

PERBANDINGAN DAYA PADA *TRACKING* PANEL SURYA *DUAL AXIS* MENGGUNAKAN METODE *FUZZY*

¹Anggi Putri Faradifa, ²Awan Uji Krismanto, ³Alfarid Hendro Yuwono
^{1,2,3}Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia

¹faradifap@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³alfaridhendroyuwono@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Dalam upaya meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya, penelitian ini merancang dan menganalisis sistem *solar tracker dua axis* menggunakan metode *fuzzy*. Sistem ini bertujuan untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari dengan cara menggerakkan panel surya secara otomatis mengikuti arah datangnya cahaya berdasarkan data intensitas dari empat sensor LDR. Proses kontrol dilakukan melalui sistem inferensi *fuzzy* yang mencakup tahapan fuzzifikasi, evaluasi aturan if then, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan sinyal kendali motor penggerak. Selain itu, dilakukan perbandingan unjuk kerja antara metode *fuzzy* dan pid dengan parameter berupa tegangan, arus, dan daya yang dikirim secara realtime ke platform *thingspeak* melalui esp32. Hasil pengujian selama empat hari menunjukkan bahwa sistem dengan metode *fuzzy* menghasilkan daya yang lebih tinggi dan stabil dibandingkan dengan metode pid. Sistem *fuzzy* juga menunjukkan respon yang lebih adaptif terhadap perubahan intensitas cahaya, hal ini menjadikan metode *fuzzy* lebih unggul dalam pengelolaan daya pada sistem solar tracking. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total energi yang dihasilkan metode *fuzzy* sebesar 1.908 Wh sedangkan energi total yang dihasilkan metode pid sebesar 1.497 Wh. Hal ini menunjukkan metode *fuzzy* lebih unggul.

Kata Kunci: Kendali *solar tracker*, Efisiensi energi surya, Logika *fuzzy*, Logika pid

I. PENDAHULUAN

Energi listrik menjadi kebutuhan utama dalam menunjang aktivitas sehari-hari. Seiring dengan proyeksi pertumbuhan ekonomi Indonesia yang mencapai 7% hingga 10% per tahun, kebutuhan listrik nasional pun mengalami lonjakan signifikan dan diperkirakan mencapai sekitar 430 TWh pada tahun 2025. Penggunaan bahan bakar fosil secara berlebihan dan terus-menerus sebagai sumber utama energi turut berkontribusi besar terhadap perubahan iklim global.[1]

Untuk mengurangi dampak perubahan iklim akibat penggunaan bahan bakar fosil secara masif, diperlukan inovasi melalui pemanfaatan sumber energi baru terbarukan. Sesuai dengan kebijakan energi nasional, pemanfaatan energi

terbarukan menjadi solusi penting dalam memenuhi kebutuhan listrik tambahan secara signifikan dan tetap ramah lingkungan. Salah satu bentuk energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).[2]

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkitan listrik yang bekerja dengan mengonversi energi sinar matahari menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaiik. Efek fotovoltaiik sendiri adalah fenomena fisik di mana permukaan panel surya yang terkena cahaya matahari akan mengubah energi cahaya tersebut menjadi energi listrik.[3]

Penggunaan sistem solar tracker dua sumbu (*dual axis*) diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dalam menangkap sinar matahari, sehingga energi yang dihasilkan menjadi lebih optimal. Hal ini karena panel surya dapat bergerak ke dua arah, yaitu vertikal dan horizontal, mengikuti pergerakan matahari sepanjang hari.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat dirumuskan dari permasalahan ini yaitu bagaimana perbandingan unjuk kerja *solar tracker dual axis* dengan menggunakan dua metode serta mengetahui peningkatan performa dari *solar tracker dual axis* yang menerapkan metode *fuzzy*.

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis unjuk kerja *solar tracker dual axis* yang dikendalikan menggunakan metode logika *fuzzy* dan metode PID, serta untuk meningkatkan akurasi pelacakan arah datangnya matahari dan memaksimalkan efisiensi penyerapan energi matahari melalui penerapan metode logika *fuzzy*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan metode pengendalian yang lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Solar Tracking

Solar tracking merupakan sistem yang dirancang untuk mengarahkan posisi panel surya agar selalu tegak lurus terhadap sinar matahari sepanjang hari. Tujuan utama dari sistem ini adalah untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari oleh panel surya, sehingga daya listrik yang dihasilkan menjadi lebih besar dan efisien dibandingkan dengan panel yang diam (*fixed*). [4] Solar tracking terbagi menjadi dua jenis, antara lain:

1. Single Axis

Solar tracking single axis merupakan sistem pelacak matahari yang menggerakkan panel hanya pada satu sumbu, yaitu vertical atau horizontal. Sistem ini bekerja menggunakan sensor cahaya untuk mendeteksi perbedaan intensitas cahaya dari dua arah, yang kemudian akan diolah oleh mikrokontroler untuk mengatur pergerakan motor. Dengan mengikuti posisi matahari, sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya oleh panel surya dan menghasilkan daya listrik yang lebih optima dibandingkan panel yang tidak menggunakan sistem tracking.[5]

Namun, sistem single axis ini memiliki kekurangan jika dibandingkan dengan sistem dual axis. Karena hanya bergerak pada satu arah, sistem ini tidak dapat menyesuaikan posisi panel terhadap perubahan ketinggian matahari, sehingga efisiensinya berkurang. Selain itu, sistem ini juga kurang efektif di wilayah lintang tinggi yang mengalami perubahan posisi matahari lebih drastis. Walaupun lebih sederhana dan hemat biaya, potensi peningkatan daya pada sistem ini tetap lebih rendah daripada sistem dual axis yang lebih fleksibel dalam menangkap energi matahari.[6]

2. Dual axis

Solar tracking dual axis adalah sistem tracking yang memungkinkan panel surya dapat bergerak pada dua sumbu yaitu horizontal dan vertical. Dengan kemampuan ini, panel surya dapat secara otomatis mengikuti posisi matahari secara lebih presisi. Keunggulan utama dari sistem ini adalah efisiensi penyerapan cahaya matahari jauh lebih tinggi dibandingkan sistem single axis. Dengan mengikuti pergerakan matahari dari dua arah, sistem ini mampu meningkatkan output daya listrik hingga 35% lebih besar.[7]

B. Logika Fuzzy

Metode ini menggunakan prinsip logika fuzzy untuk menangani data yang tidak pasti atau ambigu, seperti perbedaan intensitas cahaya. Fuzzy logic memungkinkan panel surya bergerak secara halus dan adaptif berdasarkan kondisi pencahayaan dari empat arah.[8] Sistem inferensi fuzzy merupakan suatu kerangka kerja komputasi yang didasarkan pada teori himpunan fuzzy, aturan fuzzy dalam bentuk if-then, dan penalaran fuzzy. Sistem inferensi fuzzy memproses input yang berupa crisp, selanjutnya masukan ini dikirimkan ke basis pengetahuan yang memuat aturan fuzzy dalam bentuk if-then. Selanjutnya, pada hasil agregasi akan

dilakukan defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai crisp sebagai output sistem.

C. Kontrol PID

Dalam sistem solar tracker, kontrol PID digunakan untuk mengatur posisi motor agar panel surya dapat mengikuti arah datangnya cahaya matahari dengan presisi tinggi. Nilai error atau selisih antara posisi panel saat ini dan posisi ideal akan diproses menggunakan rumus PID untuk menghasilkan sinyal kendali yang optimal. Kekurangan dari kontrol PID adalah tidak adaptif terhadap perubahan lingkungan, tidak efektif dalam menghadapi noise dan data yang tidak pasti, dan tidak mampu mengambil keputusan berdasarkan logika.

D. Perhitungan Energi Total

Untuk menghitung total energi listrik yang dihasilkan oleh sistem dalam periode waktu penelitian digunakan rumus sebagai berikut [9]:

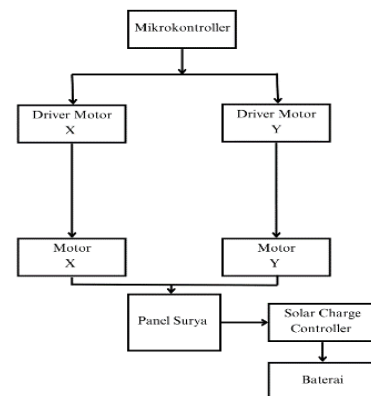
$$E_{\text{total}} = \sum P \times \Delta t \quad (1)$$

dimana,

$\sum P$ adalah jumlah dari seluruh nilai daya
 Δt adalah selang waktu antar pengukuran

III. METODOLOGI PENELITIAN

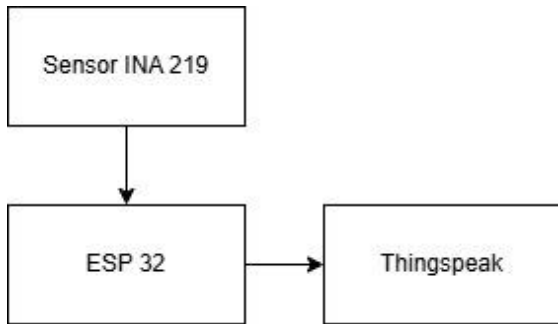
A. Diagram Blok Solar Tracker



Gambar 1. Diagram Blok Solar Tracker

Pada gambar 1, sensor LDR berperan sebagai pendeteksi intensitas cahaya matahari. Selain itu, sensor INA219 digunakan untuk mengukur besar tegangan serta arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Dari kedua data tersebut, nilai daya listrik dapat dihitung menggunakan rumus $P = V \times I$. Seluruh data sensor kemudian dikirim ke *mikrokontroler*, yang akan memproses informasi tersebut untuk menentukan gerak optimal dari panel surya. *Mikrokontroler* juga bertugas mengirimkan sinyal ke *driver motor*, yang akan menggerakkan motor sehingga panel dapat menyesuaikan posisinya mengikuti arah cahaya matahari. Gerakan motor dilakukan pada sumbu vertikal dan horizontal, agar panel selalu sejajar dengan arah datangnya matahari.

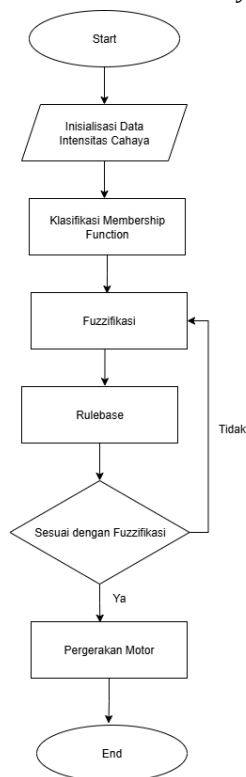
B. Diagram Blok Sistem Monitoring



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Monitoring

Pada gambar 2, sistem monitoring IoT yang memanfaatkan sensor INA219 dan menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk mengirimkan data ke platform ThingSpeak. Dalam sistem ini, INA219 berperan dalam mengukur parameter kelistrikan seperti arus, tegangan, dan daya. ESP32 berfungsi sebagai unit pemrosesan utama yang juga bertugas mengirim data ke jaringan internet. Setelah menerima data dari INA219, ESP32 akan memproses dan mengunggah informasi tersebut ke ThingSpeak melalui koneksi WiFi. ThingSpeak merupakan platform berbasis cloud yang digunakan untuk menyimpan dan menampilkan data secara *realtime*.

C. Flowchart Sistem Kendali Fuzzy



Gambar 3. Flowchart Sistem Fuzzy

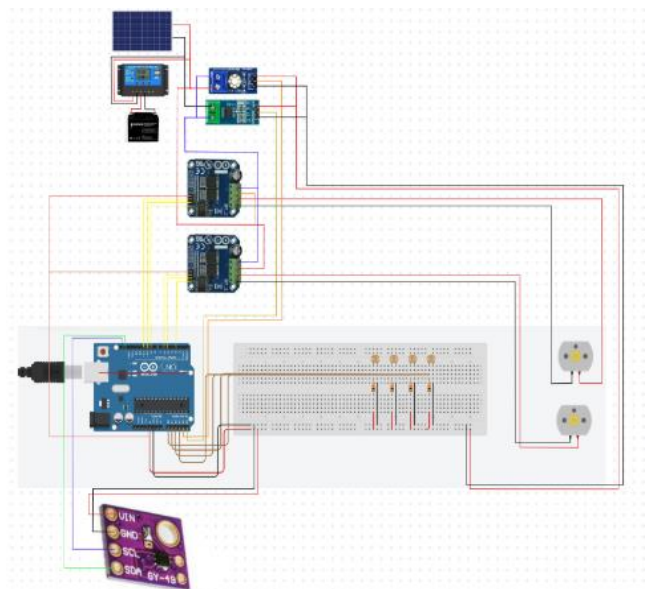
Pada gambar 3, proses dimulai dengan melakukan inisialisasi sistem. Setelah itu, sistem akan menjalankan tugasnya, yaitu membaca intensitas cahaya dari sensor LDR.

Nilai yang diperoleh dari sensor ini digunakan sebagai input untuk proses klasifikasi dalam sistem logika *fuzzy*. Data yang diterima akan dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan yang menentukan sejauh mana suatu nilai masuk ke dalam kategori tertentu.

Dalam tahap ini, nilai crisp dari input dikonversi menjadi nilai *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Selanjutnya, sistem menggunakan basis aturan *fuzzy* (*rule base*) yang berbentuk logika IF – THEN untuk menentukan tindakan yang harus diambil. Sistem akan mengevaluasi terhadap hasil inferensi *fuzzy* untuk menentukan apakah tindakan yang dihasilkan sudah sesuai. Jika hasilnya belum sesuai, maka sistem akan mengulangi proses fuzzifikasi dengan menggunakan data sensor terbaru, atau menunggu hingga nilai sensor diperbarui. Namun, apabila hasil inferensi dianggap sesuai, maka sistem akan melanjutkan ke tahap berikutnya yaitu menggerakkan motor.

Berdasarkan nilai yang diperoleh dari proses defuzzifikasi, sistem akan mengendalikan motor sumbu X dan Y untuk menyesuaikan posisi panel surya, panel akan diarahkan ke posisi terbaik agar dapat menangkap sinar matahari secara maksimal. Seluruh proses ini dilakukan secara berulang dan berkala, sehingga posisi panel terus disesuaikan dengan perubahan arah matahari sepanjang waktu.

D. Skematik Rangkaian Solar Tracker



Gambar 4. Skematik Solar Tracker

Pada gambar 4, yaitu gambar skematik solar tracker terdapat beberapa komponen yang saling terhubung, antara lain:

1. Mikrokontroler

Digunakan sebagai komponen utama dalam sistem yang bekerja sebagai otak, sehingga Arduino akan melanjutkan program yang telah disusun.

2. Sensor LDR

Digunakan untuk membaca intensitas cahaya dari arah yang berbeda – beda. Sensor LDR terhubung dengan pin A0, A1, A2, dan A3.

3. Driver Motor L298N

Driver motor mengontrol dua motor, yaitu motor X dan Y. driver motor X terhubung pada pin 9, pin 10, dan pin 11. Sedangkan driver motor Y terhubung dengan pin 3, pin 5 dan pin 6 pada Arduino nano.

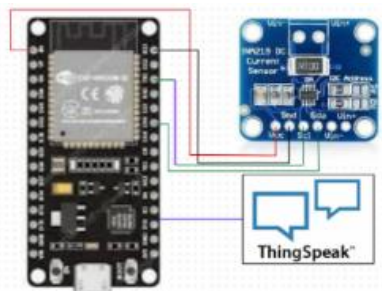
4. Sensor intensitas cahaya GY – 49

Sensor intensitas cahaya terhubung secara I2C pada pin SCL dan SDA Arduino nano. Sensor ini berfungsi untuk memberikan nilai lux secara numerik.

5. Baterai yang terhubung dengan Solar Charge Controller

Dalam rangkaian ini baterai dihubungkan dengan SCC untuk mengelola proses pengisian energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. SCC berfungsi sebagai pengatur arus dan tegangan dari panel sebelum dialirkan ke baterai sehingga mencegah terjadinya *overcharging*.

E. Skematik rangkaian sistem monitoring



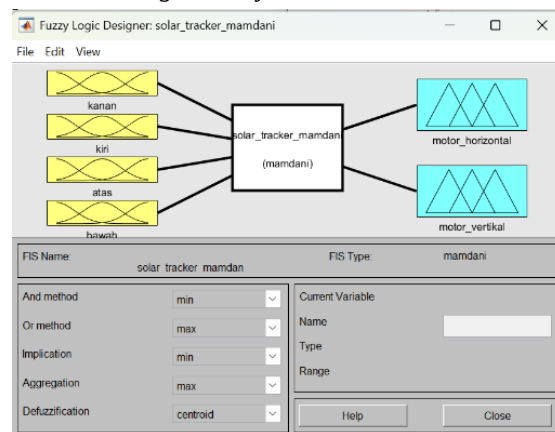
Gambar 5. Skematik Rangkaian Monitoring

Gambar 5 merupakan skematik rangkaian dari sistem monitoring, dimana ada 2 komponen yang terhubung pada platform *ThingSpeak*, antara lain:

1. ESP32 berfungsi sebagai *mikrokontroller* utama dalam sistem monitoring dan sekaligus berfungsi sebagai pusat pemrosesan data. Data yang diperoleh dari sensor akan diolah oleh ESP32 sebelum dikirimkan ke *platform cloud ThingSpeak*.
2. Sensor INA219 digunakan untuk mengukur parameter kelistrikan, yaitu arus dan tegangan. Nilai pengukuran ini akan diteruskan ke ESP32 dan kemudian ditampilkan secara *realtime* melalui *platform ThingSpeak*.
3. *ThingSpeak* berfungsi sebagai media penyimpanan dan analisis data secara online. Platform ini memungkinkan pengguna untuk memantau data arus dan tegangan dari jarak jauh secara *realtime* dalam bentuk grafik atau tabel.[10]

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Perancangan Fuzzy



Gambar 6. Perancangan Fuzzy

Gambar 6 terdapat empat inputan yaitu kanan, kiri, atas, dan bawah, yang masing – masing mewakili nilai intensitas cahaya dari arah yang berbeda. Input tersebut berasal dari sensor LDR, dan masing – masing input memiliki fungsi keanggotaan yang digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat intensitas cahaya, seperti gelap, normal, dan terang. Sistem ini juga memiliki dua output, yaitu *motor horizontal* dan *motor vertical*, yang berfungsi untuk menggerakkan panel surya ke arah horizontal (kanan-kiri) dan vertical (atas-bawah).

Fungsi keanggotaan pada output ini ditampilkan dalam bentuk kurva segitiga, yang menunjukkan level pergerakan motor berdasarkan kondisi cahaya yang diterima. Metode logika fuzzy yang digunakan adalah tipe *mamdani*, yang menggunakan pendekatan linguistic IF-THEN untuk menentukan keluaran berdasarkan kondisi input. Sistem ini diatur menggunakan metode logika fuzzy dengan pengaturan AND method menggunakan minimum (min), OR method menggunakan maksimum (max), serta metode defuzzifikasi centroid yang bertujuan mengubah nilai fuzzy menjadi nilai tegas (crisp) untuk mengendalikan pergerakan motor. Kombinasi logika ini memungkinkan sistem untuk mengontrol posisi panel surya dengan lebih adaptif dan responsive terhadap perubahan intensitas cahaya dari empat arah secara *realtime*.

B. Pembuatan Rule Base

Command Window	
1. If (kanan is gelap) and (kiri is terang) then (motor_horizontal is kiri_kuat) (1)	
2. If (kanan is gelap) and (kiri is normal) then (motor_horizontal is kiri_lemah) (1)	
3. If (kanan is normal) and (kiri is terang) then (motor_horizontal is kiri_lemah) (1)	
4. If (kanan is terang) and (kiri is gelap) then (motor_horizontal is kanan_kuat) (1)	
5. If (kanan is terang) and (kiri is normal) then (motor_horizontal is kanan_lemah) (1)	
6. If (kanan is normal) and (kiri is gelap) then (motor_horizontal is kanan_lemah) (1)	
7. If (kanan is normal) and (kiri is normal) then (motor_horizontal is diam) (1)	
8. If (kanan is terang) and (kiri is terang) then (motor_horizontal is diam) (1)	
9. If (kanan is gelap) and (kiri is gelap) then (motor_horizontal is diam) (1)	
10. If (atas is gelap) and (bawah is terang) then (motor_vertikal is bawah_kuat) (1)	
11. If (atas is gelap) and (bawah is normal) then (motor_vertikal is bawah_lemah) (1)	
12. If (atas is normal) and (bawah is terang) then (motor_vertikal is bawah_lemah) (1)	
13. If (atas is terang) and (bawah is gelap) then (motor_vertikal is atas_kuat) (1)	
14. If (atas is terang) and (bawah is normal) then (motor_vertikal is atas_lemah) (1)	
15. If (atas is normal) and (bawah is gelap) then (motor_vertikal is atas_lemah) (1)	
16. If (atas is normal) and (bawah is normal) then (motor_vertikal is diam) (1)	
17. If (atas is gelap) and (bawah is gelap) then (motor_vertikal is diam) (1)	
18. If (atas is terang) and (bawah is terang) then (motor_vertikal is diam) (1)	

Gambar 7. Perancangan Rule Base

Gambar 7 menunjukkan 18 aturan logika fuzzy (rule base) yang diterapkan pada sistem kendali solar tracker dual axis

menggunakan metode mamdani. Aturan – aturan ni berfungsi untuk mengatur pergerakan dua motor, dan berdasarkan intensitas cahaya yang diterima dari empat arah. Aturan nomor 1 hingga 9 digunakan untuk menentukan arah pergerakan motor horizontal. Sistem akan menggerakkan panel ke kiri atau ke kanan berdasarkan perbandingan intensitas cahaya dari arah kanan dan kiri. Jika cahaya dari arah kanan lebih rendah (gelap) dan dari kiri lebih terang, maka motor akan digerakkan ke kiri dengan kecepatan tinggi. sebaliknya, jika arah kanan lebih terang dan kiri lebih gelap, maka motor akan digerakkan ke kanan. Apabila intensitas cahaya dari kedua arah relative sama, maka motor tidak akan bergerak dan posisi panel tetap diam.

Sementara itu, aturan nomor 10 hingga 18 mengatur motor vertikal berdasarkan intensitas cahaya dari arah atas dan bawah. Jika sensor mendeteksi bahwa arah atas lebih gelap dan arah bawah lebih terang, maka motor akan bergerak ke bawah untuk menyesuaikan posisi panel. Sebaliknya, jika arah atas lebih terang dibandingkan bawah, maka panel akan diarahkan ke atas. Sama seperti pada motor horizontal, jika intensitas cahaya dari atas dan bawah seimbang, maka panel tidak bergerak dan tetap diam. Dengan struktur aturan seperti ini, sistem fuzzy dapat mengontrol posisi panel surya secara otomatis dan adaptif sesuai dengan kondisi pencahayaan lingkungan, sehingga panel selalu menghadap ke arah yang paling optimal dalam menerima sinar matahari.

C. Rule Viewer Fuzzy Logic



Gambar 8. Tampilan Rule Viewer

Pada gambar 8, terdapat empat input utama, yaitu sensor cahaya dari arah kanan, kiri, atas, dan bawah, yang masing-masing diberi nilai 5. Nilai ini merepresentasikan kondisi intensitas cahaya yang netral atau sedang dan seimbang dari semua arah.

Setiap kolom input memiliki garis vertikal berwarna merah yang menunjukkan nilai actual input, sedangkan area berwarna kuning menunjukkan derajat keanggotaan dari nilai tersebut terhadap kategori fuzzy seperti gelap, normal, atau terang. Di bagian tengah tampilan, terdapat 18 aturan fuzzy (rule base) yang diatur dari baris 1 hingga 18. Warna kuning yang muncul pada beberapa baris aturan menunjukkan bahwa aturan tersebut aktif, karena kondisi IF dalam aturan tersebut terpenuhi oleh nilai input yang diberikan.

Output dari sistem ditampilkan pada dua kolom paling kanan, yaitu motor_horizontal dan motor_vertikal. Grafik berwarna biru pada bagian output menunjukkan hasil proses agregasi dari semua aturan aktif, sedangkan segitiga biru

menandakan hasil akhir dari proses defuzzifikasi, yaitu nilai crisp yang akan digunakan untuk menggerakkan motor. Dalam kondisi ini, nilai output sangat kecil dan mendekati nol, yang berarti sistem tidak memberikan perintah Gerakan, baik ke motor horizontal maupun vertikal. Artinya, posisi panel surya dianggap sudah optimal dan tegak lurus terhadap sinar matahari, sehingga tidak diperlukan penyesuaian arah panel.

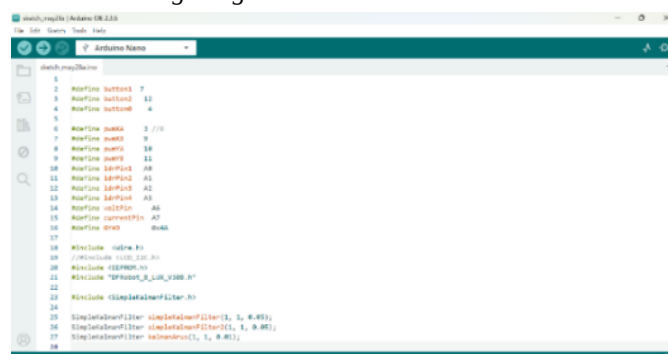
D. Perancangan PID



Gambar 9. Pengambilan Data Tracker

Pada gambar 9, objek yang dikendalikan atau plant adalah motor DC yang menggerakkan panel surya agar selalu sejajar dengan arah datangnya cahaya matahari. Masukan dari sistem berupa sinyal PWM yang dikirimkan Arduino ke motor driver, sedangkan keluarannya adalah sudut panel yang diperoleh secara tidak langsung melalui pembacaan sensor cahaya. dengan demikian, error didefinisikan sebagai perbedaan intensitas cahaya yang ditangkap oleh sensor LDR yang berlawanan arah, misalnya antara LDR kanan kiri untuk sumbu X, atau KDR atas bawah untuk sumbu Y.

E. Coding Program Arduino



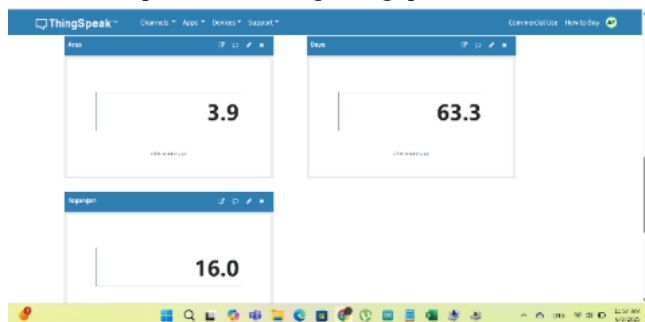
Gambar 10. Coding Arduino

Dalam gambar 10, program yang ditampilkan merupakan sistem kendali solar tracker dual axis yang menggunakan logika fuzzy tipe mamdani. Tujuan utama dari sistem ini adalah untuk menggerakkan panel surya secara otomatis mengikuti arah datangnya cahaya matahari, sehingga daya listrik yang dihasilkan dapat dimaksimalkan. Sistem ini mengandalkan empat sensor LDR yang masing-masing berfungsi untuk mendeteksi intensitas cahaya dari kanan, kiri, atas, dan bawah. Selisih nilai pembacaan sensor dari arah vertikal dan horizontal akan digunakan untuk menentukan arah gerakan panel surya secara optimal.

Agar hasil pembacaan sensor lebih akurat dan tidak terpengaruh oleh noise atau fluktuasi sinyal, nilai eror yang dihitung dari perbedaan intensitas cahaya akan difilter terlebih

dahulu dengan menggunakan Kalman filter. Selanjutnya, sistem menerapkan logika fuzzy tipe mamdani untuk memproses nilai eror tersebut dan menghasilkan output berupa nilai PWM yang digunakan untuk mengontrol kecepatan dan arah putaran motor penggerak. Logika fuzzy dalam sistem ini menggunakan fungsi keanggotaan untuk mengelompokkan nilai eror ke dalam beberapa kategori linguistic. Proses fuzzy mencakup tiga tahap utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi berdasar rule base, dan defuzzifikasi yang dilakukan dengan metode weight average untuk menghasilkan nilai output yang sesuai bagi kendali motor.

F. Tampilan Monitoring ThingSpeak

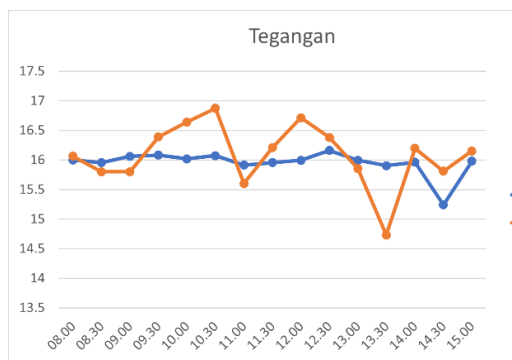


Gambar 11. Monitoring ThingSpeak

Gambar 11 merupakan tampilan monitoring antarmuka dari platform ThingSpeak yang digunakan untuk menampilkan data sensor secara realtime. Pada tampilan diatas terdapat tiga panel utama yang menunjukkan parameter listrik, yaitu ateganagn, arus, dan daya.

G. Grafik Hasil Pengambilan Data

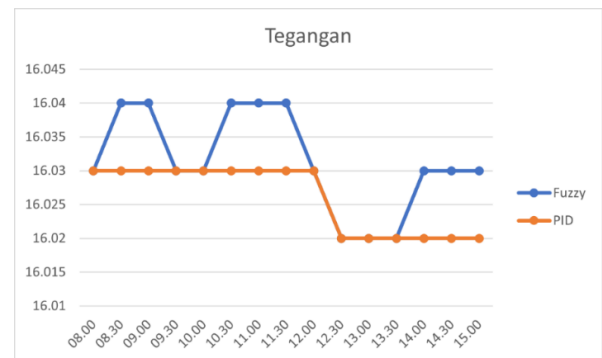
- Grafik Tegangan



Gambar 12. Grafik Senin 19 Mei 2025

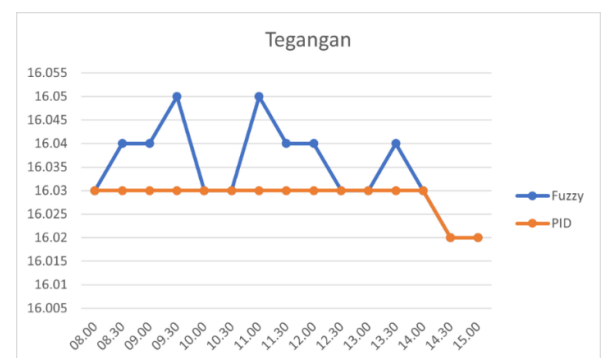
Pada gambar 12, grafik memperlihatkan perbandingan tegangan output panel surya dengan sistem tracking berbasis metode fuzzy dan PID pada rentang waktu 08.00 hingga 15.00. Secara umum, keduanya menghasilkan tegangan stabil di kisaran 16,02 hingga 16,04 volt. Dari pukul 08.00 hingga 13.30, tegangan yang dihasilkan hampir sama dengan selisih yang sangat kecil. Secara keseluruhan, kedua metode menunjukkan kinerja tegangan yang stabil dengan fluktuasi

minimal, sehingga mencerminkan pengendalian sistem yang baik dari sisi output tegangan.



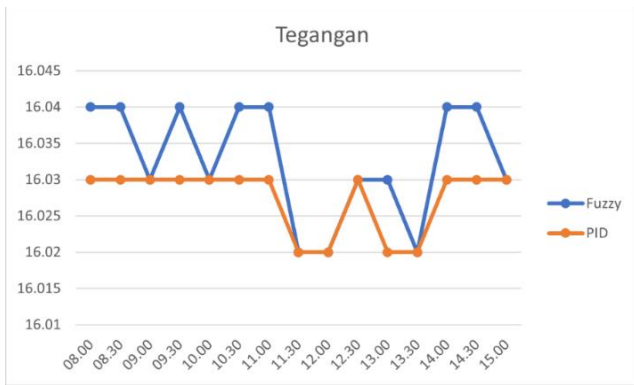
Gambar 13. Grafik Selasa, 20 Mei 2025

Berdasarkan gambar 13, grafik metode fuzzy menunjukkan tegangan yang sedikit berfluktuasi di rentang 16,03 – 16,04 volt sebagai respon adaptif terhadap perubahan intensitas cahaya. Sebaliknya, sistem PID relative stabil di 16,03 volt hingga pukul 12.00, namun menurun ke 16,02 volt setelah pukul 12.30 hingga 15.00. Hal ini menandakan bahwa fuzzy lebih dinamis dalam menjaga kestabilan tegangan dibandingkan PID, yang cenderung statis namun kurang mampu mempertahankan output pada siang hingga sore hari.



Gambar 14. Grafik Rabu, 21 Mei 2025

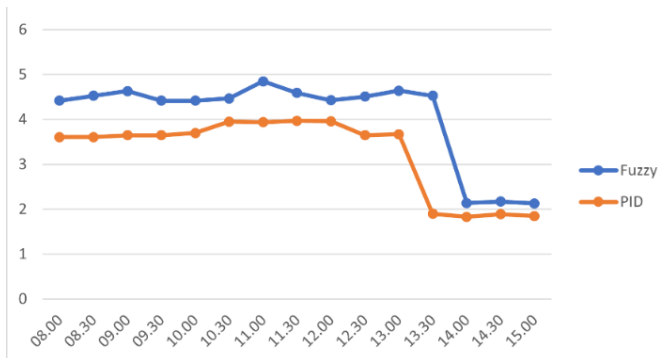
Gambar 14, menunjukkan bahwa metode Fuzzy menghasilkan tegangan yang sedikit berfluktuasi pada kisaran 16,03–16,05 volt sebagai bentuk penyesuaian terhadap intensitas cahaya matahari. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 16,05 volt pada pukul 10.00 dan 11.00, kemudian perlahan menurun. Sementara itu, metode PID menjaga tegangan konstan di 16,03 volt dari pukul 08.00 hingga 13.30, lalu turun menjadi 16,02 volt pada pukul 14.30 hingga 15.00. Hal ini membuktikan bahwa metode Fuzzy lebih adaptif dalam menyesuaikan tegangan dengan kondisi pencahayaan



Gambar 15. Grafik Kamis, 22 Mei 2025

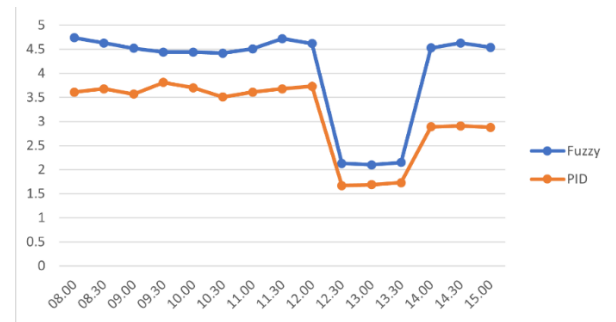
Gambar 15 menunjukkan bahwa metode Fuzzy menghasilkan tegangan pada kisaran 6,02–16,04 volt dengan sedikit fluktuasi, menandakan adanya penyesuaian aktif terhadap perubahan intensitas cahaya matahari. Pada metode PID, tegangan relatif stabil di angka 16,03 volt, tetapi sempat menurun hingga 16,02 volt pada pukul 12.00, 13.00, dan 13.30, sebelum kembali stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa metode Fuzzy lebih adaptif dalam menjaga kestabilan tegangan sesuai kondisi pencahayaan, sedangkan PID cenderung stabil namun kurang tanggap terhadap perubahan cahaya di siang hingga sore hari.

- Grafik Arus



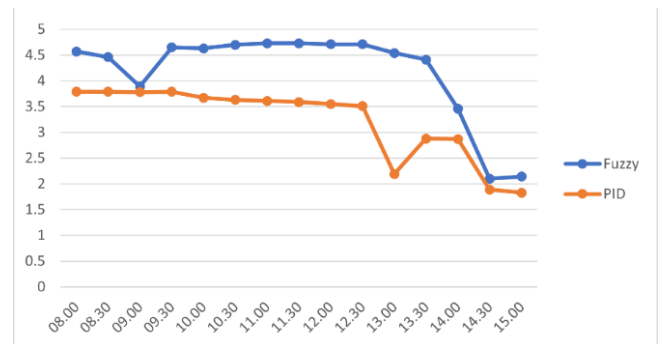
Gambar 16. Grafik Senin, 19 Mei 2025

Pada gambar 16, memperlihatkan perbandingan arus antara metode Fuzzy dan PID dari pukul 08.00 hingga 15.00. Sistem dengan metode Fuzzy menunjukkan arus yang relatif lebih tinggi dan stabil pada kisaran 4,4–4,9 ampere hingga pukul 13.30, kemudian turun drastis hingga sekitar 2,1 ampere. Sebaliknya, metode PID menghasilkan arus lebih rendah dan stabil di kisaran 3,6–4,0 ampere, sebelum juga mengalami penurunan tajam menjadi sekitar 1,9 ampere setelah pukul 13.30. Secara umum, metode Fuzzy mampu memberikan arus yang lebih besar dan lebih stabil dibandingkan PID hingga periode tertentu.



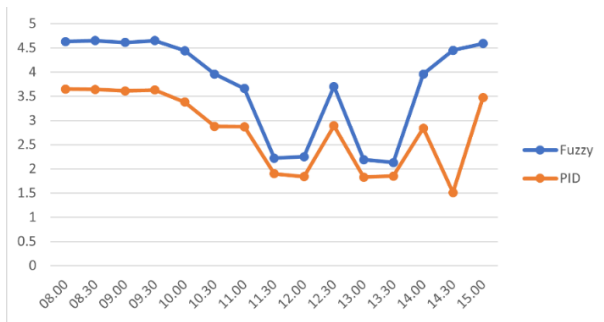
Gambar 17. Grafik Selasa, 20 Mei 2025

Pada gambar 17, grafik menunjukkan bahwa sistem dengan metode Fuzzy menghasilkan arus pada kisaran 4,4–4,7 ampere dan tetap stabil hingga sekitar pukul 12.30. Setelah itu, arus turun tajam hingga 2,1 ampere selama sekitar satu jam, lalu kembali meningkat dan stabil di sekitar 4,5 ampere mulai pukul 14.00. Pada metode PID, arus yang dihasilkan lebih rendah, berada pada kisaran 3,5–3,8 ampere sebelum pukul 12.30, kemudian turun drastis hingga 1,8 ampere, dan naik kembali stabil di sekitar 2,9 ampere setelah pukul 14.00. Hal ini menunjukkan bahwa metode Fuzzy menghasilkan arus lebih tinggi serta mampu pulih lebih cepat setelah terjadi penurunan, sedangkan metode PID cenderung menghasilkan arus lebih rendah dengan pemulihan yang lebih lambat.



Gambar 18. Grafik Rabu, 21 Mei 2025

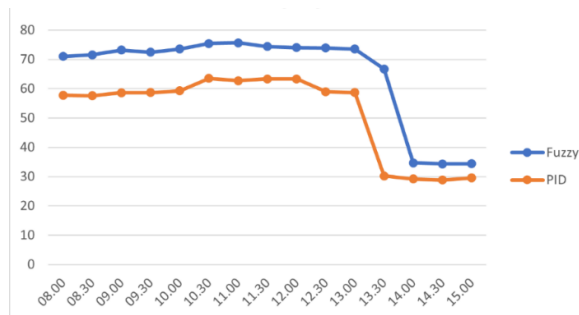
Berdasarkan gambar 18, menunjukkan bahwa sistem dengan metode Fuzzy menghasilkan arus yang relatif stabil dan tinggi, berada pada kisaran 4,4–4,7 ampere hingga pukul 13.00. Setelah itu, arus menurun cukup signifikan hingga mencapai sekitar 2,0 ampere pada pukul 15.00. Sementara itu, metode PID menghasilkan arus lebih rendah dan relatif konstan di kisaran 3,6–3,8 ampere hingga pukul 12.30, kemudian turun drastis menjadi sekitar 2,2 ampere pada pukul 13.00, sempat meningkat kembali pada pukul 13.30–14.00, sebelum akhirnya kembali turun hingga 1,8 ampere. Secara keseluruhan, metode Fuzzy mampu menjaga arus lebih tinggi dan stabil dibandingkan PID sebelum pukul 13.00, dan meskipun keduanya mengalami penurunan setelahnya, sistem Fuzzy tetap memberikan performa arus yang lebih baik.



Gambar 19. Grafik Kamis, 22 Mei 2025

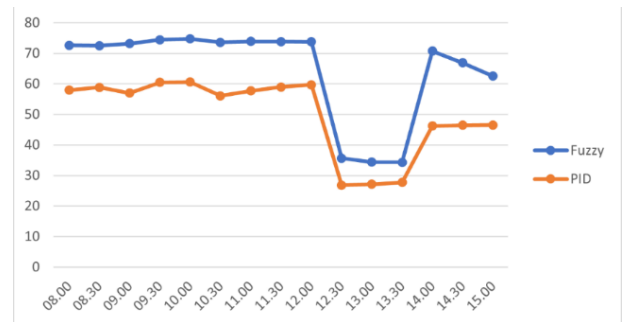
Berdasarkan gambar 19 menunjukkan bahwa sistem dengan metode Fuzzy mampu menghasilkan arus yang lebih tinggi pada beberapa periode, meskipun disertai penurunan tajam di waktu tertentu. Sebaliknya, metode PID terlihat lebih konsisten, meskipun arus maksimum yang dihasilkan tidak setinggi Fuzzy. Hal ini mengindikasikan bahwa kontrol Fuzzy memiliki respon yang lebih cepat terhadap perubahan intensitas cahaya, namun tingkat variabilitasnya lebih besar dibandingkan dengan PID

- Grafik Daya



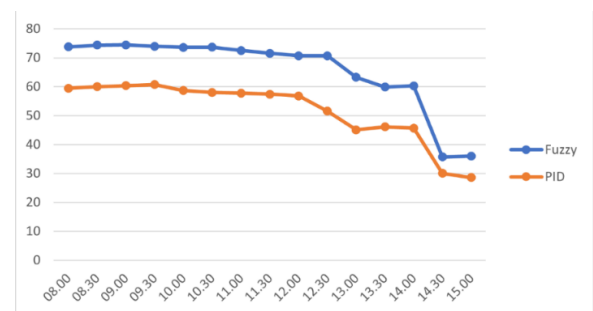
Gambar 20. Grafik Senin, 19 Mei 2025

Pada gambar 20, memperlihatkan bahwa sistem dengan metode Fuzzy mampu menghasilkan daya yang cukup tinggi dan stabil sejak pagi hingga sekitar pukul 12.00, berada pada kisaran 73–74 watt. Setelah itu, daya mengalami penurunan tajam akibat perubahan kondisi cuaca seperti mendung, namun sistem Fuzzy dapat memulihkan kembali output dayanya pada sore hari sekitar pukul 14.00. Sebaliknya, metode PID menghasilkan daya yang lebih rendah sepanjang hari, hanya berkisar 58–60 watt, dan tidak menunjukkan pemulihan berarti setelah terjadi penurunan.



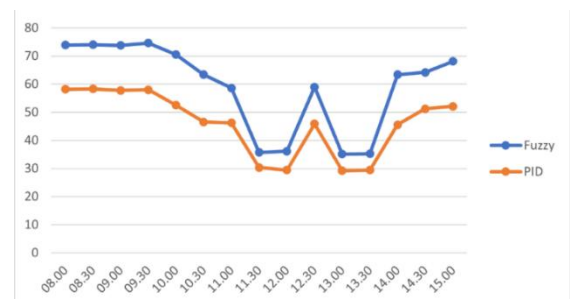
Gambar 21. Grafik Selasa, 20 Mei 2025

Gambar 21 menunjukkan bahwa sistem Fuzzy memiliki kinerja yang lebih baik dengan daya tinggi dan stabil hingga pukul 12.30, sebelum mengalami penurunan secara bertahap. Sementara itu, sistem PID menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan Fuzzy dan mengalami penurunan lebih tajam setelah pukul 12.30. Hal ini membuktikan bahwa sistem Fuzzy lebih adaptif dalam merespons perubahan intensitas cahaya pada hari Selasa.



Gambar 22. Grafik Rabu, 21 Mei 2025

Gambar 22 menunjukkan bahwa metode Fuzzy mampu menghasilkan daya yang lebih tinggi dan stabil sejak pagi hingga siang hari, sebelum akhirnya mengalami penurunan tajam pada sore hari. Sistem dengan metode PID juga mengalami penurunan serupa, namun daya yang dihasilkan lebih rendah secara keseluruhan, berada pada kisaran 58–63 watt. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem Fuzzy lebih optimal dalam mempertahankan daya sebelum kondisi cuaca memburuk di sore hari.



Gambar 23. Grafik Kamis, 22 Mei 2025

Grafik pada gambar 23 menunjukkan bahwa kondisi cuaca yang tidak stabil menyebabkan fluktuasi daya cukup besar pada kedua sistem, terutama antara pukul 12.00 hingga 13.00. Sistem Fuzzy mengalami dua kali penurunan tajam, tetapi

masih mampu mempertahankan daya pada level lebih tinggi dibandingkan PID. Sebaliknya, sistem PID juga mengalami fluktuasi besar namun tidak dapat menjaga daya setinggi Fuzzy. Dengan demikian, meskipun cuaca kurang mendukung, metode Fuzzy tetap memberikan keluaran daya yang lebih optimal.

H. Hasil Perolehan Energi dari panel surya dengan Metode Fuzzy

Perhitungan energi total dengan rumus (1) :

1. Senin, 19 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 978,84 \times 0,5$$

$$= 489,42 \text{ Wh}$$
2. Selasa, 20, Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 967,13 \times 0,5$$

$$= 483,56 \text{ Wh}$$
3. Rabu, 21 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 984,58 \times 0,5$$

$$= 492,29 \text{ Wh}$$
4. Kamis, 22 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 885,66 \times 0,5$$

$$= 442,83 \text{ Wh}$$

Jadi, jumlah energi total yang dihasilkan solar tracker dual axis menggunakan metode fuzzy berdasarkan data yang diambil selama 4 hari dengan durasi masing – masing hari 7 jam adalah sebesar 1.908 Wh.

I. Hasil Perolehan Energi dari panel surya dengan Metode PID

Perhitungan energi total dengan rumus (1) :

1. Senin, 19 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 780,31 \times 0,5$$

$$= 390,15 \text{ Wh}$$
2. Selasa, 20 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 748,42 \times 0,5$$

$$= 374,21 \text{ Wh}$$
3. Rabu, 21 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 776,40 \times 0,5$$

$$= 388,20 \text{ Wh}$$

4. Kamis, 22 Mei 2025

$$E_{total} = \sum P \times \Delta t$$

$$= 690,87 \times 0,5$$

$$= 345,43 \text{ Wh}$$

Jadi, jumlah energi total yang dihasilkan solar tracker dual axis menggunakan metode PID berdasarkan data yang diambil selama 4 hari dengan durasi masing – masing hari 7 jam adalah sebesar 1.497 Wh.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, serta analisis kinerja sistem *solar tracker dual axis* menggunakan metode fuzzy dan metode PID, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Sistem *solar tracker* berhasil dikembangkan dengan menerapkan logika fuzzy tipe Mamdani, yang memanfaatkan empat sensor LDR untuk mendeteksi intensitas cahaya dari berbagai arah. Sistem ini mampu memberikan instruksi kepada motor penggerak pada sumbu X dan Y untuk menyesuaikan posisi panel surya secara otomatis mengikuti arah datangnya sinar matahari.
- Melalui penerapan sistem inferensi fuzzy yang meliputi proses fuzzifikasi, penerapan aturan logika IF–THEN, dan defuzzifikasi sistem mampu mengatur arah gerak panel secara halus dan adaptif terhadap perubahan intensitas pencahayaan, sehingga memberikan kinerja yang responsif dan efisien.
- Berdasarkan hasil pengamatan selama empat hari berturut-turut, sistem yang menggunakan logika fuzzy mampu menghasilkan daya output yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem yang menggunakan kontrol PID.
- Grafik daya dari sistem fuzzy menunjukkan pola fluktuasi yang lebih stabil, serta peningkatan daya yang lebih konsisten dari pagi hingga siang hari.

Sebaliknya, sistem dengan metode PID menghasilkan daya yang lebih rendah dan kurang stabil selama periode pengamatan.

- Sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) yang diimplementasikan menggunakan ESP32 dan platform *ThingSpeak* berhasil menampilkan data tegangan, arus, dan daya secara *realtime*, sehingga sangat membantu dalam pemantauan kondisi sistem dari jarak jauh.

B. Saran

- Penggunaan *mikrokontroller* dengan kemampuan pemrosesan yang lebih tinggi, seperti Raspberry Pi, disarankan agar proses logika fuzzy dapat dijalankan

dengan lebih cepat dan komunikasi dengan platform IoT menjadi lebih efisien.

- Perlu dilakukan penyesuaian lebih lanjut terhadap parameter fungsi keanggotaan dan aturan logika *fuzzy (rule base)* untuk meningkatkan akurasi gerakan panel, terutama ketika menghadapi kondisi cuaca yang berubah secara cepat

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sukmajati and M. Hafidz, "Perancangan dan analisis pembangkit listrik tenaga surya kapasitas 10 MW on-grid di Yogyakarta,"
- [2] F. Pijoh, "Pembangkit listrik tenaga surya untuk energi ramah lingkungan yang berkelanjutan," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 2, no. 2, 2024.
- [3] H. B. Nurjaman and T. Purnama, "Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai solusi energi terbarukan rumah tangga," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 136–142, Nov. 2022, doi: 10.21831/jee.v6i2.51617.
- [4] S. Simatupang, B. Susilo, and M. B. Hermanto, "Rancang bangun dan uji coba solar tracker pada panel surya berbasis mikrokontroler ATmega16," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [5] M. A. Rizkiawan, A. Sofwan, and A. Multi, "Two-axis solar panel tracking device prototype with IoT-based monitoring," *International Journal of Renewable Energy*, vol. 3, no. 1, 2024.
- [6] A. Suryanto, N. Hudallah, T. Andrasto, C. F. Adhiningtyas, and S. A. Khusniasari, "Optimalisasi

keluaran panel surya menggunakan solar tracker berbasis kamera terintegrasi Raspberry Pi," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290, Aug. 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i3.1142.

- [7] L. H. Santoso, B. Sunarto, and D. G. Maksam, "Peningkatan produktivitas panel surya menggunakan metode dual-axis solar tracker dan mikrokontroler,"
- [8] A. P. Sardju and M. Y. H. Abbas, "Perancangan charge controller untuk pengisian baterai pada sel surya," *Journal of Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 47, May 2021, doi: 10.33387/josae.v4i1.3107.
- [9] M. R. Rusli *et al.*, "Sistem penyimpanan energi listrik berbasis baterai dari panel surya untuk listrik rumah ibadah di Desa Carang Wulung," *Abdimas Galuh*, vol. 5, no. 2, p. 1157, Sep. 2023, doi: 10.25157/ag.v5i2.10440.
- [10] S. Kristiyana and A. Rinaldi, "Air quality monitoring system in ThingSpeak-based applications using Internet of Things (IoT)," *WSEAS Transactions on Computers Research*, vol. 8, pp. 34–38, May 2020, doi: 10.37394/232018.2020.8.6.

VII. BIODATA PENULIS



Anggi putri faradifa lulusan dari SMKN 1 Pungging Mojokerto, kelahiran Mojokerto, 18 Juni 2002. Selama berkuliah aktif di organisasi himpunan mahasiswa dan asisten laboratorium pengukuran dan instrumentasi. Memiliki keahlian *dibidang renewable energy*, administrasi. Email : faradifap@gmail.com