

Optimasi Pengisian Baterai Panel Surya Menggunakan Sistem Solar Tracker Berbasis Logika Fuzzy

Wahyu Tri Wahono¹, Dinda Ayu Permatasari², Dimas Rossiawan Hendra Putra³, Anindya Dwi Risdhayanti⁴
e-mail: wahyu_tri@polinema.ac.id, dinda_ayu@polinema.ac.id, dimas.rossi@polinema.ac.id,
risdhayanti@polinema.ac.id

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 5 September 2025
 Direvisi 20 September 2025
 Diterbitkan 30 September 2025

Kata kunci:

Solar tracker
 logika fuzzy
 ESP32

ABSTRAK

Penggunaan panel surya secara statis tidak mampu mengikuti pergerakan matahari sehingga menurunkan efisiensi serapan energi sepanjang hari. Untuk mengatasi hal ini, pada penelitian ini dikembangkan sistem solar tracker satu sumbu berbasis logika fuzzy yang mampu mengatur arah panel secara otomatis mengikuti arah datangnya cahaya matahari. Sistem terdiri dari dua sensor DFRobot_B_LUX_V30B yang membaca intensitas cahaya kiri dan kanan, dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 Devkit V1, dan mengatur arah aktuator linear melalui driver IBT-2 menggunakan 16 rule fuzzy. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya secara responsif, dan menggerakkan panel secara otomatis sesuai arah matahari. Berdasarkan pengujian di lapangan dengan beban, daya rata-rata dari panel dengan sistem solar tracker mencapai 56.06W, sedangkan pada sistem statis hanya mencapai 39.45W. Ini menunjukkan bahwa sistem solar tracker berbasis logika fuzzy mampu meningkatkan efisiensi pengisian baterai panel surya sebesar 44% dibandingkan dengan sistem panel surya statis.

ABSTRACT

Keywords:

Solar tracker
 Fuzzy logic
 ESP32
 Pengisian Baterai
 Panel surya

The use of solar panels in a static manner is unable to follow the movement of the sun, thus reducing the efficiency of energy absorption throughout the day. To overcome this, this research developed a fuzzy logic-based one-axis solar tracker system that is able to adjust the direction of the panel automatically following the direction of sunlight. The system consists of two DFRobot_B_LUX_V30B sensors that read the left and right light intensity, controlled by the ESP32 Devkit V1 microcontroller, and regulate the direction of the linear actuator through the IBT-2 driver using 16 fuzzy rules. The test results show that the system can detect changes in light intensity responsively, and move the panel automatically according to the direction of the sun. Based on field testing with load, the average power from the panel with the solar tracker system reaches 56.06W, while the static system only reaches 39.45W. This proves that the fuzzy logic-based solar tracker system is able to increase the battery charging efficiency of solar panels by 44% compared to the static solar panel system.

Penulis Korespondensi:

Dinda Ayu Permatasari,
 Jurusan Teknik Elektro,
 Politeknik Negeri Malang,
 Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65141.
 Email: dinda_ayu@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Sistem pelacakan surya telah menunjukkan potensi signifikan untuk penghematan biaya energi jangka panjang dengan meningkatkan efisiensi dan output sistem fotovoltaik (PV). Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa pelacak surya dapat meningkatkan output energi sebesar 25-40% dibandingkan dengan sistem tetap, yang secara langsung diterjemahkan ke dalam penghematan biaya produksi energi [1], [2], [3], [4], [5]. Misalnya, pelacak surya sumbu ganda di Nigeria ditemukan memberikan tambahan 823.150.000 Wh selama masa pakainya dibandingkan dengan sistem tetap, menyebabkan keuntungan energi substansial yang mungkin terjadi dengan teknologi pelacakan [1]. Selain itu, integrasi teknologi Internet of Things (IoT) ke dalam sistem pelacakan surya dapat lebih mengoptimalkan produksi energi dengan menyediakan data real-time dan informasi cuaca, yang meningkatkan kemampuan sistem untuk mempertahankan orientasi panel yang optimal [6]. Kemajuan teknologi ini tidak hanya meningkatkan output energi tetapi juga mengurangi biaya operasional dengan meminimalkan gerakan dan keausan yang tidak perlu pada sistem, sehingga memperpanjang masa pakaiannya [7]. Dalam hal kelayakan ekonomi, sementara investasi awal dalam sistem pelacakan surya bisa tinggi, peningkatan hasil energi dan pengurangan periode pengembalian menjadikannya solusi hemat biaya dalam jangka panjang. Sebagai contoh, sebuah penelitian di Afghanistan menunjukkan bahwa sistem pelacakan surya vertikal sumbu tunggal dapat menghasilkan pendapatan tambahan yang signifikan, dengan periode pengembalian hanya tiga tahun [8]. Selain itu, penggunaan pelacak surya dapat mengurangi jumlah panel yang dibutuhkan, yang, meskipun biaya unit pelacakan tinggi, dapat menyebabkan penghematan biaya secara keseluruhan dalam skenario tertentu [9]. Temuan ini secara kolektif menggarisbawahi potensi sistem pelacakan surya untuk secara signifikan mengurangi biaya energi dari waktu ke waktu, menjadikannya pilihan yang layak untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi ekonomi instalasi tenaga surya.

Karena Indonesia terletak di garis khatulistiwa, energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang sangat potensial. Namun, penggunaan panel surya secara statis menjadi kendala utama karena tidak mampu mengikuti pergerakan matahari, sehingga mengurangi efisiensi konversi energi. Metode Perturb and Observe (P&O) adalah teknik yang banyak digunakan untuk pelacakan titik daya maksimum (MPPT) dalam sistem tenaga surya, tetapi memiliki keterbatasan dalam efisiensi dan stabilitas, terutama di bawah kondisi radiasi matahari yang berubah dengan cepat. Beberapa penelitian telah mengusulkan perbaikan pada metode P&O untuk meningkatkan efisiensi konversi energi matahari. Salah satu pendekatan melibatkan pemendekan interval pengambilan sampel daya keluaran modul PV, yang telah terbukti meningkatkan efisiensi kontrol MPPT rata-rata 17% dengan simulator dan hingga 20% dengan modul PV aktual dibandingkan dengan metode P&O konvensional [10]. Kemajuan ini secara kolektif menyebabkan potensi metode P&O yang ditingkatkan untuk secara signifikan meningkatkan efisiensi konversi energi matahari dengan mengatasi keterbatasan pendekatan konvensional.

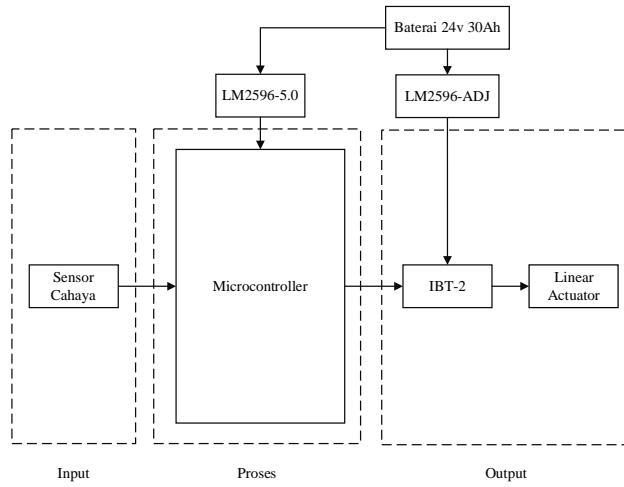
Sistem logika fuzzy secara signifikan meningkatkan efisiensi pengisian baterai panel surya ketika terintegrasi dengan sistem pelacak surya dengan mengoptimalkan penyelarasian panel fotovoltaik (PV) dengan matahari dan meningkatkan manajemen daya sistem. Penggunaan logika fuzzy dalam sistem pelacakan surya sumbu ganda memungkinkan penyesuaian yang tepat dari orientasi panel PV, memastikan mereka tetap tegak lurus terhadap sinar matahari sepanjang hari, yang memaksimalkan penangkapan energi matahari. Misalnya, pengontrol logika fuzzy (FLC) yang diimplementasikan dalam sistem pelacak surya sumbu ganda menunjukkan peningkatan 96% dalam efisiensi daya output dibandingkan dengan sistem konvensional, menyebabkan efektivitas pendekatan ini dalam mengoptimalkan penggunaan energi matahari [6]. Selain itu, sistem kontrol logika fuzzy mahir menangani nonlinier dan ketidakpastian lingkungan yang melekat pada sistem PV, seperti variasi suhu dan radiasi matahari, yang sangat penting untuk mempertahankan output daya yang optimal dan pengisian baterai yang efisien [11]. Dengan menggunakan logika fuzzy untuk Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT), sistem ini dapat secara dinamis menyesuaikan diri dengan kondisi yang berubah, memastikan bahwa energi maksimum yang mungkin dipanen dan ditransfer secara efisien ke baterai [12]. Selanjutnya, integrasi logika fuzzy dengan algoritma canggih, seperti optimasi kawanan partikel yang dimodifikasi fuzzy, meningkatkan kinerja sistem pengisian baterai dengan mengoptimalkan parameter kontrol, yang mengarah ke proses pengisian yang lebih cepat dan lebih aman [13]. Kombinasi logika fuzzy dengan pelacak surya tidak hanya meningkatkan efisiensi penangkapan energi tetapi juga memperpanjang siklus hidup baterai dengan menyediakan catu daya yang stabil dan berkelanjutan, sehingga mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan [14], [15], [16]. Kemajuan ini menggarisbawahi potensi sistem logika fuzzy dalam secara signifikan



meningkatkan efisiensi dan keandalan pengisian baterai panel surya ketika digunakan bersama dengan sistem pelacak surya.

2. METODE PENELITIAN

Pembuatan sistem solar tracker satu sumbu yang dikendalikan dengan logika fuzzy bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi matahari. Sistem ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler, dua sensor cahaya DFRobot_B_LUX_V30B untuk membaca intensitas lux dari sisi kiri dan kanan panel, serta aktuator linear sebagai penggerak panel. Driver motor IBT-2 digunakan untuk mengatur arah gerak aktuator berdasarkan sinyal PWM dari mikrokontroler. Untuk menyesuaikan tegangan kerja setiap komponen, digunakan dua rangkaian DC-DC Buck Converter berbasis IC LM2596, yaitu LM2596-5.0 untuk menurunkan tegangan baterai 24 V menjadi 5 V bagi mikrokontroler, dan LM2596-ADJ untuk menghasilkan 12 V sebagai suplai aktuator. Untuk lebih jelasnya, lihat blok diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram

Perancangan sistem pada penelitian ini dilakukan untuk membangun sebuah alat penggerak panel surya otomatis (solar tracker) berbasis mikrokontroler ESP32 Devkit V1. Sistem ini dirancang agar panel surya dapat mengikuti arah datangnya cahaya matahari secara horizontal menggunakan linear aktuator. Perancangan sistem mengacu pada blok diagram yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input, digunakan dua buah sensor cahaya digital DFRobot_B_Lux_V30B yang diposisikan di sisi kiri dan kanan panel surya. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi intensitas cahaya matahari dari dua sisi yang berbeda. Perbedaan intensitas yang diterima oleh kedua sensor akan menjadi acuan bagi sistem dalam menentukan arah pergerakan panel. Output dari DFRobot_B_Lux_V30B adalah nilai digital, kemudian dibaca oleh mikrokontroler.

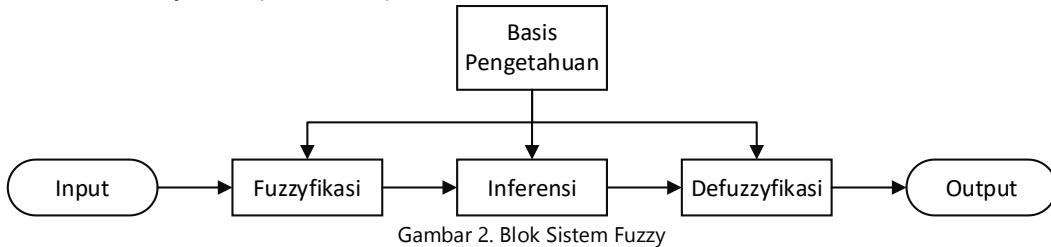
Bagian proses dilakukan oleh mikrokontroler ESP32 Devkit V1 yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Mikrokontroler menerima data intensitas cahaya dari kedua sensor, kemudian memproses data tersebut menggunakan logika fuzzy. Algoritma ini dirancang untuk meniru cara manusia mengambil keputusan berdasarkan data yang tidak pasti atau ambigu, dalam hal ini untuk menentukan arah gerak aktuator berdasarkan perbedaan pencahayaan. Hasil pemrosesan berupa sinyal PWM yang akan digunakan sebagai sinyal kontrol untuk mengatur arah dan kecepatan aktuator. Sinyal PWM dari mikrokontroler kemudian diteruskan ke bagian output, yaitu motor driver BTS7960. Komponen ini berfungsi sebagai penguat sinyal yang mengendalikan pergerakan linear actuator. Linear actuator akan menggerakkan panel surya ke arah kiri atau kanan sesuai dengan sinyal yang diterima dari driver, sehingga posisi panel dapat terus mengikuti arah datangnya cahaya matahari dan meningkatkan efisiensi penyerapan energi.

Sumber daya utama untuk sistem ini berasal dari baterai LiFePO4 bertegangan 24V dengan kapasitas 30Ah. Untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan pada setiap komponen, digunakan dua rangkaian DC-DC Buck Converter menggunakan IC LM2596. LM2596T-5.0 digunakan untuk menurunkan tegangan dari 24V menjadi 5V yang



dibutuhkan oleh mikrokontroler ESP32. Sementara LM2596T-ADJ digunakan untuk menurunkan tegangan dari baterai dari 24V ke 12V agar sesuai dengan kebutuhan operasional motor dan linear actuator melalui driver BTS7960.

Untuk sistem kendali pada alat solar tracker ini digunakan Metode logika fuzzy untuk menangani ketidakpastian dalam pembacaan sensor cahaya dan mengambil keputusan secara lebih fleksibel. Logika fuzzy dipilih karena sistem membutuhkan respons adaptif terhadap perubahan pencahayaan matahari sepanjang hari, bukan kontrol yang bersifat kaku. Melalui metode ini, arah gerak panel ditentukan berdasarkan selisih lux antara sensor kiri dan kanan. Blok sistem Fuzzy ini dapat dilihat pada Gambar 2.

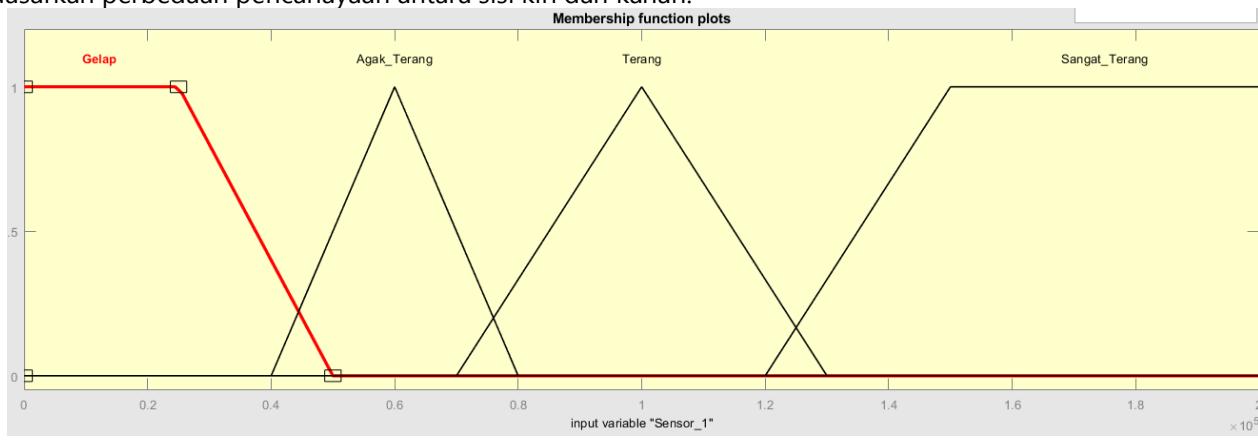


Gambar 2 menunjukkan struktur diagram blok sistem inferensi fuzzy (Fuzzy Inference System/FIS) yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perangkat lunak pengendali solar tracker. Diagram ini terdiri dari lima komponen utama, yaitu: input, fuzzyifikasi, inferensi, defuzzyifikasi, dan output, serta satu elemen penting yaitu basis pengetahuan (knowledge base) yang menopang keseluruhan proses pengambilan keputusan.

Input berasal dari pembacaan intensitas cahaya oleh dua sensor DFRobot_B_LUX_V30B yang dipasang di sisi kiri dan kanan panel surya. Nilai lux yang diperoleh dari masing-masing sensor kemudian dikonversi melalui tahap fuzzyifikasi, yaitu proses mengubah nilai numerik (crisp) menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Pada sistem ini, intensitas cahaya diklasifikasikan ke dalam empat himpunan fuzzy, yaitu: "Gelap", "Agak Terang", "Terang", dan "Sangat Terang".

Nilai hasil fuzzyifikasi selanjutnya diproses dalam tahap inferensi dengan mengacu pada rule base yang merupakan bagian dari basis pengetahuan. Pada tahap ini, sistem menentukan aksi yang harus diambil berdasarkan kombinasi kondisi sensor kiri dan kanan, dengan pendekatan logika manusia dalam menangani data yang tidak pasti atau ambigu. Output dari proses inferensi masih berupa nilai fuzzy, sehingga perlu diubah menjadi nilai numerik (crisp) melalui proses defuzzyifikasi. Hasilnya berupa nilai PWM yang digunakan untuk mengendalikan arah dan kecepatan aktuator linear melalui motor driver IBT-2. Dengan demikian, sistem dapat mengarahkan panel surya secara dinamis mengikuti arah datangnya cahaya matahari sepanjang hari.

Perancangan fungsi keanggotaan fuzzy untuk input sensor DFRobot_B_LUX_V30B ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Fungsi ini membagi nilai lux menjadi empat kategori linguistik, yaitu "Gelap", "Agak Terang", "Terang", dan "Sangat Terang", yang dimodelkan menggunakan fungsi segitiga dan trapesium. Klasifikasi ini digunakan untuk merepresentasikan intensitas cahaya secara adaptif, sehingga sistem dapat mengambil keputusan arah gerak panel berdasarkan perbedaan pencahayaan antara sisi kiri dan kanan.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan input

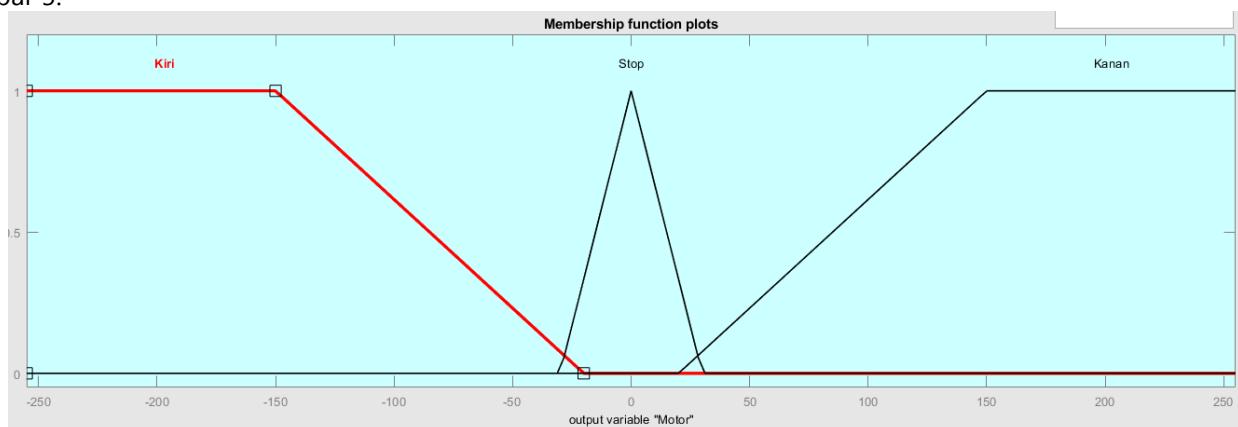


Fungsi keanggotaan digunakan untuk menentukan derajat keanggotaan setiap nilai input dalam rentang variabel linguistik yang telah ditentukan, seperti "Gelap" hingga "Sangat Terang". Nilai-nilai ini kemudian diproses melalui tahapan inferensi fuzzy, yaitu proses seleksi dan pengambilan keputusan berdasarkan kumpulan aturan (rule base) yang telah dirancang. Kombinasi nilai dari kedua sensor akan dicocokkan dengan aturan-aturan tersebut untuk menentukan respons sistem. Skema inferensi rule based lengkap ditunjukkan pada Gambar 4.

1. If (Sensor_1 is Gelap) and (Sensor_2 is Gelap) then (Motor is Stop) (1)
2. If (Sensor_1 is Gelap) and (Sensor_2 is Agak_Terang) then (Motor is Kanan) (1)
3. If (Sensor_1 is Gelap) and (Sensor_2 is Terang) then (Motor is Kanan) (1)
4. If (Sensor_1 is Gelap) and (Sensor_2 is Sangat_Terang) then (Motor is Kanan) (1)
5. If (Sensor_1 is Agak_Terang) and (Sensor_2 is Gelap) then (Motor is Kiri) (1)
6. If (Sensor_1 is Agak_Terang) and (Sensor_2 is Agak_Terang) then (Motor is Stop) (1)
7. If (Sensor_1 is Agak_Terang) and (Sensor_2 is Terang) then (Motor is Kanan) (1)
8. If (Sensor_1 is Agak_Terang) and (Sensor_2 is Sangat_Terang) then (Motor is Kanan) (1)
9. If (Sensor_1 is Terang) and (Sensor_2 is Gelap) then (Motor is Kiri) (1)
10. If (Sensor_1 is Terang) and (Sensor_2 is Agak_Terang) then (Motor is Kiri) (1)
11. If (Sensor_1 is Terang) and (Sensor_2 is Terang) then (Motor is Stop) (1)
12. If (Sensor_1 is Terang) and (Sensor_2 is Sangat_Terang) then (Motor is Kanan) (1)
13. If (Sensor_1 is Sangat_Terang) and (Sensor_2 is Gelap) then (Motor is Kiri) (1)
14. If (Sensor_1 is Sangat_Terang) and (Sensor_2 is Agak_Terang) then (Motor is Kiri) (1)
15. If (Sensor_1 is Sangat_Terang) and (Sensor_2 is Terang) then (Motor is Kiri) (1)
16. If (Sensor_1 is Sangat_Terang) and (Sensor_2 is Sangat_Terang) then (Motor is Stop) (1)

Gambar 4. Inferensi

Inferensi fuzzy merupakan tahapan inti dalam sistem pengambilan keputusan, di mana nilai derajat keanggotaan dari masing-masing input diproses berdasarkan aturan-aturan (rule base) yang telah ditentukan. Proses ini menghasilkan keluaran dalam bentuk nilai fuzzy pada variabel output, yang merepresentasikan tindakan kendali yang harus diambil sistem. Nilai fuzzy tersebut kemudian diproses lebih lanjut melalui tahapan defuzzyifikasi untuk dikonversi menjadi nilai crisp, yang selanjutnya digunakan sebagai sinyal PWM guna mengatur arah dan kecepatan aktuator melalui driver motor. Bentuk fungsi keanggotaan untuk output fuzzy pada sistem ini dapat dilihat pada Gambar 5.

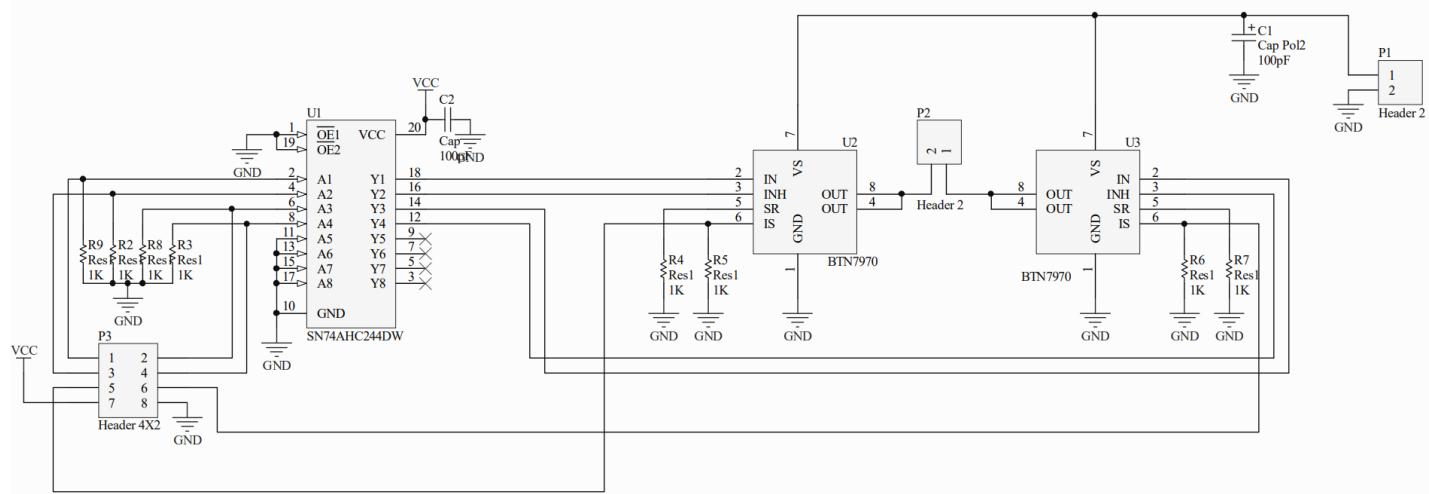


Gambar 5. Fungsi Keanggotaan output

Fungsi keanggotaan keluaran pada Gambar 5 merepresentasikan nilai PWM yang digunakan untuk mengatur arah dan kecepatan aktuator linear pada sistem solar tracker ini. Nilai PWM hasil defuzzyifikasi dikirim oleh mikrokontroler ESP32 ke driver motor IBT-2 pada Gambar 6, yang berbasis IC BTS7960, untuk mengendalikan pergerakan aktuator. Driver ini berfungsi sebagai penguat sinyal, sehingga aktuator dapat bergerak ke kiri atau kanan sesuai dengan hasil keputusan dari sistem fuzzy. Modul IBT-2 bekerja dengan mengatur dua sinyal PWM utama (RPWM dan LPWM) serta dua pin enable (R_EN dan L_EN) untuk mengontrol arah putaran motor DC atau pergerakan



aktuator linear. Perancangan sistem ini tidak menggunakan rangkaian discrete seperti MOSFET atau optocoupler secara terpisah, karena semua elemen tersebut telah terintegrasi dalam modul IBT-2. Gambar 6 menunjukkan rangkaian driver yang digunakan dalam sistem ini.



Gambar 6. Rangkaian IBT-2

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan dari alat Solar Tracker setelah seluruh komponen dirakit dan diintegrasikan. Pengujian ini membandingkan panel surya yang menggunakan sistem pelacakan otomatis dengan panel surya statis dalam kondisi lingkungan nyata selama satu hari penuh, mulai pukul 08.30 hingga 16.00 WIB. Setiap 30 menit dilakukan pengukuran tegangan (V), arus (A), dan daya (W) menggunakan alat ukur digital pada masing-masing panel. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Data Solar Tracker

Waktu	V	A	W
08.30	21.9	3.37	73.80
09.00	21.1	3.26	68.78
09.30	22.0	3.51	77.22
10.00	18.4	2.81	51.70
10.30	12.6	1.81	22.80
11.00	22.1	3.73	82.43
11.30	22.6	3.78	85.42
12.00	22.1	3.75	82.87
12.30	22.3	3.76	83.84
13.00	21.6	3.62	78.19
13.30	21.6	3.53	76.24
14.00	20.2	3.34	67.46
14.30	7.1	1.16	8.23
15.00	14.0	2.32	32.48
15.30	11.0	1.80	19.80
16.00	3.2	0.54	1.72
Daya rata-rata			57.06



Tabel 2 : Data Panel *Statis*

Waktu	V	A	W
08.30	21.5	3.36	72.24
09.00	20.0	3.24	64.80
09.30	22.0	3.59	78.98
10.00	16.8	2.74	46.03
10.30	9.5	1.52	14.44
11.00	18.4	2.95	54.28
11.30	19.6	3.19	62.52
12.00	21.7	3.59	77.90
12.30	21.9	3.62	79.27
13.00	12.2	2.00	24.40
13.30	14.5	2.39	34.65
14.00	7.0	1.28	8.96
14.30	6.9	1.12	7.72
15.00	4.6	0.74	3.40
15.30	2.8	0.46	1.28
16.00	1.7	0.27	0.45
Daya rata-rata			39.45

Berdasarkan tabel "Data Solar Tracker" dan "Data Panel Statis" menunjukkan hasil pengukuran selama satu hari. Secara umum, sistem Solar Tracker menghasilkan daya yang lebih tinggi dibanding panel statis, terutama pada waktu setelah tengah hari, ketika posisi matahari mulai condong ke arah barat. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme pelacakan matahari bekerja dengan baik dalam menjaga orientasi panel tetap tegak lurus terhadap arah datang cahaya matahari. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata daya yang dihasilkan oleh Solar Tracker selama periode pengujian adalah 57.06 Watt, sedangkan panel statis hanya 39.45 Watt. Peningkatan dapat dihitung persentasenya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$A = \left(\frac{57.06 - 39.45}{39.45} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{17.61}{39.45} \right) \times 100$$

$$A = 0.44 \times 100$$

$$A = 44\%$$

Setelah diperoleh data rata-rata daya dari sistem Solar Tracker sebesar 57.06 Watt, langkah selanjutnya adalah memperkirakan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengisi penuh baterai yang digunakan dalam sistem ini. Baterai yang digunakan adalah jenis *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) dengan kapasitas 720 Wh (*watt-hour*). Jika menggunakan daya rata-rata dari Panel statis sebesar 18.25W, maka waktu pengisian seperti perhitungan di bawah ini[10].

$$t = \frac{720Wh}{39.45W} \quad (2)$$

$$t = 18.25$$

Sementara itu, jika menggunakan daya rata-rata dari sistem Solar Tracker sebesar 57.06 W, maka waktu pengisian menjadi lebih singkat seperti perhitungan di bawah ini



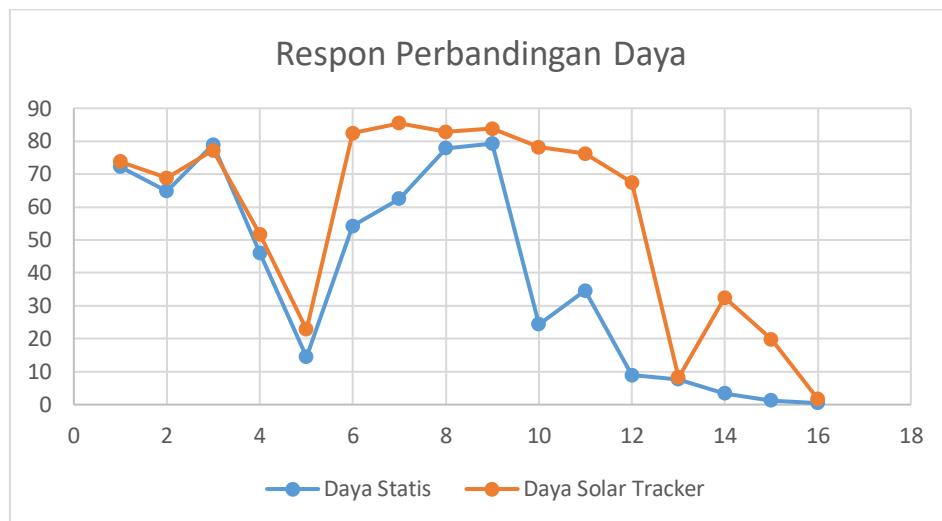
$$t = \frac{720Wh}{57.06W} \quad (3)$$

$$t = 12.61 \text{ Jam}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *Solar Tracker* dapat mempercepat waktu pengisian baterai secara signifikan dibandingkan panel statis dan terjadi pengurangan waktu seperti perhitungan di bawah ini

$$18.25 - 12.61 = 5.64 \text{ Jam} \quad (4)$$

Dengan demikian, penerapan Solar Tracker tidak hanya meningkatkan daya rata-rata sistem secara signifikan, tetapi juga berdampak langsung pada efisiensi sistem dalam hal pengisian energi. Grafik respon perbandingan keluaran daya antara *Solar Tracker* dengan Panel Surya statis dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik Respon Perbandingan Daya

Situasi dan gambar alat saat pengambilan data dapat di lihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Alat Solar Tracker



4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis terhadap pengujian sistem Solar Tracker yang telah dirancang untuk mengatur orientasi panel surya secara otomatis dengan pendekatan logika fuzzy, dapat disimpulkan bahwa sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penyerapan energi matahari secara signifikan. Implementasi logika fuzzy pada sistem kendali terbukti efektif dalam mengarahkan panel surya agar selalu tegak lurus terhadap sumber cahaya, sehingga daya rata-rata yang dihasilkan meningkat sebesar 44% dibandingkan dengan panel surya statis. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan pengambilan keputusan berbasis rule pada logika fuzzy mampu menyesuaikan pergerakan aktuator secara dinamis terhadap kondisi pencahayaan aktual di lapangan.

Selain peningkatan daya, sistem juga memberikan dampak nyata terhadap efisiensi waktu pengisian baterai. Berdasarkan perhitungan teoritis, sistem Solar Tracker dapat mengisi penuh baterai LiFePO₄ berkapasitas 720 Wh dalam waktu sekitar 12,61 jam, sedangkan sistem panel statis membutuhkan waktu 18,25 jam. Dengan demikian, penerapan Solar Tracker berbasis fuzzy logic ini mampu mempercepat proses pengisian energi sebesar 5,64 jam, yang merupakan kontribusi signifikan terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Hasil ini membuktikan bahwa sistem tidak hanya memberikan efisiensi energi, tetapi juga mendukung efektivitas penggunaan energi terbarukan secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. J. Ayamolowo, P. T. Manditereza, and K. Kusakana, "Investigating the Potential of Solar Trackers in Renewable Energy Integration to Grid," vol. 2022, no. 1, p. 12031, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2022/1/012031.
- [2] S. Vikkurty, N. P. Hegde, S. V. Kumar, S. V. N. Ramakanth, and R. Sai, "Enhancing Power Generation Using Efficient Smart Solar Tracker," 2024, pp. 473–480. doi: 10.1007/978-981-99-7137-4_46.
- [3] V. Poulek, "Application of Solar Trackers in Photovoltaic Power Plants," 2025, doi: 10.20944/preprints202508.1746.v1.
- [4] A. Prakash and K. Lal, "Assessing Solar Tracker Effectiveness in Diverse Weather Conditions," *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, doi: 10.22161/ijaers.115.2.
- [5] A. Mishra, P. Gupta, and N. Mehendale, "Sun-Tracking Solar Panel System for improved Energy Collection Efficiency," 2023. doi: 10.2139/ssrn.4513765.
- [6] N. Waldron, S. Smith, and V. Karthik, "Solar Tracking System Utilizing Internet of Things Technologies for Enhanced Power Generation," 2023, doi: 10.1109/icrera59003.2023.10269398.
- [7] D. A. Flores-Hernández, L. R. Islas-Estrada, and S. I. Palomino-Reséndiz, "A Novel Tracking Strategy Based on Real-Time Monitoring to Increase the Lifetime of Dual-Axis Solar Tracking Systems," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 18, p. 8281, 2024, doi: 10.3390/app14188281.
- [8] H. Zaheb, M. Ahmadi, H. Fedayi, and A. Yona, "Maximizing Annual Energy Yield in a Grid-Connected PV Solar Power Plant: Analysis of Seasonal Tilt Angle and Solar Tracking Strategies," *Sustainability*, 2023, doi: 10.3390/su151411053.
- [9] M. A. V. Rad *et al.*, "A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 129, p. 109923, 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.109923.
- [10] C. Huang, K. Itako, T. Mori, and Q. Ge, "Efficiency Improvement of PV Generation System by Using Improved P & O Method of MPPT," 2015.
- [11] M. R. Khan, S. M. A. Motakabber, A. Z. Alam, and S. A. F. Wafa, "Fuzzy Logic and PI Controller for Photovoltaic Panel Battery Charging System," *IJUM Eng. J.*, vol. 23, no. 2, pp. 138–153, 2022, doi: 10.31436/ijumej.v23i2.2385.
- [12] S. Sanim, M. Yesmin, T. Banik, A. Shufian, and R. Islam, "Amplifying Maximum Power Point Tracking in Solar PV Charge Controllers Using Fuzzy Logic," pp. 1–6, 2024, doi: 10.1109/compas60761.2024.10796741.
- [13] I. Abadi, C. Imron, M. M. Bachrowi, and D. N. Fitriyanah, "Design and implementation of battery charging system on solar tracker based stand alone PV using fuzzy modified particle swarm optimization," vol. 8, no. 1, pp. 142–155, 2020, doi: 10.3934/ENERGY.2020.1.142.
- [14] L. Z. Yang, M. A. M. Yunus, S. Sahlan, and A. Jamali, "Automated Dual-axis Solar Tracking System Using Fuzzy Logic Control," 2023, pp. 150–154. doi: 10.1109/icsima59853.2023.10373468.
- [15] F. E. L. Monteagudo, R. V. Varela, A. B. Telles, and C. R. Rivas, "Design and construction of a fuzzy logic solar tracker prototype for the optimization of a photovoltaic system," *J. Eng. Technol. Ind. Appl.*, vol. 9, no. 40, 2023, doi: 10.5935/jetia.v9i40.857.
- [16] H. Sharma, A. Rana, R. P. Singh, B. Goyal, A. Dogra, and D. C. Lepcha, "Improving Efficiency of Panel Using Solar Tracker Controlled Through Fuzzy Logic," 2023, pp. 286–289. doi: 10.1109/icseiet58677.2023.10303639.

