



Implementasi *Fuzzy Logic Controller* dalam Sistem *Solar Tracker Dual Axis* berbasis *Internet of Things* pada PLTS

Anton¹⁾, Muhammad Rival Tri Wendy²⁾, Yulastri³⁾

^{1,2,3)} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang

E-mail: rivaltriwendy@gmail.com

ABSTRAK

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar, namun intensitas cahaya yang diterima panel fotovoltaik dipengaruhi oleh perubahan posisi matahari sepanjang hari. Untuk mengoptimalkan penyerapan energi, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem *solar tracker* dual axis berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) Mamdani. Sistem ini menggunakan empat sensor LDR sebagai pendekripsi arah cahaya, sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya, serta sensor INA219 untuk memantau tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang memproses data dari seluruh sensor dan menggerakkan motor DC melalui driver BTS7960 agar panel selalu menghadap ke arah datangnya cahaya matahari. Data pengukuran ditransmisikan melalui protokol MQTT dan divisualisasikan pada *Node-RED Dashboard*, sehingga sistem dapat dipantau secara *real-time* maupun jarak jauh secara praktis. Hasil implementasi menunjukkan bahwa *solar tracker* dual axis dengan kontrol fuzzy Mamdani mampu mengikuti pergerakan matahari secara efektif. Hal ini dibuktikan pada pengukuran terbaik tanggal 17 Agustus pukul 09.00 dengan tegangan 18,42 V, arus 2,71 A, daya 49,918 W, serta intensitas cahaya 164.000 lux dengan posisi tracker pada sudut elevasi 45° dan azimuth 76°. Integrasi IoT dan *Node-RED* mendukung pemantauan yang efisien, sehingga sistem ini berpotensi meningkatkan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di wilayah tropis seperti Indonesia.

Kata Kunci: Solar Tracker Dual Axis, Fuzzy Logic Controller, IoT, MQTT, Node-RED.

ABSTRACT

Solar energy is one of the most promising renewable energy sources, but the intensity of light received by photovoltaic panels is influenced by the changing position of the sun throughout the day. To optimize energy absorption, this study designs and implements a dual-axis solar tracker system based on the Internet of Things (IoT) using the Mamdani Fuzzy Logic Controller (FLC) method. The system employs four LDR sensors to detect the direction of light, a BH1750 sensor to measure light intensity, and an INA219 sensor to monitor the voltage, current, and power output of the solar panel. An ESP32 microcontroller functions as the main controller that processes data from all sensors and drives DC motors through the BTS7960 driver to ensure the panel always faces the sunlight. Measurement data are transmitted via the MQTT protocol and visualized on the Node-RED Dashboard, allowing practical real-time and remote monitoring. The implementation results show that the dual-axis solar tracker with Mamdani fuzzy control effectively follows the sun's movement. This is demonstrated by the best measurement recorded on August 17 at 09:00 with a voltage of 18.42 V, a current of 2.71 A, a power output of 49.918 W, and a light intensity of 164,000 lux, with the tracker positioned at an elevation angle of 45° and an azimuth of 76°. The integration of IoT and Node-RED supports efficient monitoring, making this system potentially applicable to improve the performance of Solar Power Plants in tropical regions such as Indonesia.

Keyword: Solar Tracker Dual Axis, Fuzzy Logic Controller, IoT, MQTT, Node-RED.

1. Pendahuluan

Di era modern ini, ketika kebutuhan energi terus meningkat dan kekhawatiran terhadap perubahan iklim semakin mendalam energi terbarukan menjadi solusi semakin penting. Salah satu bentuk energi

terbarukan yang mempunyai potensi besar adalah energi surya. Radiasi matahari yang mencapai bumi setiap hari dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik melalui teknologi panel surya [1].

Sekarang ini sudah banyak pemanfaatan *photovoltaic* dalam kehidupan sehari-hari. Energi listrik yang dihasilkan tergantung pada beberapa faktor yaitu bahan pembuat, intensitas cahaya matahari, temperatur dan posisi sel surya terhadap arah datangnya cahaya matahari. Umumnya penampang modul solar cell dipasang menghadap satu arah tertentu. Gerak semu harian matahari menyebabkan matahari mengalami perubahan posisi setiap harinya. Matahari terlihat terbit dari Timur dan tenggelam di Barat, membuat modul solar cell tidak selalu mendapatkan intensitas cahaya yang maksimal sehingga listrik yang dihasilkan juga kurang optimal [2].

Wilayah Indonesia yang merupakan daerah khatulistiwa sangat besar potensinya untuk pembangkit bersumber dari energi matahari, Dimana sinar matahari yang diterima oleh bumi mencapai 1000W/m^2 . Jumlah energi matahari yang dihasilkan perangkat solar panel ditentukan oleh posisi dan kemiringan panel terhadap arah datangnya matahari. Pemasangan panel surya secara permanen tidak akan mendapatkan cahaya matahari maksimal, sehingga energi listrik yang dihasilkan pun tidak maksimal [3]. Agar dapat menyerap energi matahari secara maksimal, solar panel sangat bergantung pada orientasi dan sudut kemiringannya terhadap posisi matahari, maka diperlukan suatu alat penggerak aktif yang dapat bergerak mengikuti arah pergerakan matahari .

Sistem kendali tracking sinar matahari salah satu pengembangan teknologi dalam rangka konversi energi dengan manfaatkan energi matahari. Sistem kendali tracking dibuat untuk diterapkan lebih lanjut pada sebuah perangkat panel surya sebagai alat pengumpul energi matahari sehingga posisi panel dinamis.

Solar tracking merupakan rangkaian kontrol yang mampu mendeteksi dan mengikuti arah matahari agar solar panel selalu tegak lurus dengan matahari supaya intensitas cahaya matahari yang diterima sel surya optimum dengan cara mengatur gerakan motor. Prinsip kerja sistem kendali ini adalah menjelajah pergerakan sinar matahari dari matahari terbit sampai tenggelam agar panel selalu tegak lurus dengan matahari sehingga jumlah sinar yang diperoleh maksimal dan menghasilkan daya yang maksimal [4].

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu sistem *solar tracker dual axis* berbasis kontrol cerdas untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi surya. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem solar tracker menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) Mamdani dengan dukungan teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui protokol MQTT dan dashboard Node-RED. Sistem ini diharapkan mampu mengoptimalkan konversi energi surya menjadi energi listrik sekaligus memungkinkan pemantauan jarak jauh secara *real-time* terhadap parameter tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan panel surya.

2. Metode Penelitian

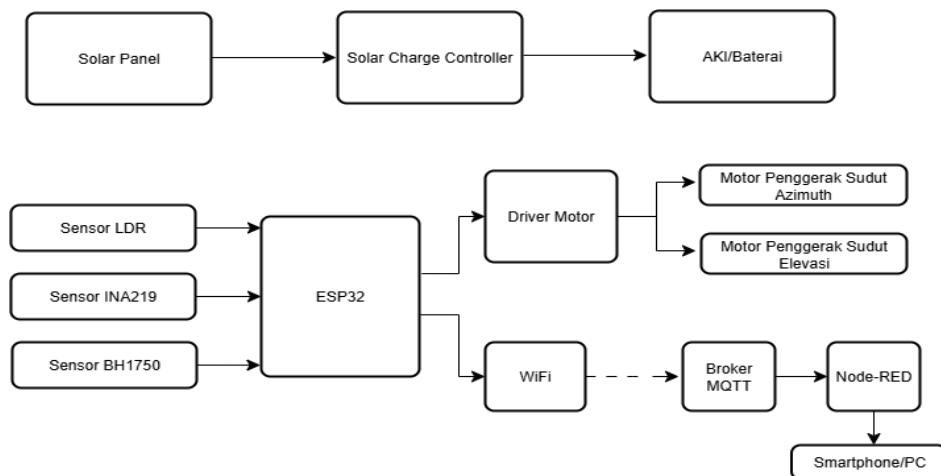
Pada tahap ini, penelitian difokuskan pada perancangan solar tracker dual axis dengan menerapkan metode *Fuzzy Logic Controller* Mamdani, disertai pengumpulan referensi yang sesuai. Informasi dihimpun dari berbagai literatur, meliputi jurnal, buku, skripsi, serta hasil penelitian terdahulu. Setelah itu, sistem dirancang dalam bentuk prototype dan dilakukan serangkaian uji coba serta evaluasi berdasarkan data yang diperoleh. Jika hasil pengujian menunjukkan konsistensi tanpa adanya kesalahan, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini.

A. Perancangan Sistem

Perancangan sistem pada penelitian ini ditampilkan dalam bentuk diagram, yaitu blok diagram sistem, blok diagram kendali fuzzy, dan flowchart untuk menjelaskan alur kerja keseluruhan. Dalam perancangan ini, ESP32 digunakan sebagai pengendali utama. Sensor LDR berperan mendeteksi arah cahaya matahari, sedangkan sensor BH1750 mengukur intensitas cahaya matahari dan sensor INA219 memantau tegangan, arus, serta daya yang dihasilkan panel surya. Motor DC gearbox dimanfaatkan sebagai aktuator untuk menggerakkan panel pada sumbu azimuth dan elevasi. Sistem monitoring dilakukan melalui protokol MQTT dan divisualisasikan pada platform Node-RED yang dapat diakses secara real-time melalui perangkat smartphone maupun PC.

1. Blok Diagram Sistem

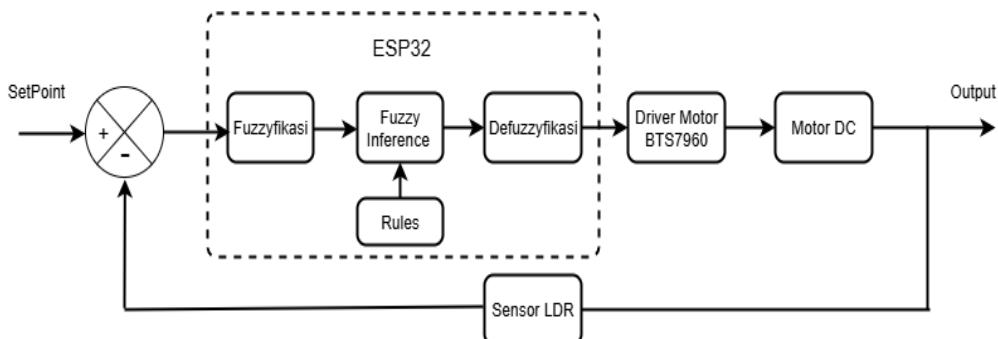
Blok diagram sistem solar tracker dual axis menunjukkan hubungan komponen utama, mulai dari panel surya, sensor, mikrokontroler, hingga aktuator dan sistem monitoring. Blok diagram sistem dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

2. Blok Diagram Sistem Kendali Fuzzy

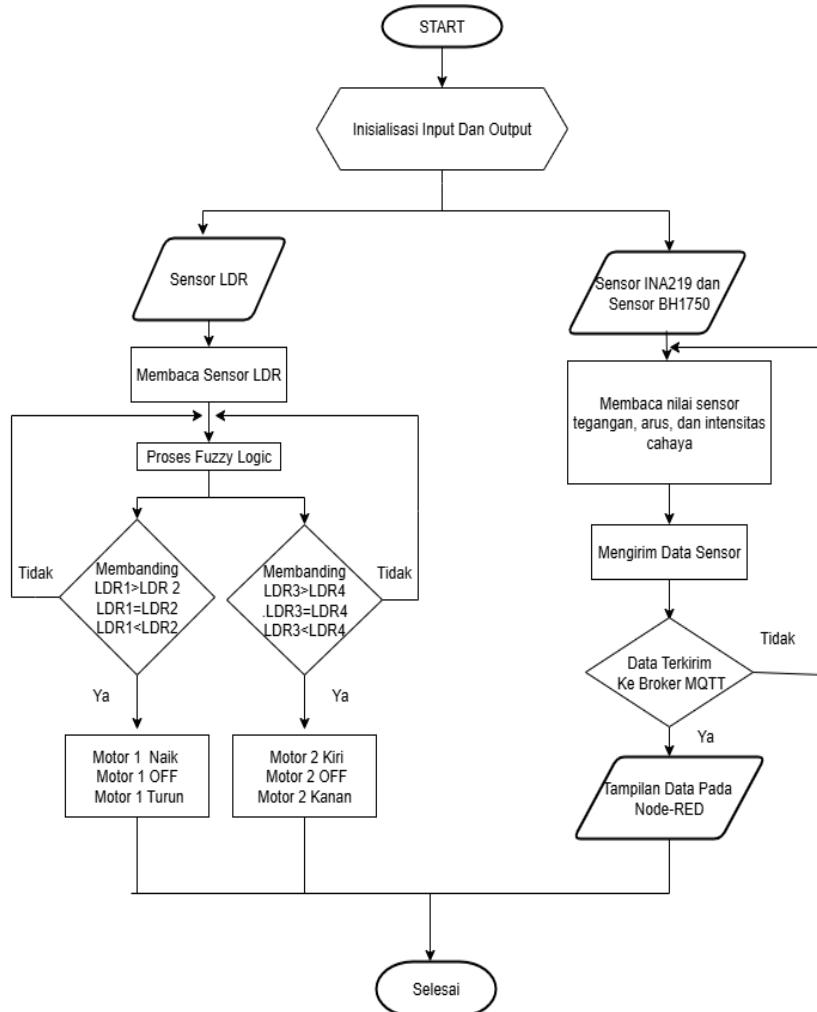
Blok diagram kendali fuzzy digunakan untuk menggambarkan sistem kendali menggunakan logika fuzzy dalam mengambil keputusan dan menghasilkan tindakan. Blok diagram sistem kendali Fuzzy dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Blok Diagram Sitem Kendali Fuzzy

3. Flowchart

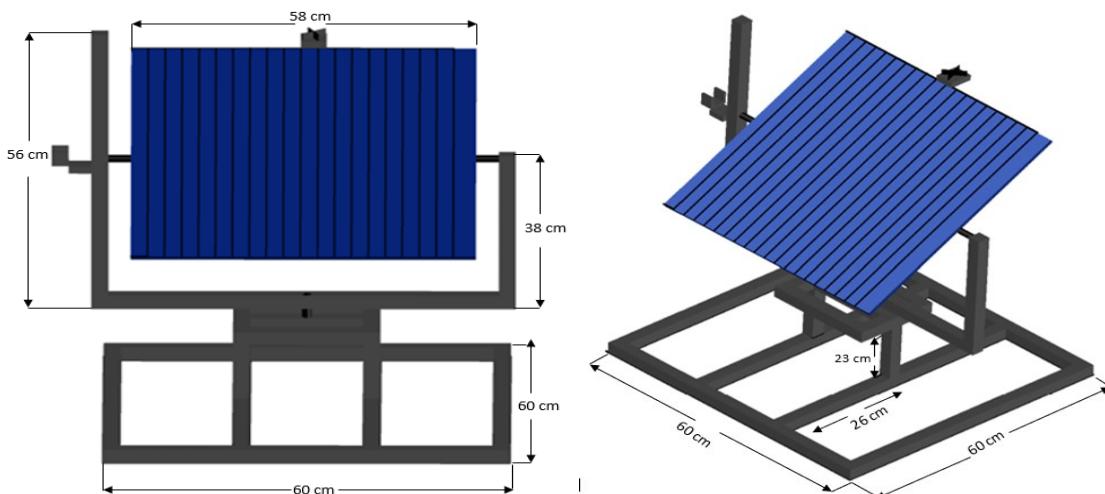
Flowchart merupakan rangkaian proses yang menggambarkan bagaimana suatu sistem bekerja. Secara umum, flowchart menyajikan uraian terperinci mengenai urutan proses kerja dari sistem yang dirancang. Tujuan utama penyusunan diagram alur ini adalah untuk menjelaskan langkah-langkah penyelesaian masalah secara terstruktur, ringkas, dan jelas. Ilustrasi flowchart sistem ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Flowchart

B. Perancangan Hardware

Pada sistem solar tracker ini digunakan panel surya tipe monocrystalline berkapasitas 50 Wp (watt peak) sebagai sumber daya. Desain rancangan ditunjukkan pada Gambar 4, dengan rangka yang dibuat menggunakan material besi hollow berukuran $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ dan tebal 1,2 mm. Perancangan Hardware dapat dilihat pada Gambar 4 Berikut ini.



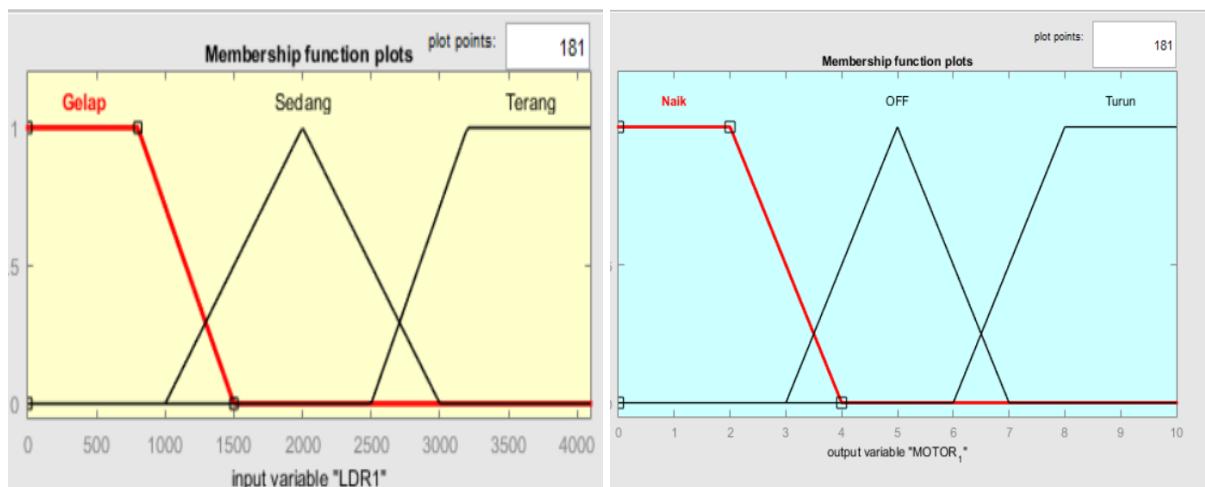
Gambar 4. Desain Perancangan Solar Tracker Dual-Axis

C. Perancangan Software

Perancangan software merupakan pembuatan sistem dari suatu alat yang akan dibuat, Dimana terdiri dari Perancangan metode Fuzzy Logic dan desain flow Node-RED

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi didefinisikan sebagai pemetaan dari himpunan tegas ke himpunan fuzzy. Kriteria yang harus dipenuhi pada proses fuzzifikasi adalah semua anggota pada himpunan tegas harus termuat dalam himpunan fuzzy, tidak terdapat gangguan pada input sistem fuzzy yang digunakan harus bisa mempermudah perhitungan pada sistem fuzzy [5]. pada fungsi keanggotaan input dan output dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan input dan output

2. Rule Base

Aturan fuzzy adalah sekumpulan pernyataan yang menghubungkan input kabur dengan output kabur. Mereka biasanya berbentuk "IF [kondisi input] THEN [aksi output]." Aturan ini menggambarkan bagaimana input mempengaruhi keluaran dalam konteks kabur [6]. Aturan aturan ini dapat di lihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rule Based

No	IF	LDR1	AND	LDR2	AND	LDR3	AND	LDR4	THEN	MOTOR1	THEN	MOTOR2
1	IF	GELAP	AND	GELAP	AND	NONE	AND	NONE	THEN	OFF	THEN	NONE
2	IF	SEDANG	AND	GELAP	AND	NONE	AND	NONE	THEN	NAIK	THEN	NONE
3	IF	TERANG	AND	GELAP	AND	NONE	AND	NONE	THEN	NAIK	THEN	NONE
4	IF	GELAP	AND	SEDANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	TURUN	THEN	NONE
5	IF	SEDANG	AND	SEDANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	OFF	THEN	NONE
6	IF	TERANG	AND	SEDANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	NAIK	THEN	NONE
7	IF	GELAP	AND	TERANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	TURUN	THEN	NONE
8	IF	SEDANG	AND	TERANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	TURUN	THEN	NONE
9	IF	TERANG	AND	TERANG	AND	NONE	AND	NONE	THEN	OFF	THEN	NONE
10	IF	NONE	AND	NONE	AND	GELAP	AND	GELAP	THEN	NONE	THEN	OFF
11	IF	NONE	AND	NONE	AND	GELAP	AND	SEDANG	THEN	NONE	THEN	KANAN
s12	IF	NONE	AND	NONE	AND	GELAP	AND	TERANG	THEN	NONE	THEN	KANAN
13	IF	NONE	AND	NONE	AND	SEDANG	AND	GELAP	THEN	NONE	THEN	KIRI
14	IF	NONE	AND	NONE	AND	SEDANG	AND	SEDANG	THEN	NONE	THEN	OFF
15	IF	NONE	AND	NONE	AND	SEDANG	AND	TERANG	THEN	NONE	THEN	KANAN
16	IF	NONE	AND	NONE	AND	TERANG	AND	GELAP	THEN	NONE	THEN	KIRI
17	IF	NONE	AND	NONE	AND	TERANG	AND	SEDANG	THEN	NONE	THEN	KIRI
18	IF	NONE	AND	NONE	AND	TERANG	AND	TERANG	THEN	NONE	THEN	OFF

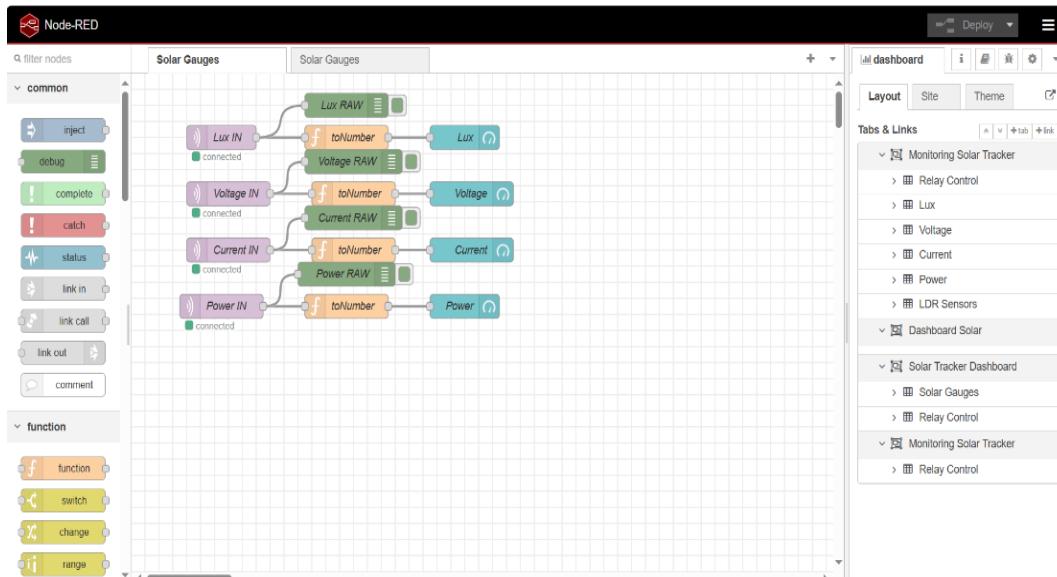
3. Defuzzyifikasi

Defuzzyifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan real yang tegas. Sehingga jika

diberikan suatu himpunan fuzzy dalam range tertentu, maka dapat diambil suatu nilai tegas tertentu sebagai output [7]. Pada sistem ini diterapkan proses defuzzifikasi menggunakan metode Mamdani, dengan teknik penalaran centroid sebagai pendekatan yang digunakan.

4. Flow Node-RED

Node-RED adalah sebuah *tool* berbasis *browser* untuk membuat aplikasi *Internet of Things (IoT)* yang mana lingkungan pemrograman visualnya mempermudah penggunanya untuk membuat aplikasi sebagai “flow”[8]. Dapat dilihat flow Node-RED pada sistem ini pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Flow Node-RED

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah seluruh sistem selesai dikerjakan, dilakukan pengujian dan analisa terhadap sensor yang digunakan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor dapat berfungsi sesuai dengan perancangan, sekaligus mengevaluasi kelebihan serta kekurangan dari setiap sensor yang terlibat dalam sistem.

A. Pengujian Sensor INA219

Data Pengujian perbandingan pembacaan Tegangan dan Arus dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian Sensor INA219

No percobaan	Sensor INA219	Multimeter	Selisih Pengukuran	Error (%)
1	17.94	17.6	0.34	1.93
2	18.18	18.0	0.18	1
3	13.8	13.8	0	0
4	18.42	18.2	0.20	1.09
5	19.28	19.2	0.08	0.42
6	12.68	12.6	0.08	0.63
Total Error				5.07
Rata-rata Error				0.845

Dari tabel pengujian sensor tegangan dapat dianalisa bahwa pembacaan sensor tegangan DC ini sangat baik karena outputnya mendekati hasil pengukuran. Untuk pengujian tegangan input yang diberikan rata rata error hanya 0.845 % dan masih dapat ditoleransi. Range input sensor adalah 0 – 26 Vdc dan Sensor INA219 bekerja dengan cara membaca beda potensial pada resistor shunt presisi (0,1Ω) sehingga mampu mengukur arus dengan akurasi yang cukup tinggi.

B. Pengujian Sensor BH1750

Data Pengujian perbandingan pembacaan intensitas cahaya matahari dapat dilihat pada Tabel 3 .

Tabel 3. Pengujian Intensitas cahaya sensor BH1750

NO Percobaan	Sensor BH1750	Lux Meter	Selisih Pengukuran	Error (%)
1	4.140	4.600	0.460	10.00
2	7.008	7395	0.387	5.23
3	12.540	12.980	0.440	3.39
4	25.320	26.100	0.780	2.99
5	38.760	40.200	1.1440	3.58
Total Error =				25.19
Rata-rata Error				5.04

Berdasarkan Tabel 3, sensor BH1750 menunjukkan hasil pengukuran intensitas cahaya yang mendekati nilai Lux meter. Selisih terbesar terjadi pada percobaan pertama dengan error 10%, sedangkan selisih terkecil terdapat pada percobaan keempat dengan error 2,99%. Dari lima kali pengujian diperoleh rata-rata error sebesar 5,04%, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor BH1750 memiliki akurasi yang cukup baik dan layak digunakan sebagai sensor cahaya pada sistem solar tracker.

C. Pengujian Sensor LDR

Data pengujian pada sensor LDR dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Sensor LDR

V in (V)	Jarak (cm)	V out (V)
5	30	0.46
5	25	0.52
5	20	0.67
5	15	0.79
5	10	0.89
5	5	1.00

Sensor LDR berfungsi sebagai input bagi sistem solar tracker dengan membaca perubahan intensitas cahaya melalui nilai ADC pada ESP32 beresolusi 12-bit (0–4095) dengan tegangan referensi 5 V. Semakin tinggi intensitas cahaya, nilai ADC meningkat, dan sebaliknya menurun pada kondisi gelap. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak sumber cahaya dari senter handphone, sedangkan hasil pembacaan digunakan sebagai input logika fuzzy Mamdani untuk menentukan kategori pencahayaan (Gelap, Sedang, Terang) yang menjadi dasar pengendalian motor pada sistem solar tracker dua sumbu.

D. Pengujian sudut elevasi dan sudut azimuth Solar Tracker

Data pengujian sudut elevasi dan azimuth dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Sudut Elevasi dan Sudut Azimuth

Tanggal	Waktu Jam	Elevasi Matahari NOAA (°)	Azimuth Matahari NOAA (°)	Elevasi Tracker (°)	Azimuth Tracker (°)
17/8/2025	08.00	23.35	74.29	45	76
17/8/2025	09.00	37.68	71.45	45	76
17/8/2025	10.00	51.67	65.78	41	73
17/8/2025	11.00	64.69	53.2	29	65
17/8/2025	12.00	74.09	20.45	15	65

Tanggal	Waktu	Elevasi Matahari NOAA (°)	Azimuth Matahari NOAA (°)	Elevasi Tracker (°)	Azimuth Tracker (°)
	Jam				
17/8/2025	13.00	72.49	328	10	251
17/8/2025	14.00	61.69	302	35	251
17/8/2025	15.00	48.32	292.33	40	251
17/8/2025	16.00	34.21	287.56	40	255
17/8/2025	17.00	19.83	285.14	60	255

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut elevasi dan azimuth solar tracker memiliki pola searah dengan data hasil perhitungan dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) yang diambil berdasarkan koordinat lokasi penelitian di Padang, Sumatera Barat. Sudut elevasi maksimum yang dicapai alat sebesar 70° dan azimuth maksimum 251° . Perbedaan nilai dengan data NOAA disebabkan oleh perbedaan acuan titik nol serta sensitivitas sensor. Secara keseluruhan, sistem solar tracker dual axis mampu mengikuti lintasan matahari dengan baik untuk menjaga orientasi optimal panel surya.

E. Pengujian Keseluruhan Sensor Pada sistem Solar Tracker

Data pengujian keseluruhan Sensor pada Sistem Solar Tracker dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengujian Sensor Keseluruhan

Pukul WIB		08.00	09.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
TANGGAL											
15 Agustus 2025	Lux	8268	29613	35988	33872	56300	88100	102000	75400	71900	33200
	V(Volt)	12.9	15.8	15.86	16.0	16.95	17.07	18.2	16.81	16.74	15.9
	I(A)	0.158	0.66	0.950	1.03	1.00	1.62	1.73	1.56	1.52	0.99
	P(Watt)	2.03	10.42	15.067	16.48	16.95	27.65	31.48	26.22	25.44	15.741
16 Agustus 2025	Lux	3274	32495	65000	90560	112400	116100	105000	101500	60950	58000
	V(Volt)	12.7	15.95	17.94	17.12	17.57	17.65	17.32	17.20	16.51	16.3
	I(A)	0.122	1.08	1.464	1.77	2.06	2.11	1.91	1.91	1.37	1.35
	P(Watt)	1.549	17.22	26.26	30.30	36.19	37.24	33.08	32.85	22.61	22.005
17 Agustus 2025	Lux	16100	164000	117600	118600	114000	140700	108600	-	-	-
	V(Volt)	13.8	18.42	16.63	16.63	16.61	18.22	17.49	-	-	-
	I(A)	0.347	2.71	2.18	2.20	2.10	2.44	2.01	-	-	-
	P(Watt)	4,788	49,918	36.25	36.58	34.88	44.45	35.15	-	-	-

Berdasarkan tabel 6. Pengujian keseluruhan ini dilakukan pada dilakukan pada periode 15, 16, dan 17, Agustus 2025 dengan interval pengukuran setiap 1 jam, dimulai pukul 08.00 hingga 17.00 WIB. Sebelum pengambilan data, sistem solar tracker dikalibrasi dengan menetapkan titik nol pada posisi menghadap ke arah utara sejati. Lokasi pengujian dilakukan pada koordinat geografis tempat penelitian yaitu pada lintang -0.920611 dan bujur 100.46448 (Padang, Sumatera Barat).

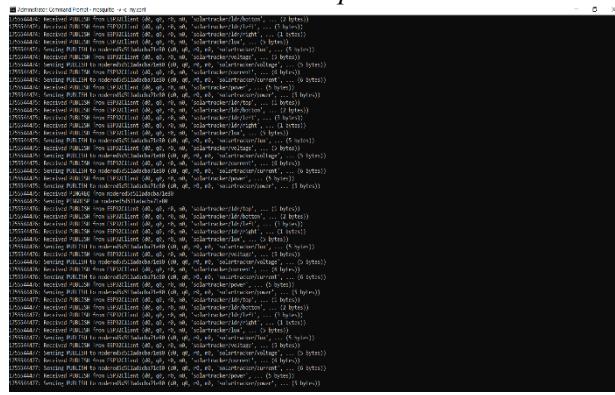
Dapat diamati bahwa intensitas cahaya mengalami perubahan yang signifikan seiring dengan perbedaan waktu pengukuran. Pada pagi hari, tepatnya pukul 08.00 WIB, intensitas cahaya masih relatif rendah karena posisi matahari yang masih rendah sehingga cahaya yang diterima sensor belum maksimal. Seiring berjalanannya waktu menuju siang hari, intensitas cahaya meningkat secara bertahap hingga mencapai puncaknya pada pukul 13.00 WIB, yaitu saat matahari berada mendekati titik kulminasi atau posisi tertinggi di langit. Pada kondisi ini, radiasi matahari yang diterima permukaan bumi juga paling besar. Setelah itu, intensitas cahaya mulai menurun secara konsisten hingga sore hari pada pukul 17.00 WIB akibat posisi matahari yang semakin rendah mendekati terbenam. Pola

distribusi intensitas ini sesuai dengan teori pergerakan harian matahari yang memengaruhi besar radiasi matahari di permukaan bumi.

Sejalan dengan pola intensitas cahaya, hasil pengukuran tegangan (V), arus (I), dan daya (P) pada panel surya 50 WP yang terpasang pada sistem solar tracker dual axis menunjukkan variasi nilai sepanjang hari. Tegangan berada pada rentang 12,7–18,42 Volt, arus berkisar 0,122–2,828 Ampere, serta daya maksimum mencapai 49,918 Watt. Pada pagi hari (08.00–09.00 WIB), tegangan dan arus masih rendah sehingga daya yang dihasilkan kecil. Nilai tegangan dan arus meningkat mulai pukul 10.00 hingga 13.00 WIB seiring dengan kenaikan intensitas cahaya, dengan capaian daya tertinggi pada pukul 09.00 WIB tanggal 17 Agustus 2025 sebesar 49,918 Watt yang mendekati kapasitas nominal panel surya. Setelah melewati pukul 14.00 WIB, tegangan dan arus kembali menurun, sehingga daya yang dihasilkan juga berkurang hingga sore hari. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem solar tracker dual axis berbasis fuzzy logic Mamdani mampu menjaga posisi panel tetap optimal mengikuti arah cahaya matahari, sehingga kinerja panel meningkat dan keluaran daya mendekati kapasitas maksimumnya.

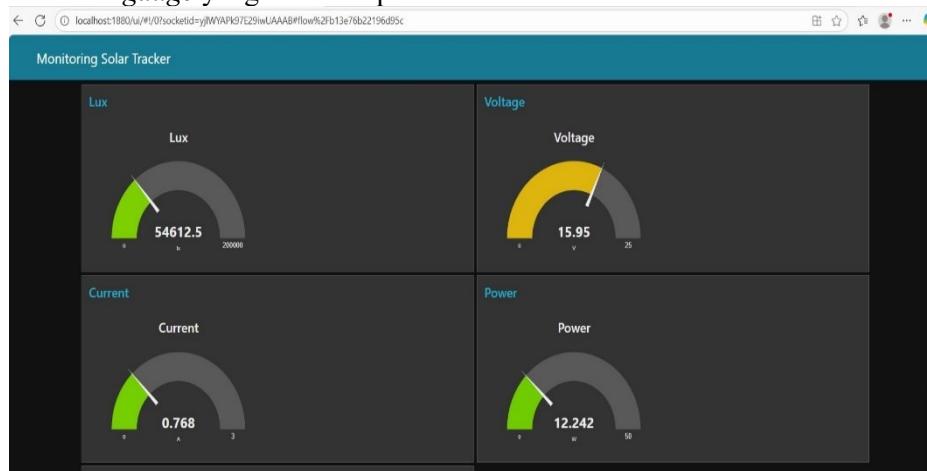
F. Pengujian Pengiriman Data Melalui MQTT Ke Node-RED

Pengujian pengiriman data dilakukan dengan menghubungkan mikrokontroler ESP32 ke jaringan Wi-Fi dan mengirimkan hasil pengukuran ke broker MQTT. Data yang dikirim meliputi intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya. Hasil pengiriman ditunjukkan pada Gambar 7, yang memperlihatkan keberhasilan ESP32 melakukan *publish* data ke broker MQTT.



Gambar 7. Tampilan MQTT Broker

Selanjutnya, Node-RED yang telah dikonfigurasi untuk *subscribe* pada topik tertentu menerima data tersebut secara real-time, kemudian menampilkannya dalam bentuk visual. Antarmuka Node-RED Dashboard ditunjukkan pada Gambar 8, dengan parameter lux, tegangan, arus, dan daya ditampilkan dalam indikator *gauge* yang mudah dipantau.



Gambar 8. Tampilan Monitoring di dashboard Node-RED

Dengan demikian, integrasi ESP32, protokol MQTT, dan Node-RED berhasil direalisasikan, memungkinkan monitoring sistem solar tracker secara praktis, cepat, dan efisien melalui berbagai perangkat yang terhubung dalam jaringan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem solar tracker dual axis berbasis ESP32 dengan metode Fuzzy Logic Controller Mamdani telah berhasil direalisasikan. Penerapan logika fuzzy terbukti mampu menghasilkan pergerakan panel yang lebih halus, adaptif, serta meningkatkan kinerja penyerapan energi matahari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pergerakan solar tracker mengikuti pola perubahan sudut elevasi dan azimuth yang searah dengan data perhitungan NOAA, meskipun terdapat selisih akibat perbedaan acuan titik nol. Integrasi sistem dengan teknologi Internet of Things melalui protokol MQTT juga berjalan dengan baik, memungkinkan pemantauan parameter tegangan, arus, daya, dan intensitas cahaya secara real-time dengan komunikasi data yang ringan dan efisien. Dengan demikian, sistem ini berpotensi untuk meningkatkan performa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

5. Daftar Pustaka

- [1] R. Kusuma Dewi, P. Studi Pendidikan Fisika, F. Keguruan dan Ilmu Pendidikan, and U. Jember, "ANALISIS PEMANFAATAN RADIASI MATAHARI PADA PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN," *J. Fis. dan Pembelajarannya*, vol. 6, no. 2, 2024, doi: 10.31605/phy.v6i2.3266.
- [2] D. E. Myori, R. Mukhaiyar, and E. Fitri, "Sistem Tracking Cahaya Matahari pada Photovoltaic," *INVOTEK J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 19, no. 1, pp. 9–16, 2019, doi: 10.24036/invotek.v19i1.548.
- [3] H. Bafadhal, A. U. Krismanto, I. Komang Somawirata, and I. T. Nasional, "SOLAR TRACKER DUAL AXIS DENGAN METODE FUZZY TYPE 1 BERBASIS ARDUINO."
- [4] I. Ramli, F. Arya Samman, and S. Mawar Said, "Panel Surya dengan Sistem Pelacakan Arah Sinar Matahari 'Jurnal EKSITASI', Vol. 1, No. 1, 2022," Makassar, 2022.
- [5] A. K. Nisa, M. Abdy, and A. Zaki, "Penerapan Fuzzy Logic untuk Menentukan Minuman Susu Kemasan Terbaik dalam Pengoptimalan Gizi," *J. Math. Comput. Stat.*, vol. 3, no. 1, p. 51, 2020, doi: 10.35580/jmathcos.v3i1.19902.
- [6] Fungki Wahyu and Billy Hendrik, "Perbandingan Algoritma Time Series Dan Fuzzy Inference System Dalam Analisis Data Deret Waktu," *J. Penelit. Teknol. Inf. dan Sains*, vol. 1, no. 3, pp. 16–24, 2023, doi: 10.5406/jptis.v1i3.711.
- [7] R. Bakri, A. N. Rahma, I. Suryani, and Y. Sari, "Penerapan Logika Fuzzy Dalam Menentukan Jumlah Peserta Bpjs Kesehatan Menggunakan Fuzzy Inference System Sugeno," *J. Lebesgue J. Ilm. Pendidik. Mat. Mat. dan Stat.*, vol. 1, no. 3, pp. 182–192, 2020, doi: 10.46306/lb.v1i3.38.
- [8] S. Mulyono, M. Qomaruddin, and M. Anwar, "Anwar, MS," *J. Transistor Elektro dan Inform. (TRANSISTOR EI)*, vol. 3, no. 1, pp. 31–44, 2018.