

Rancang Bangun *Solar Tracker* Portable

Menggunakan Sensor Ldr Berbasis Algoritma

Fuzzy

1st Ananda Dony Setiawan
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
jokaizo@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dimas Adiputra
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
dimasze@telkomuniversity.ac.id

2nd Mohammad Yanuar Hariyawan
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
myanuar@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Saat ini, para peneliti berlomba-lomba mengembangkan energi terbarukan karena energi fosil semakin menipis. Fokus penelitian ini adalah pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun, PLTS saat ini belum optimal karena bersifat statis, sedangkan rotasi bumi terus berubah. Oleh karena itu, para peneliti mengembangkan teknologi solar tracker.

Penelitian ini bertujuan menyajikan penelitian dan literatur terkini tentang sistem pelacakan fotovoltaik untuk produksi energi listrik, terutama bagi mereka yang terdampak bencana atau tinggal di daerah terpencil yang sulit dijangkau energi listrik. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengurangi penggunaan energi listrik dari sumber tidak ramah lingkungan seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Penelitian ini juga memberikan gambaran komprehensif tentang sistem pelacakan fotovoltaik serta studi terbaru dalam beberapa tahun terakhir.

Penelitian ini mengintegrasikan algoritma fuzzy untuk mengoptimalkan kinerja solar tracker. Algoritma fuzzy, khususnya metode fuzzy Sugeno, digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan output energi dari sistem panel surya dengan lebih akurat mengikuti pergerakan matahari. Penggunaan algoritma fuzzy memungkinkan penghematan energi dan optimisasi orientasi sumbu panel surya, sehingga produksi energi dapat meningkat hingga 30% lebih efektif dibandingkan panel surya konvensional yang statis. Implementasi solar tracker dengan algoritma fuzzy juga sangat berguna dalam situasi darurat pasca-bencana, menyediakan sumber listrik kritis untuk operasi darurat, pusat medis, dan fasilitas pengungsian.

Kata kunci— solar tracker, fotovoltaik, portable

I. PENDAHULUAN

Pada era modern ini, ketergantungan terhadap energi fosil menghadapi tantangan besar karena sifatnya yang tidak terbarukan dan diprediksi akan habis dalam beberapa dekade ke depan jika terus digunakan secara masif. Krisis energi global menjadi ancaman nyata yang mendorong dunia untuk

beralih ke sumber energi alternatif yang bersih dan berkelanjutan. Energi surya merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang sangat potensial karena bersifat ramah lingkungan, aman, dan memiliki ketersediaan melimpah. Indonesia sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa memiliki keuntungan geografis, di mana wilayah Indonesia bagian barat mampu menghasilkan energi hingga 4,5 kWh/m² per hari [16], menjadikannya lokasi yang sangat ideal untuk pengembangan energi matahari [5].

Panel surya atau modul fotovoltaik berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik [10]. Namun, sistem panel statis yang umum digunakan saat ini masih memiliki efisiensi yang rendah karena tidak dapat mengikuti pergerakan matahari sepanjang hari. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkanlah sistem pelacak surya (solar tracker) yang mampu mengikuti arah datangnya sinar matahari. Berdasarkan mekanismenya, sistem pelacakan dibagi menjadi dua jenis: pelacak satu sumbu dan dua sumbu. Penelitian menunjukkan bahwa sistem pelacak surya dapat meningkatkan efisiensi daya hingga 30% dibandingkan panel statis yang tetap pada satu posisi [1]. Salah satu pendekatan untuk mengoptimalkan sistem ini adalah dengan menerapkan logika fuzzy tipe Sugeno, yang mampu menghemat energi dan memberikan kontrol arah yang lebih presisi terhadap posisi matahari.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pelacak dengan sensor LDR yang diletakkan di empat sisi (utara, selatan, timur, dan barat) dari panel surya [7]. Namun, pendekatan tersebut masih memiliki kekurangan karena sistem harus menggerakkan panel hanya untuk mendeteksi arah datangnya cahaya, yang mengakibatkan konsumsi energi motor yang tinggi. Penelitian ini mengambil pendekatan berbeda dengan menggunakan modul sensor LDR terpisah untuk mendeteksi intensitas cahaya matahari, sehingga menghindari gerakan panel yang tidak perlu dan meningkatkan efisiensi konsumsi energi.

Selain peningkatan efisiensi energi, sistem pelacak surya juga memiliki potensi besar dalam penanganan bencana. Dalam situasi darurat seperti banjir yang menyebabkan pemadaman listrik dan kerusakan infrastruktur, sistem pelacak surya portabel dapat menyediakan sumber listrik sementara bagi fasilitas penting seperti pusat penanganan medis, tempat pengungsian, dan layanan darurat lainnya. Dengan demikian, teknologi ini bukan hanya mendukung transisi energi hijau, tetapi juga memberikan solusi nyata untuk meningkatkan ketahanan energi dalam kondisi krisis.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang sistem pelacak surya dua sumbu berbasis mikrokontroler Arduino Uno, bagaimana meningkatkan efisiensi penangkapan energi matahari melalui pendekatan portabel, serta bagaimana mengimplementasikan metode logika fuzzy untuk pengendalian arah panel secara otomatis. Tujuan dari penelitian ini adalah mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil melalui optimalisasi sistem energi surya, menurunkan emisi karbon dengan penggunaan energi ramah lingkungan, serta menyediakan solusi energi darurat yang efisien dan andal bagi masyarakat terdampak bencana dan yang tinggal di daerah terpencil.

II. KAJIAN TEORI

A. Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan salah satu pendekatan matematika yang digunakan untuk mengelola ketidakpastian dalam data yang tidak tegas. Tidak seperti logika biner konvensional yang hanya mengenal nilai benar atau salah, logika fuzzy memperkenalkan derajat keanggotaan antara 0 dan 1, sehingga memungkinkan sistem untuk merepresentasikan nilai kebenaran secara bertahap. Melalui penggunaan himpunan fuzzy, setiap elemen memiliki derajat keanggotaan yang menunjukkan seberapa kuat elemen tersebut termasuk dalam suatu kategori tertentu. Pendekatan ini menjadikan logika fuzzy sangat berguna dalam berbagai bidang, seperti sistem kontrol cerdas, pengambilan keputusan, dan pengenalan pola [6]. Dalam implementasinya, terdapat dua model yang umum digunakan, yaitu model Mamdani dan model Sugeno. Model Mamdani merepresentasikan aturan-aturan fuzzy dalam bentuk himpunan fuzzy yang diolah menggunakan operasi seperti union dan intersection, sementara model Sugeno menggunakan fungsi linier atau konstanta sebagai output, sehingga lebih mudah dianalisis dan diimplementasikan secara komputasi [1].

B. Algoritma Penentuan Posisi Matahari

Penentuan posisi matahari secara akurat merupakan faktor penting dalam sistem pelacakan panel surya agar perangkat dapat terus menghadap arah terbaik terhadap cahaya matahari. Algoritma posisi matahari berfungsi untuk memperkirakan sudut yang optimal bagi panel surya, bahkan ketika matahari tertutup awan. Dalam algoritma ini, terdapat empat elemen penting yang harus dipertimbangkan, yaitu posisi matahari, sistem penggerak, input kontrol, dan sistem pengontrol [2]. Posisi matahari menentukan arah gerak pelacak untuk menangkap cahaya matahari secara maksimal. Sistem penggerak harus dirancang agar dapat bergerak secara efisien ke arah yang ditentukan. Input kontrol seperti vektor

algoritma, fotodiode, atau kamera diperlukan untuk mengukur kondisi pencahayaan. Terakhir, sistem pengontrol bertugas mengatur kerja motor dan mekanisme penggerak agar sistem dapat merespon perubahan posisi matahari secara real-time.

C. Algoritma Pengontrolan Motor

Dalam sistem pelacak surya, pengaturan motor dilakukan dengan menggunakan perhitungan berbasis hour angle, yaitu konsep astronomi untuk menentukan posisi suatu objek langit relatif terhadap pengamat. Konsep ini diterapkan dalam perancangan sistem pelacak, di mana, misalnya, dalam interval waktu 15 menit, panel akan digerakkan sebesar 3,75 derajat. Pendekatan ini memungkinkan panel mengikuti pergerakan harian matahari secara lebih presisi dan efisien, serta mengurangi pemborosan energi akibat gerakan yang tidak diperlukan [13].

D. Panel Surya

Panel surya adalah perangkat fotovoltaiik yang dapat mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Saat ini terdapat tiga generasi utama teknologi panel surya: generasi pertama yang menggunakan wafer silikon, generasi kedua dengan teknologi film tipis, dan generasi ketiga yang mulai mengadopsi material organik agar lebih ramah lingkungan dan ekonomis [12]. Dari segi bentuk dan karakteristiknya, panel surya dibagi menjadi beberapa jenis, seperti panel polikristalin yang lebih murah namun memiliki efisiensi lebih rendah [9], panel monokristalin yang lebih efisien tetapi mahal [3], serta panel bifasial yang mampu menangkap cahaya dari dua sisi. Selain itu, terdapat panel surya terintegrasi yang menjadi bagian dari struktur bangunan seperti genteng, jendela, atau dinding.

Efisiensi panel surya sangat bergantung pada beberapa faktor, antara lain bahan semikonduktor yang digunakan, desain internal sel surya, spektrum cahaya matahari yang diterima, suhu operasional, serta sudut optimal pemasangan panel [4]. Bahan seperti silikon, perovskite, dan film tipis memiliki karakteristik berbeda dalam menyerap dan menghasilkan listrik. Desain internal sel juga mempengaruhi penyerapan cahaya, sedangkan suhu tinggi cenderung menurunkan efisiensi konversi energi. Untuk memaksimalkan kinerja, panel harus dipasang dengan sudut yang sesuai dengan posisi geografis dan arah datangnya sinar matahari. Selain itu, umur pakai panel surya berkisar antara 25 hingga 30 tahun, bergantung pada kualitas bahan dan perawatan yang dilakukan. Pemeliharaan rutin seperti pembersihan permukaan dan pemantauan performa sangat penting untuk menjaga kinerjanya tetap optimal.

E. Solar Tracker

Solar tracker atau pelacak surya adalah perangkat mekanik-elektronik yang dirancang untuk memastikan panel surya selalu menghadap ke arah matahari secara optimal sepanjang hari. Dengan mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat, dan bahkan dari utara ke selatan dalam versi dua sumbu, solar tracker memungkinkan panel surya menyerap energi secara maksimal. Terdapat dua jenis utama dari teknologi ini, yaitu pelacak satu sumbu (single axis), yang bergerak mengikuti pergerakan matahari dalam satu arah saja, dan pelacak dua sumbu (dual axis) yang

memungkinkan gerakan dalam dua arah untuk mengikuti pergerakan matahari secara lebih akurat. Penggunaan sistem pelacakan ini terbukti meningkatkan efisiensi energi panel surya secara signifikan dibandingkan dengan sistem panel statis.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen teknik rekayasa, dimulai dari studi literatur, perancangan sistem, implementasi, hingga pengujian sistem solar tracker portabel. Tujuan dari metode ini adalah menghasilkan alat yang mampu mengikuti arah sinar matahari secara otomatis dan fleksibel digunakan di berbagai lokasi.

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Smart Automation dan dilanjutkan dengan pengambilan data di rumah peneliti. Pemilihan lokasi rumah didasarkan pada pertimbangan kemudahan pemantauan dan kondisi lingkungan yang terbuka serta bebas dari halangan seperti bayangan bangunan atau pohon. Waktu pelaksanaan penelitian berlangsung pada bulan Mei hingga Juni tahun 2025.

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari persiapan studi literatur sebagai dasar teori, kemudian dilanjutkan dengan perancangan sistem baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Setelah sistem selesai dirakit, dilakukan pengujian di lapangan dan pengumpulan data untuk dibandingkan antara sistem pelacak surya dan sistem statis. Tahapan ini memastikan bahwa setiap komponen dapat bekerja secara sinergis sesuai desain.



GAMBAR. 1
TAHAPAN PENELITIAN

C. Perancangan Sistem

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini meliputi satu buah panel surya 30 Watt Peak (Wp) dengan dimensi 350x530x17 mm, dua motor DC sebagai aktuator, empat sensor LDR untuk mendeteksi arah datangnya cahaya, sebuah mikrokontroler Arduino Nano, satu modul driver motor L298N, satu sensor INA226 untuk mengukur tegangan dan arus panel, serta satu sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya (lumens). Selain itu, digunakan rangka mekanis berbahan PVC, catu daya, serta berbagai komponen pendukung seperti kabel jumper, PCB, dan resistor. Perancangan Mekanik

Dalam perancangan mekanik, sistem memiliki dua sumbu pergerakan. Pada sumbu horizontal, panel surya bergerak dari timur ke barat mengikuti arah matahari. Motor DC yang terpasang pada dasar alat memutar tiang vertikal untuk menyesuaikan posisi panel. Sementara itu, pada sumbu vertikal, panel surya mampu bergerak naik dan turun mengikuti sudut elevasi matahari dengan bantuan motor DC bertorsi tinggi yang menggerakkan engsel pada tiang.



GAMBAR. 2
HORIZONTAL AXIS



GAMBAR. 3
VERTICAL AXIS

Sensor LDR diposisikan di empat sisi dengan sekat berbentuk dinding silang agar masing-masing hanya menerima cahaya dari satu arah tertentu. Hal ini memungkinkan pendeteksian perbedaan intensitas cahaya yang lebih akurat, sehingga sistem dapat mengarahkan panel surya ke arah dengan intensitas cahaya maksimum.



GAMBAR. 2
LOKASI SENSOR LDR

Sistem kontrol menggunakan skematik berbasis Arduino Nano, di mana data dari empat LDR dan sensor BH1750 diproses untuk menentukan arah gerak motor. Sensor INA226 digunakan untuk mengukur daya listrik yang dihasilkan. Diagram alur sistem menggambarkan hubungan antara sensor, Arduino, driver motor, dan dua motor DC. Sistem ini juga menerapkan logika fuzzy untuk pengambilan keputusan arah gerak. Data dari sensor LDR diubah menjadi variabel fuzzy melalui proses fuzzifikasi, lalu diproses dalam sistem inferensi fuzzy menggunakan tabel aturan yang telah

ditetapkan. Output fuzzy tersebut kemudian dikonversi melalui proses defuzzifikasi menjadi perintah konkret untuk menggerakkan motor DC ke arah dengan intensitas cahaya paling tinggi.

Cahaya Rendah (Low Light) = 0 - 340 ADC

$$\mu_{\text{Low}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq 0 \\ \frac{341-x}{341-0} & \text{if } 0 < x \leq 341 \\ 0 & \text{if } x > 341 \end{cases}$$

Cahaya Sedang (Medium Light) = 341 - 681 ADC

$$\mu_{\text{Medium}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq 171 \\ \frac{x-171}{342-171} & \text{if } 171 < x \leq 342 \\ \frac{682-x}{682-342} & \text{if } 342 < x \leq 682 \\ 0 & \text{if } x > 682 \end{cases}$$

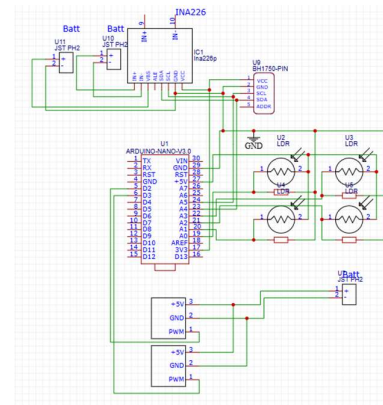
Cahaya Tinggi (High Light) = 682 - 1023 ADC

$$\mu_{\text{High}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq 683 \\ \frac{x-683}{1023-683} & \text{if } 683 < x \leq 1023 \\ 1 & \text{if } x > 1023 \end{cases}$$

TABLE 1
(TABEL RULE FUZZY)

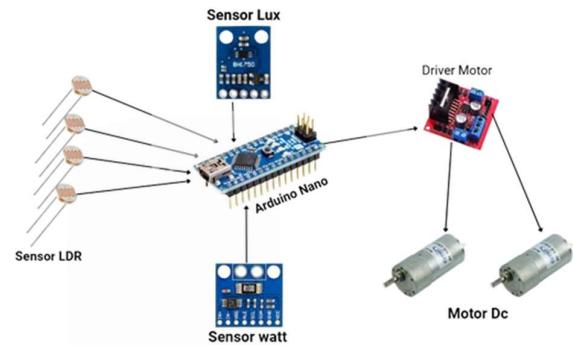
LDR 1	LDR 2	LDR 3	LDR 4	VERTIKAL	HORIZONTAL
Redup	Redup	Redup	Redup	Berhenti	Berhenti
Redup	Normal	Redup	Normal	Turun	Kanan
Redup	Cerah	Redup	Cerah	Turun	Kanan
Normal	Redup	Normal	Redup	Naik	Kiri
Normal	Normal	Normal	Normal	Berhenti	Berhenti
Normal	Cerah	Normal	Cerah	Turun	Kanan
Cerah	Redup	Cerah	Redup	Naik	Kiri
Cerah	Normal	Cerah	Normal	Naik	Kiri
Cerah	Cerah	Cerah	Cerah	Berhenti	Berhenti

Skematik sistem dirancang menggunakan Arduino Nano sebagai pengendali utama. Empat sensor LDR terhubung ke pin analog Arduino, sedangkan sensor BH1750 dan INA226 terhubung melalui jalur komunikasi I2C. Data yang diterima diolah untuk mengontrol dua motor DC menggunakan sinyal PWM melalui driver motor L298N. Sistem disuplai daya dari baterai.



GAMBAR. 5
SKEMATIK

Alur kerja sistem dimulai dari pembacaan sensor LDR, BH1750, dan INA226, kemudian diteruskan ke Arduino yang memproses data dan mengirimkan sinyal kontrol ke driver motor. Driver motor kemudian mengatur arah dan kecepatan putaran motor DC yang menggerakkan panel surya agar menghadap arah cahaya maksimum.



GAMBAR. 6
ALUR KERJA SISTEM

D. Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan untuk membandingkan performa antara panel surya statis dan sistem pelacak surya dua sumbu. Lokasi pengujian dilakukan di rumah peneliti yang terbuka dan bebas dari bayangan. Sebelum pengujian dimulai, dilakukan kalibrasi sensor LDR, sensor tegangan, dan arus untuk memastikan semuanya bekerja dengan benar. Sistem kemudian disiapkan untuk beroperasi dan dilakukan pengujian dua sistem secara paralel: sistem pertama adalah panel surya statis yang tidak bergerak dengan sudut tetap 180 derajat, sedangkan sistem kedua adalah sistem pelacak dua sumbu yang menyesuaikan posisi panel berdasarkan data intensitas dari sensor LDR.

E. Langkah-Langkah Pengambilan Data

Seluruh sistem ditempatkan secara berdampingan agar mendapatkan paparan sinar matahari yang sama. Pengambilan data dimulai pukul 08.00 WIB dan berakhir pukul 17.00 WIB. Selama pengujian, data tegangan dan arus listrik dari masing-masing sistem dicatat secara otomatis dalam interval waktu satu menit. Data yang dikumpulkan disimpan dalam format .csv dan akan dianalisis lebih lanjut.

pada bab berikutnya untuk mengevaluasi efisiensi dari masing-masing sistem.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan terhadap tiga sistem yang berbeda, yaitu panel surya statis (solar flat) dengan sudut 180 derajat, sistem solar tracker dual axis manual, dan sistem solar tracker dual axis berbasis logika fuzzy Mamdani. Masing-masing sistem diuji selama lima hari dalam rentang waktu pukul 08.00 hingga 17.00 WIB dengan pengukuran parameter tegangan (Volt), arus (Ampere), daya (Watt), dan total energi (Watt-hour). Data direkam secara berkala untuk mengamati pola produksi energi dan respon terhadap intensitas cahaya.

TABLE 2
(DATA HASIL PENGUJIAN PANEL SURYA 180
DERAJAT)

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)
8:00	14.64	0.72	9.54
9:00	15.46	0.76	10.41
10:00	14.71	0.79	12.41
11:00	13.15	0.82	13.75
12:00	13.3	0.82	13.63
13:00	12.68	0.82	10.39
14:00	13.17	0.82	10.80
15:00	13.40	0.82	10.99

TABLE 3
(DATA HASIL SOLAR TRACKER DUAL AXIS
DENGAN FUZZY MAMDANI)

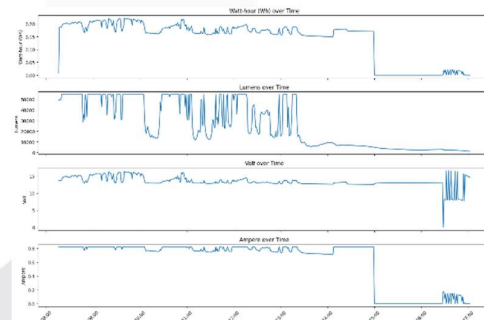
Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)
8:00	13.56	0.76	10.30
9:00	13.98	0.81	11.32
10:00	14.12	0.85	12
11:00	14.14	0.86	12.16
12:00	14.12	0.85	12
13:00	13.07	0.83	10.8
14:00	13.90	0.82	11.39
15:00	13.86	0.80	11.08

TABLE 4
(DATA HASIL SOLAR TRACKER DUAL AXIS
DENGAN FUZZY SUGENO)

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)
8:00	12.91	0.82	10.87
9:00	13.64	0.82	11.23
10:00	13.55	0.82	13.99
11:00	13.24	0.82	13.74
12:00	13.39	0.82	13.63
13:00	13.88	0.82	10.39
14:00	13.29	0.82	10.79
15:00	13.59	0.82	10.98

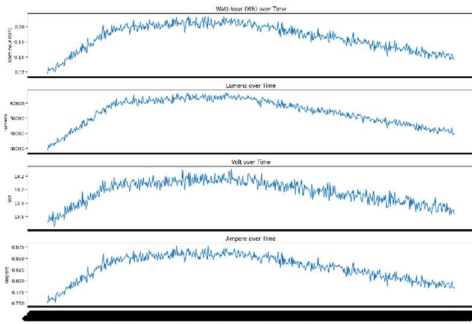
B. Visualisasi dan Analisis Data

Visualisasi data menunjukkan bahwa sistem solar tracker berbasis fuzzy logic Mamdani menghasilkan energi yang lebih stabil dan konsisten setiap harinya dibandingkan dengan sistem solar flat. Grafik Watt-hour menggambarkan akumulasi energi meningkat tajam pada siang hari dan menurun menjelang sore. Pada sistem solar flat, penurunan terjadi lebih drastis, mencerminkan keterbatasan dalam menyerap energi secara optimal.



GAMBAR. 7
GRAFIK SOLAR FLAT

Pada gambar di atas berikut ini memperlihatkan grafik akumulasi energi listrik harian yang dihasilkan oleh sistem panel surya statis (flat) dengan sudut 180 derajat. Visualisasi ini menunjukkan pola kenaikan energi sejak pagi hari, mencapai puncak pada tengah hari, lalu menurun tajam pada sore hari.



GAMBAR. 8

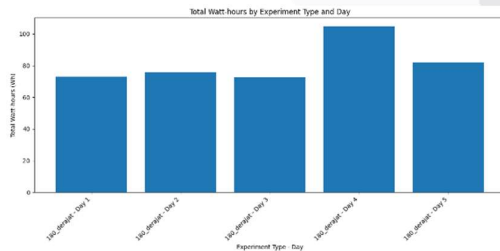
GRAFIK SOLAR TRACKER

Sebagai perbandingan, Gambar di atas di bawah ini menunjukkan hasil dari sistem solar tracker berbasis fuzzy Mamdani. Terlihat bahwa pola pertumbuhan energi lebih simetris dan stabil sepanjang hari, menunjukkan sistem berhasil mengikuti arah sinar matahari secara optimal dari pagi hingga sore.

Intensitas cahaya yang tercatat menunjukkan fluktuasi dari pagi ke sore hari dengan nilai mencapai hingga 65.000 lux. Sistem solar tracker mampu menyesuaikan arah panel terhadap perubahan intensitas ini dengan baik. Tegangan dan arus yang dihasilkan juga menunjukkan kestabilan, berada pada kisaran 13.5 hingga 14.3 Volt dan sekitar 0.8 Ampere selama masa aktif.

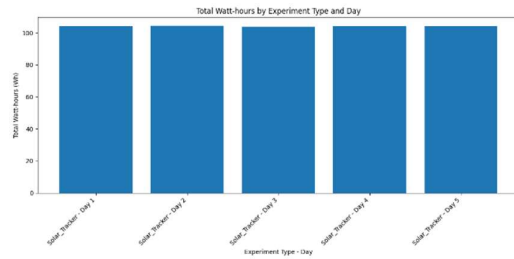
C. Perbandingan Output Energi

Berdasarkan hasil tabulasi data selama lima hari, sistem solar tracker menghasilkan output energi rata-rata yang lebih tinggi dibanding sistem flat. Efisiensi konversi energi terhadap intensitas cahaya juga lebih tinggi pada solar tracker, mencapai 55% hingga 80%, sedangkan solar flat hanya mencapai kisaran 10% hingga 45%. Pada hari ke-4, efisiensi solar tracker sempat menurun dan bahkan lebih rendah dibanding sistem flat, yang diduga karena sudut panel datar secara alami sudah optimal atau adanya keterlambatan pada kontrol fuzzy.



GAMBAR. 9

GRAFIK TOTAL PEROLEHAN 5 HARI SOLAR FLAT



GAMBAR. 10

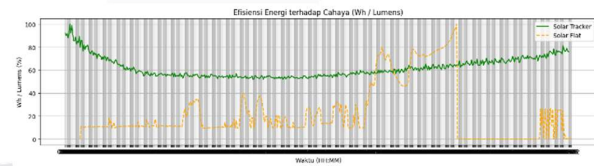
GRAFIK TOTAL PEROLEHAN ENERGI SOLAR TRACKER

D. Efisiensi Sistem Fuzzy

Sistem fuzzy logic mengambil input dari empat sensor LDR yang diletakkan di empat sisi panel. Sistem ini mengontrol dua motor DC untuk mengatur sudut horizontal (azimuth) dan vertikal (elevasi). Selama pengamatan, motor vertikal aktif menyesuaikan elevasi panel sesuai perubahan posisi matahari, sementara motor horizontal jarang aktif karena posisi awal panel sudah menghadap arah optimal. Hal ini menunjukkan efisiensi gerak sistem dan hemat energi mekanis.

E. Perbandingan Berdasarkan Rasio Wh/Lux

Efisiensi konversi energi terhadap cahaya (Wh/Lux) lebih stabil dan tinggi pada sistem solar tracker. Grafik menunjukkan sistem tracker mampu mempertahankan performa konversi meski terjadi fluktuasi intensitas. Sebaliknya, solar flat mengalami efisiensi yang tidak stabil, dengan periode tanpa produksi energi di pagi atau sore hari.



GAMBAR. 3

GAMBAR. 7

GRAFIK PERBANDINGAN WH/LUX DALAM SATU HARI

F. Evaluasi Umum

Dari hasil lima hari pengujian, sistem solar tracker berbasis fuzzy menunjukkan performa optimal, konsisten, dan responsif terhadap perubahan pencahayaan. Solar flat unggul dari sisi kesederhanaan dan biaya, namun memiliki efisiensi rendah dan rentan terhadap posisi matahari.

Rata-rata efisiensi sistem solar tracker selama lima hari mencapai 29,87%, dengan peningkatan tertinggi pada Hari ke-3 sebesar 42,61%. Hal ini menegaskan bahwa kontrol fuzzy memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan penyerapan energi pada kondisi dinamis.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis efisiensi sistem panel surya antara Solar Tracker dan Solar Flat, dapat disimpulkan beberapa poin utama sebagai berikut Solar Tracker menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dan konsisten dibandingkan Solar Flat, dengan rata-rata efisiensi konversi energi (Wh/Lumens) mencapai 55–80% sepanjang hari. Solar Flat cenderung memiliki efisiensi yang fluktuatif dan lebih rendah, berkisar antara 10–45%, serta menunjukkan penurunan tajam pada waktu-waktu tertentu ketika sudut datang cahaya tidak optimal. Dari sisi keandalan dalam memaksimalkan penyiaran matahari, Solar Tracker lebih adaptif terhadap perubahan posisi matahari, sedangkan Solar Flat bersifat pasif dan hanya efektif dalam waktu terbatas. Namun, Solar Flat memiliki keunggulan dari sisi biaya dan kesederhanaan, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang tidak memerlukan efisiensi tinggi dan anggaran terbatas.

REFERENSI

- AL-Rousan, N., Mat Isa, N. A., & Mat Desa, M. K. (2020). Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(7), 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.004>
- Chowdhury, M. E. H., Khandakar, A., Hossain, B., & Abouhasera, R. (2019). A low-cost closed-loop solar tracking system based on the sun position algorithm. *Journal of Sensors*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3681031>
- Darwin, D., Panjaitan, A., & Suwarno, S. (2020). Analisa pengaruh Intesitas Sinar Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Sel Surya Jenis Monokristal. *Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, 1(2), 99–106. <https://doi.org/10.53695/jm.v1i2.105>
- Fauzi, K. W., Arfianto, T., & Taryana, N. (2018). Perancangan dan Realisasi Solar Tracking System Untuk Peningkatan Efisiensi Panel Surya Menggunakan Arduino Uno. *TELKA - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi Dan Kontrol*, 4(1), 63–74. <https://doi.org/10.15575/telka.v4n1.63-74>
- Hasrul, R. (2021). Sistem Pendinginan Aktif Versus Pasif Di Meningkatkan Output Panel Surya. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 5(2), 79–87. <https://journal.unilak.ac.id/index.php/SainETIn/index>
- Kambalimath, S., & Deka, P. C. (2020). A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources. In *Applied Water Science* (Vol. 10, Issue 8). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01276-2>
- Kumar, K., Varshney, L., Ambikapathy, A., Saket, R. K., & Mekhilef, S. (2021). Solar tracker transcript—A review. In *International Transactions on Electrical Energy Systems* (Vol. 31, Issue 12). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13250>
- Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., Meiirkhanov, A., & Svanbayev, Y. (2020). Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions. *Energies*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/en13195226>
- Mahroni, & Supriyatna, D. (2024). Energi Baru Terbarukan dalam Pembangunan yang Berkelanjutan dan Pemanfaatan Energi Terbarukan. *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, 2(11), 66–76.
- Mayasari, F., Arya Samman, F., Muslimin, Z., Waris, T., Ejah Umraeni Salam, A., Chaerah Gunadin, I., Sari Areni, I., Syam Akil, Y., Rachmaniar Sahali, I., & Budi Arief, A. (2022). Pengenalan Panel Surya sebagai Salah Satu Sumber Energi Terbarukan untuk Pembelajaran di SMA Negeri 1 Takalar. In *Jurnal Tepat (Teknologi Terapan Untuk Pengabdian Masyarakat)* (Vol. 5, Issue 2).
- Mohd Said, M. N. A., Jumaat, S. A., & Jawa, C. R. A. (2020). Dual axis solar tracker with iot monitoring system using arduino. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(1), 451–458. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i1.pp451-458>
- Nisa, K., & Alfanani, R. H. (2022). Analisis Efisiensi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Hybird Panel Surya Dan Mikro Hidro Di Taman Airlangga Desa Pataan Kecamatan Sambeng Kabupaten *Nucleus Journal*, 29–36. <https://ejournal.undar.or.id/index.php/Nucleus/article/view/39>
- Panel Surya dengan Sistem Pelacakan Arah Sinar Matahari. (n.d.).
- Seme, S., Štumberger, B., Hadžiselimović, M., & Sredenšek, K. (2020). Solar photovoltaic tracking systems for electricity generation. In *Energies* (Vol. 13, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13164224>
- Yusri, K., Yusoff, B. M., Uddin, S. M., Izhar, M., & Bakar, A. (2022). Development of a Portable Solar Generator. *Journal of Engineering Technology*, 10(1), 82–92.
- Zhu, Y., Liu, J., & Yang, X. (2020). Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy*, 264, 114647. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114647>