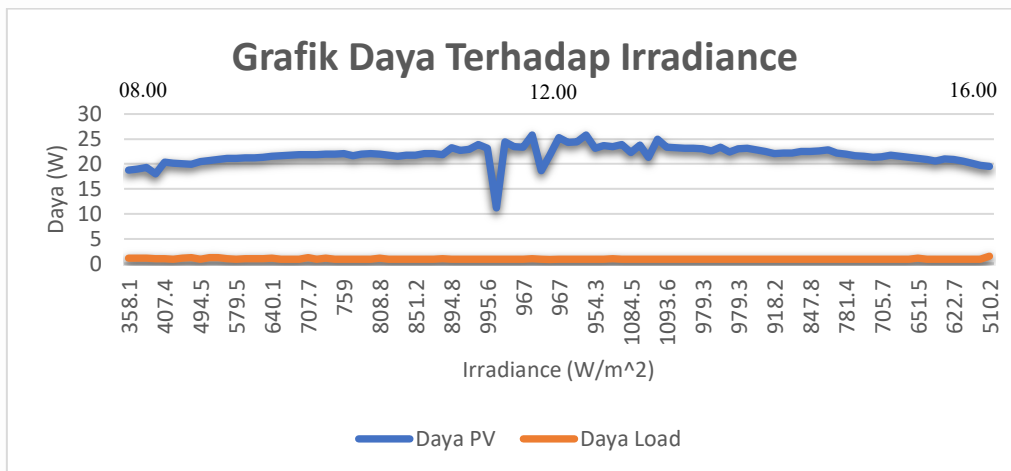
Peningkatan ini terjadi karena solar tracker mampu mengoptimalkan sudut datang sinar matahari secara dinamis sepanjang hari, sehingga intensitas radiasi yang diterima panel lebih maksimal.



(a)

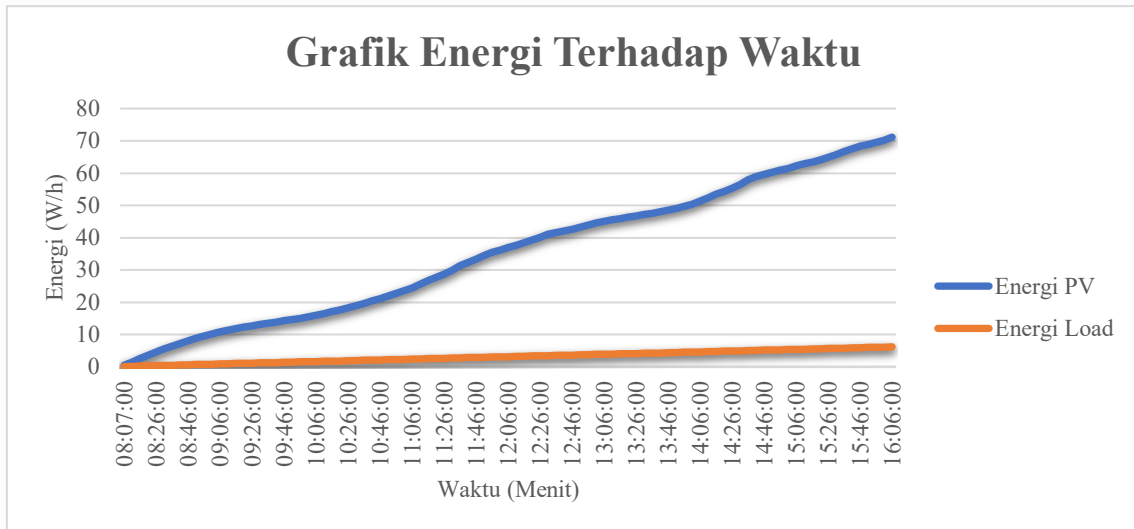


(b)

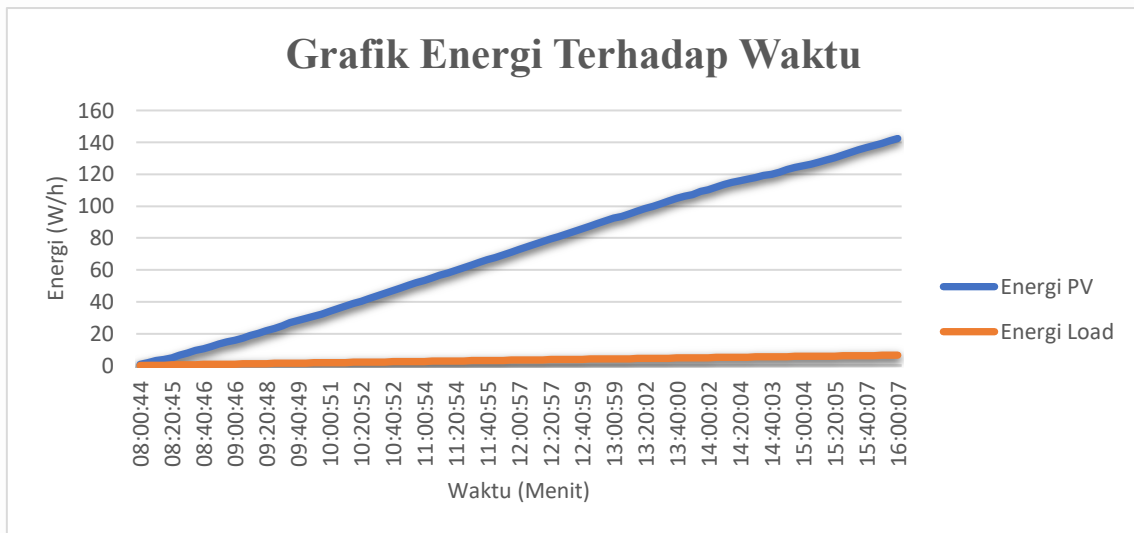


(c)

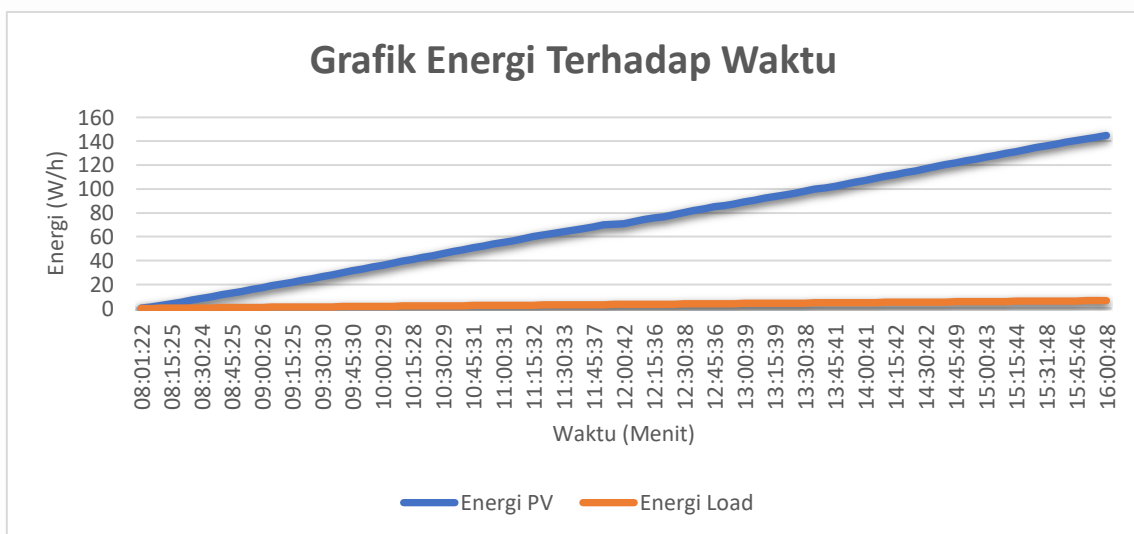
Gambar 11. Grafik hubungan antara daya terhadap irradiance (a) hari ke-1 (b) hari ke-2 (c) hari ke-3



(a)

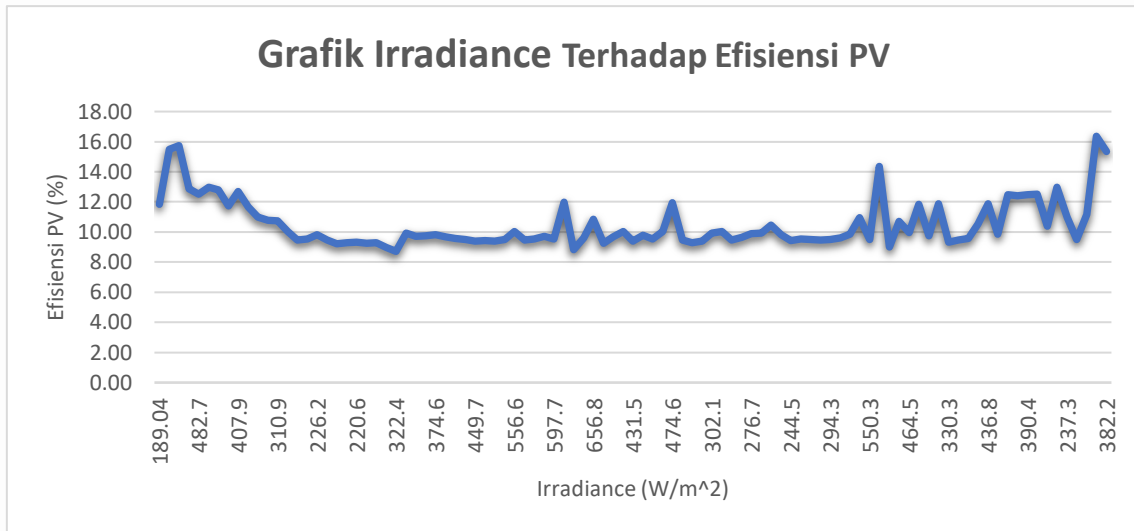


(b)

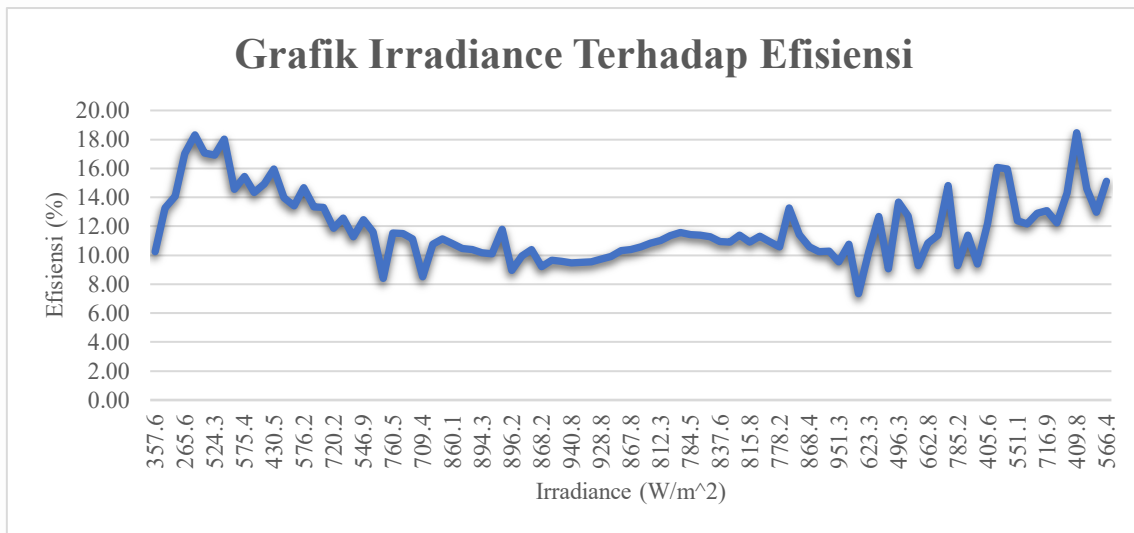


(c)

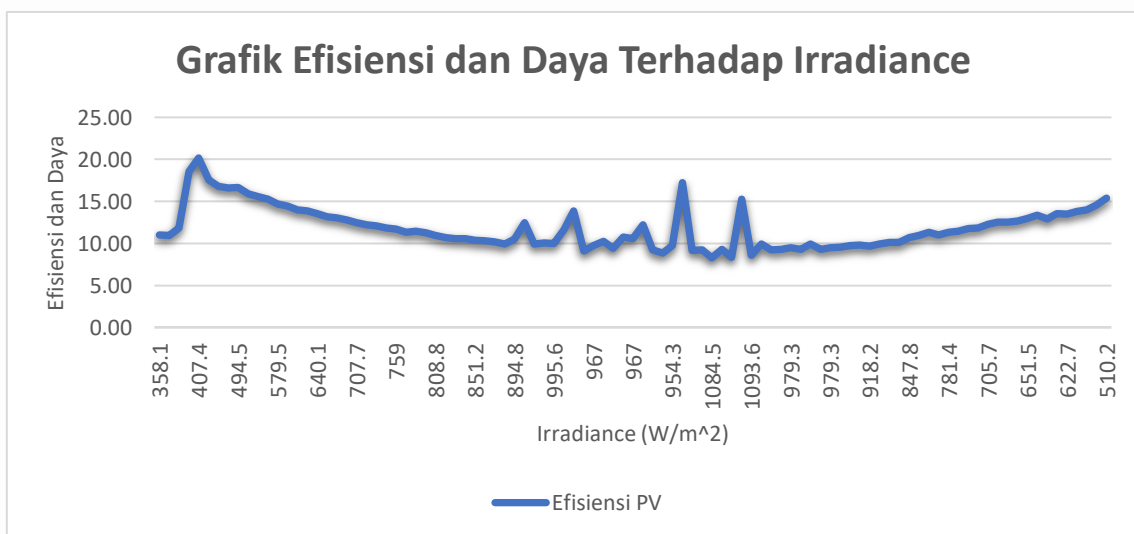
Gambar 12. Grafik hubungan antara energi terhadap waktu (a) hari ke-1 (b) hari ke-2 (c) hari ke-3



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Grafik hubungan antara efisiensi terhadap irradiance (a) hari ke-1 (b) hari ke-2 (c) hari ke-3

Tabel 2. Nilai rata-rata irradiance, tegangan, arus, daya dan efisiensi panel surya

	Irradiance (W/m ²)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Efisiensi (%)
Hari ke-1 24/08/2025	389,74	13,32	0,76	10,11	10,51
Hari ke-2 25/08/2025	708,41	13,46	1,50	20,30	11,95
Hari ke-3 26/08/2025	773,33	13,47	1,61	21,88	11,83

Analisis Kinerja Sistem Fuzzy Logic dibanding Metode Konvensional

Dibandingkan metode kendali konvensional seperti PID atau perhitungan posisi matahari berbasis model astronomis, fuzzy logic memiliki beberapa keunggulan utama. Metode PID memerlukan proses tuning parameter yang sensitif terhadap perubahan lingkungan, sedangkan algoritma astronomis bergantung pada data waktu, lokasi geografis, dan asumsi kondisi cuaca ideal. Pada kondisi nyata, seperti cuaca berawan, perubahan intensitas cahaya yang cepat dapat menyebabkan metode konvensional kurang responsif.

Sebaliknya, fuzzy logic bersifat model-free dan tidak memerlukan representasi matematis sistem yang presisi. Algoritma ini mampu menangani ketidakpastian dan nonlinieritas lingkungan dengan menggunakan aturan linguistik berbasis IF-THEN yang menyerupai cara berpikir manusia. Dengan memanfaatkan perbedaan intensitas cahaya antarsensor LDR secara langsung, sistem fuzzy logic dapat beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi cuaca dan sudut datang sinar matahari. Hal ini menjadikan fuzzy logic lebih fleksibel dan robust untuk aplikasi solar tracker dual-axis berbasis ESP32, terutama pada sistem skala kecil hingga menengah yang beroperasi di lingkungan tropis dengan variabilitas cuaca tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan solar tracker dual-axis berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan IoT dan dikendalikan menggunakan algoritma fuzzy logic mampu meningkatkan kinerja panel surya secara signifikan dibandingkan dengan panel surya statis. Meskipun sistem solar tracker dual-axis memerlukan tambahan energi listrik untuk pengoperasiannya, peningkatan efisiensi yang dicapai jauh lebih besar sehingga mampu menutupi kebutuhan energi tersebut dan memberikan keuntungan bersih terhadap performa keseluruhan sistem fotovoltaik.

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa penerapan solar tracker dual-axis berbasis ESP32 dengan integrasi IoT dan algoritma fuzzy logic terbukti mampu meningkatkan kinerja panel surya secara signifikan dibandingkan sistem statis. Rata-rata efisiensi panel surya yang menggunakan solar tracker mencapai 11,43%, meningkat lebih dari tiga kali lipat dibandingkan panel statis yang hanya mencapai 2,7%. Walaupun sistem ini membutuhkan suplai energi tambahan untuk menggerakkan aktuator dan pengendali, peningkatan efisiensi yang dihasilkan jauh melampaui konsumsi energi tersebut, sehingga memberikan keuntungan bersih terhadap performa sistem secara keseluruhan. Hasil ini menegaskan bahwa implementasi solar tracker dual-axis merupakan solusi yang efektif dan berpotensi besar dalam optimalisasi konversi energi surya menuju sistem energi berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Riau dan Laboratorium Konversi Energi & Mekanika Terapan, Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Riau, yang telah memberikan fasilitas dan dukungan teknis dalam pelaksanaan penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama berkontribusi dalam perancangan metodologi penelitian, pengembangan perangkat keras, pengambilan data, analisis hasil, serta penulisan naskah. Penulis kedua berperan dalam pengolahan data, pembuatan gambar, penyusunan bagian literatur, serta peninjauan naskah. Penulis ketiga berkontribusi dalam supervisi, penyusunan konsep penelitian, validasi hasil, serta perbaikan naskah akhir. Semua penulis telah membaca dan menyetujui naskah ini untuk dipublikasikan.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan dana pribadi penulis

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. M. D. Eka Saputra, M. T. N. Ramadhan, A. Maulida, B. Santoso, and I. Basri, "Design a Smart Solar Tracker to Increase Energy Output Power Generated in Solar Home System," *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 53–62, Mar. 2024, doi: 10.46574/motivection.v6i1.286.
- [2] A. Prasetyo, J. Rahman, E. Elfiano, S. A. Saragih, and S. Lazrisyah, "Integration of Solar Energy Technology in Improving Energy Sustainability and Efficiency in the Fisheries Sector (Case Study of Rokan Hilir Regency, Riau Province)," *International Journal of Regional Innovation*, vol. 3, no. 3, Aug. 2023, doi: 10.52000/ijori.v3i3.85.
- [3] M. Efendi, R. I. Mainil, and A. Aziz, "Comparison of the Efficiency of Solar PV Fixed, Single-Axis, and Dual-Axis Solar Trackers: A Review," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, pp. 84–93, Jan. 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.1.9.
- [4] Muhammad Rausyan Fikry and Irwan Triadi, "Evolusi Regulasi Energi Baru Terbarukan: Analisis Perubahan Orientasi Aturan PLTS Atap," *Birokrasi: JURNAL ILMU HUKUM DAN TATA NEGARA*, vol. 2, no. 2, pp. 364–373, Jun. 2024, doi: 10.55606/birokrasi.v2i2.1292.
- [5] "Artikel+PPIruen3".
- [6] Riyanti, Djalante, Joni. Jupesta, and Edvin. Aldrian, *Climate change research, policy and actions in Indonesia : science, adaptation and mitigation*. Springer, 2021.
- [7] I. Nugrahanto *et al.*, "SOLAR CELL OTOMATIS DENGAN PENGATURAN DUAL AXIS TRACKING SYSTEM MENGGUNAKAN ARDUINO UNO 1)," vol. 10, no. 1, pp. 11–16, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.umt.ac.id/index.php/jt/index>
- [8] A. R. Amelia, Y. M. Irwan, I. Safwati, W. Z. Leow, M. H. Mat, and M. S. A. Rahim, "Technologies of solar tracking systems: A review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/767/1/012052.
- [9] R. Aprylianto Susilo *et al.*, "SOLAR TRACKER BERBASIS ARDUINO UNO," vol. 9, no. 1, pp. 66–69, 2023.
- [10] K. A. Nugraha, A. U. Krismanto, and Y. I. Nakhoda, "Rancang Bangun Solar Tracker Dual Axis Menggunakan Fuzzy Based Untuk Optimasi PLTS Skala Kecil," *Seminar Nasional Fortei Regional*, vol. 7.
- [11] Y. Zhu, J. Liu, and X. Yang, "Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection," *Appl Energy*, vol. 264, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114647.
- [12] N. Kutybay *et al.*, "Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13195226.
- [13] D. Haryanto Sinaga Prodi Teknik Elektro, H. P. Bernando Tambunan PLN Puslitbang Jakarta, A. Sinuraya, O. Yosefa Hutajulu Prodi Teknik Elektro, M. Aulia Rahman Sembiring, and T. Afrian, "Dampak Penggunaan Dual Axis Solar Trackers terhadap Efisiensi Fotovoltaik The Impact of Using Dual Axis Solar Trackers on Photovoltaic Efficiency," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 225.
- [14] A. M. Yusop, M. A. S. Mohd Shabri, N. A. Sulaiman, K. N. Khamil, R. Mohammed, and J. M. Sultan, "Development and Evaluation of Dual Axis Solar Tracking System with IoT Data Monitoring," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 99, no. 1, pp. 28–32, 2023, doi: 10.15199/48.2023.01.05.
- [15] M. N. A. Mohd Said, S. A. Jumaat, and C. R. A. Jawa, "Dual axis solar tracker with iot monitoring system using arduino," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 451–458, Mar. 2020, doi: 10.11591/ijped.v11.i1.pp451-458.
- [16] P. Verma, R. Garg, and P. Mahajan, "Asymmetrical interval type-2 fuzzy logic control based MPPT tuning for PV system under partial shading condition," *ISA Trans*, vol. 100, pp. 251–263, May 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.009.
- [17] G. Dec, G. Drałus, D. Mazur, and B. Kwiatkowski, "Forecasting models of daily energy generation by PV panels using fuzzy logic," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061676.
- [18] T. U. Hassan *et al.*, "A novel algorithm for MPPT of an isolated PV system using push pull converter with fuzzy logic controller," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13154007.
- [19] S. Gutierrez, P. M. Rodrigo, J. Alvarez, A. Acero, and A. Montoya, "Development and testing of a single-axis photovoltaic sun tracker through the internet of things," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 10, May 2020, doi: 10.3390/en13102547.

- [20] M. Elibrahimi, A. Elmouatamid, M. Bakhouya, K. Feddi, and R. Ouladsine, "Performance evaluation of fixed and sun tracking photovoltaic systems," in *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2018. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702932.
- [21] O. R. Alomar, O. M. Ali, B. M. Ali, V. S. Qader, and O. M. Ali, "Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems: An experimental and theoretical study," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103635.
- [22] M. Kamil Rahman, "Analisis Perbandingan Efisiensi Panel Surya 55 Watt dengan Tracking dan Tanpa Tracking," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 3, no. 11, pp. 1395–1411, Nov. 2022, doi: 10.46799/jsa.v3i11.504.
- [23] "STUDI KINERJA PANEL SURYA TIPE 180 WP BERDASARKAN AIR."
- [24] L. NurHidayat, "ANALISIS OUTPUT DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DENGAN KAPASITAS 10WP, 20WP, DAN 30WP," *Jurnal CRANKSHAFT*, vol. 4, no. 2, 2021.