



SEMINAR NASIONAL
TEKNOKA⁹
Seminar Nasional Teknologi Kualitas dan Aplikasi 2024



Disponsori oleh:

acer

herbani
Medika Nusantara

ESSANS

FIBERSTAR[®]
Connecting Indonesia



SERTIFIKAT

Nomor: 1602/D/LL/2024

Dengan bangga diberikan kepada:

Dr. Ir. Sofia Pinardi, MT

Sebagai :

PEMAKALAH

Dengan Artikel Berjudul

"Perancangan Sistem Solar Tracker Single-Axis Berbasis ANFIS"

Dalam Kegiatan Seminar Nasional Teknoka ke-9 Tahun 2024, dengan Tema
"STRATEGI CYBER SECURITY DAN TRANSFORMASI DIGITAL MEWUJUDKAN SMART,
LEAN, AND GREEN CITY INDONESIA EMAS TAHUN 2045"

Dekan FTII Uhamka



Dr. Dan Mugisidi, S.T., M.Si.

Ketua Panitia



Rosalina, S.T., M.T.

Perancangan Sistem *Solar Tracker Single-Axis* Berbasis ANFIS

Farhan Saumi Abdillah, Sofia Pinardi*, & Harry Ramza

FTII Universitas Muhammadiyah Prof. Dr Hamka, Teknik Elektro, Jl.Tanah Merdeka,No.6,

Kampung Rambutan, Ciracas, JakartaTimur

Email: farhansaumi@gmail.com, sofiapinardi@uhamka.ac.id, hramza@uhamka.ac.id

*Corresponding authors

Abstrak

Sistem panel surya statis memiliki keterbatasan dalam menyerap energi secara optimal karena posisi matahari yang terus berubah sepanjang hari. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem penjejak surya satu sumbu (single-axis) pada sumbu altitude menggunakan metode Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) dengan perangkat lunak MATLAB. Dataset berupa variabel waktu (bulan, hari, jam, dan menit) sebagai input dan sudut altitude matahari sebagai output diperoleh dari situs timeanddate.com. Proses pengolahan ANFIS dilakukan untuk meminimalkan galat dalam bentuk Root Mean Square Error (RMSE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ANFIS mampu menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,51 pada data pelatihan dan 0,56 pada data pengujian. Sistem ini dapat digunakan untuk memprediksi sudut altitude matahari dengan akurasi tinggi, sehingga mendukung pengembangan sistem penjejak surya satu sumbu.

Kata Kunci: Penjejak surya, ANFIS, sudut altitude, MATLAB

Abstract

Static solar panel systems have limitations in optimally capturing energy due to the sun's continuously changing position throughout the day. This study aims to design a single-axis solar tracking system on the altitude axis using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) method through MATLAB software. The dataset, consisting of time variables (month, day, hour, and minute) as input and the sun's altitude angle as output, was obtained from the timeanddate.com website. The ANFIS processing focused on minimizing error in the form of Root Mean Square Error (RMSE). The results showed that the ANFIS approach achieved an RMSE of 0.51 for training data and 0.56 for testing data. This system can accurately predict the sun's altitude angle, supporting the development of single-axis solar tracking systems.

Keywords: Solar tracker, ANFIS, altitude angle, MATLAB

1. PENDAHULUAN

Panel surya yang banyak digunakan oleh masyarakat pada umumnya masih berbasis sistem statis. Sistem ini memiliki keterbatasan dalam menyerap energi secara optimal karena posisi matahari terus berubah sepanjang hari. Akibatnya, penyerapan sinar matahari, terutama pada pagi dan sore hari, menjadi kurang maksimal [1]. Salah satu solusi yang sering dikaji untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan panel surya dinamis yang dilengkapi penjejak surya (*solar tracking*).

Penjejak surya merupakan perangkat tambahan yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baik dalam skala rumah tangga maupun skala komersial. Perangkat ini bekerja dengan memastikan modul fotovoltaik (PV) selalu menghadap langsung ke

matahari dengan cara mendeteksi dan mengikuti pergerakan matahari sepanjang hari. Teknologi ini penting untuk memaksimalkan potensi energi yang dihasilkan, terutama di wilayah dengan variasi intensitas sinar matahari yang signifikan.

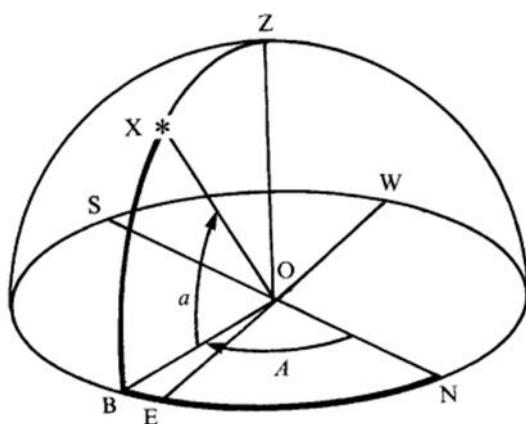
Penelitian ini bertujuan merancang prototipe sistem kendali penjejak surya satu sumbu (*single-axis*) pada sumbu altitude menggunakan pendekatan ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) melalui perangkat lunak MATLAB. Dataset yang digunakan berbasis waktu dan tanggal sebagai input utama. Prototipe ini diharapkan mampu, jika diimplementasikan secara langsung pada perangkat panel surya, meningkatkan penerimaan intensitas cahaya matahari dan menghasilkan tegangan, arus, serta daya yang lebih besar dibandingkan panel surya statis.

ANFIS adalah metode cerdas yang menggabungkan sistem inferensi fuzzy (*fuzzy inference system*) dengan jaringan saraf tiruan (*neural network*) untuk menyelesaikan masalah prediksi dan kontrol. Arsitektur ANFIS terkait erat dengan sistem pengendalian MISO (*Multiple Input and Single Output*) yang terdiri atas lima lapisan. Data input dalam penelitian ini meliputi variabel waktu, seperti bulan, hari, jam, dan menit, dengan output berupa sudut *altitude*. Dataset diambil dari situs timeanddate.com dan diproses menggunakan MATLAB. ANFIS untuk menghasilkan prediksi sudut *altitude* yang sesuai dengan kondisi matahari di luar dataset awal. Hasil ini diharapkan dapat membuat panel surya selalu menghadap langsung ke posisi matahari, sehingga penyerapan energi menjadi lebih optimal. Teknologi ini dapat menjadi solusi umum dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi surya.

2. LANDASAN TEORI

A. Pergerakan Matahari dalam Sistem Koordinat Altitude

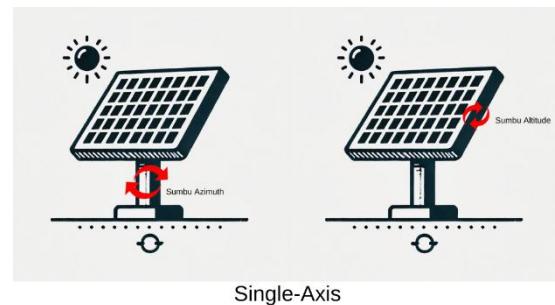
Untuk menentukan posisi Matahari di langit, digunakan sistem koordinat langit yang melibatkan sudut altitude (Gambar 1). Altitude adalah sudut yang mengukur ketinggian suatu objek, seperti Matahari, di atas horizon. Sudut ini diukur dalam derajat, di mana nilai positif menunjukkan posisi di atas cakrawala, dan nilai negatif menunjukkan posisi di bawah cakrawala. Altitude dihitung dari horizon menuju objek, membentuk sudut dengan garis pandang pengamat. Sistem ini membantu memahami posisi Matahari pada waktu tertentu berdasarkan posisi pengamat di permukaan Bumi [2].



Gambar 1 Sistem Koordinat Horizon

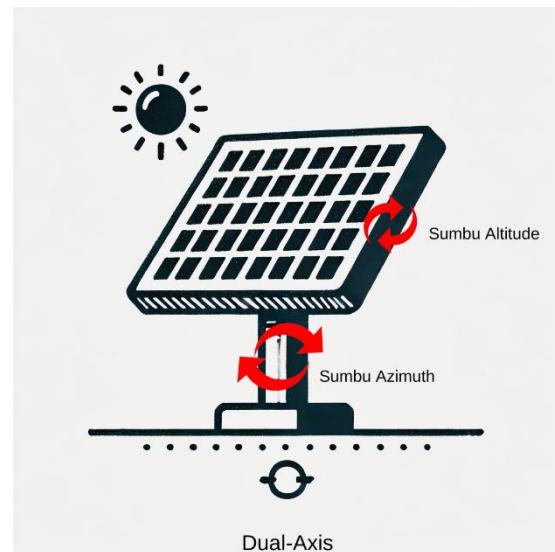
B. Penjejak Surya

Penjejak surya adalah sistem yang memastikan panel surya selalu menghadap Matahari untuk meningkatkan efisiensi daya yang dihasilkan. Berdasarkan derajat kebebasan, penjejak surya dibagi menjadi dua jenis: *Single Axis Tracker* dan *Dual Axis Tracker*, tampak pada Gambar 2 dan 3. *Single Axis Tracker* bergerak pada satu sumbu, baik *vertikal (altitude)* maupun *horizontal (azimuth)*, untuk mengikuti pergerakan Matahari. Sementara itu, *Dual Axis Tracker* memiliki keduanya, memungkinkan pelacakan harian sekaligus musiman matahari untuk akurasi lebih tinggi.



Single-Axis

Gambar 2 Sistem Solar Tracking Single-Axis



Dual-Axis

Gambar 3 Sistem Solar Tracking Dual-Axis

C. ANFIS

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) adalah pendekatan yang menggabungkan kekuatan logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan (*neural network*) untuk membangun model prediktif yang mampu menangani data kabur dan tidak pasti. ANFIS mengintegrasikan fleksibilitas logika fuzzy dalam menangani data linguistik dengan kemampuan jaringan saraf tiruan dalam

memodelkan hubungan non-linear secara adaptif [3].

Arsitektur ANFIS menggunakan pendekatan kontrol *Multiple Input Single Output* (MISO), terdiri dari lima lapisan utama:

1. Lapisan Pertama (*Fuzzifikasi*): Input dikonversi menjadi derajat keanggotaan fuzzy melalui fungsi keanggotaan, seperti fungsi kurva lonceng, seperti persamaan 1 :

$$O_1 = \mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c}{a} \right|^{2b}} \quad (1)$$

2. Lapisan Kedua (Aktivasi Aturan):

Menghitung kekuatan aktivasi (w_i) dari setiap aturan dengan operator fuzzy, seperti *AND*:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(x_1) \times \mu_{Bi}(x_2); i=1,2 \quad (2)$$

3. Lapisan Ketiga (Normalisasi Aktivasi): Kekuatan aktivasi dinormalisasi terhadap total kekuatan aktivasi:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (3)$$

4. Lapisan Keempat (Inferensi): Mengalikan nilai normalisasi aktivasi dengan fungsi linear (model sugeno) dari variabel input:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (4)$$

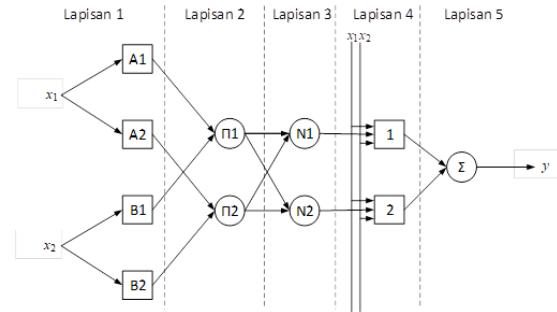
5. Lapisan Kelima (Defuzzifikasi): Menghitung keluaran akhir (y) sebagai rata-rata terbobot:

$$O_{5,i} = y_i = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i \bar{w}_i f_i}{\sum_i \bar{w}_i} \quad (5)$$

Metode pembelajaran yang digunakan dalam ANFIS biasanya adalah *back propagation*, metode *least squares*, atau kombinasi keduanya dalam pendekatan *hybrid learning*. Pendekatan ini memungkinkan optimasi parameter premis dan

konsekuensi secara simultan untuk meningkatkan akurasi model [4].

Kelebihan dan Kekurangan: ANFIS unggul dalam fleksibilitas dan kemampuan memodelkan sistem non-linear yang kompleks, tetapi pelatihan sistem dapat memakan waktu lebih lama untuk dataset berskala besar, dan penyetelan parameter dapat menjadi tantangan pada aplikasi industri [3].



Gambar 4 Arsitektur ANFIS

D. Pembelajaran Hybrid

Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) menggunakan algoritma pembelajaran hybrid untuk mengoptimalkan parameter sistemnya. Algoritma ini menggabungkan *Least Square Estimator* (LSE) untuk parameter konsekuensi pada tahap forward pass dan *back propagation gradient descent* untuk parameter premis pada tahap backward pass, dengan tujuan meminimalkan galat dan menghasilkan model prediksi yang akurat [4].

Pada tahap forward pass, data input diproses melalui jaringan untuk menghitung parameter konsekuensi (p_i, q_i, r_i) menggunakan metode LSE. Hubungan matematis parameter konsekuensi dengan output telah dijelaskan sebelumnya (lihat Persamaan (4)). Parameter ini direpresentasikan dalam bentuk matriks:

$$\hat{A}\theta = y, \text{ dengan solusi } \hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (6)$$

Di mana:

- A : matriks koefisien aturan fuzzy,
- y : vektor keluaran aktual,
- $\hat{\theta}$: parameter konsekuensi,

Tahap ini menghasilkan solusi optimal untuk parameter linier dengan meminimalkan galat kuadrat menggunakan metode *pseudo-inverse*.

Jika galat melebihi toleransi, tahap *backward pass* dilakukan untuk menyesuaikan parameter premise menggunakan metode *gradient descent* [4]:

$$\Delta \hat{\theta} = \eta \frac{\delta E_i}{\delta \theta} \quad (7)$$

di mana E adalah galat kuadrat rata-rata (*Mean Square Error*) yang didefinisikan sebagai:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

Dalam implementasi MATLAB Toolbox, galat dihitung dalam bentuk *Root Mean Square Error* (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

Proses pembelajaran berlangsung iteratif hingga nilai RMSE berada di bawah batas toleransi.

Pendekatan *hybrid* ini menggabungkan efisiensi LSE untuk parameter linier dengan fleksibilitas *gradient descent* untuk parameter *non-linear*. Kombinasi ini memungkinkan ANFIS menghasilkan model prediksi yang akurat sekaligus adaptif terhadap data pelatihan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian jenis simulasi yang bertujuan untuk merancang sistem *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dataset yang digunakan melibatkan variabel input berupa pewaktuan dan output berupa sudut *altitude* matahari, yang diperoleh dari sumber data terpercaya, yaitu situs *timeanddate.com*. Dataset ini diproses melalui beberapa tahapan, yaitu perancangan model ANFIS, evaluasi performa model, serta analisis perbandingan berbagai bentuk *fungsi keanggotaan* atau *Membership Function (MF)* untuk mengidentifikasi konfigurasi yang

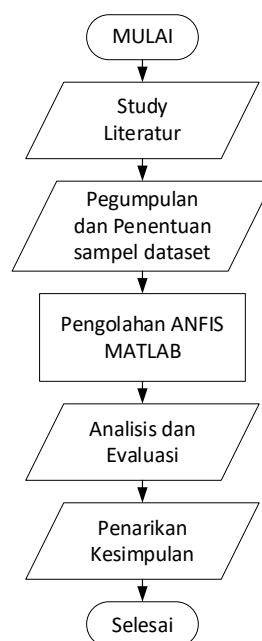
menghasilkan galat terkecil dalam bentuk *Root Mean Square Error (RMSE)*.

A. Diagram Alir Penelitian

Untuk memastikan penelitian dilakukan secara sistematis, penelitian ini mengikuti tahapan dan alur yang telah ditetapkan sebagai berikut (Gambar 5).

B. Identifikasi Keperluan.

Penelitian ini hanya memerlukan perangkat lunak MATLAB untuk merancang sistem ANFIS. Versi yang digunakan adalah **R2022b**, dengan spesifikasi minimum sebagai berikut[5]:



Gambar 5 Diagram Alir Penelitian

- Sistem Operasi:
 - Windows 11 (versi 22H2 atau lebih baru).
 - Windows 10 (versi 22H2).
 - Windows Server 2022.
- Prosesor:
 - Minimum: Prosesor Intel atau AMD x86-64 dengan minimal dua inti.
 - Rekomendasi: Prosesor Intel atau AMD x86-64 dengan empat inti atau lebih dan mendukung set instruksi AVX2.
 - Catatan: Versi MATLAB mendatang akan membutuhkan prosesor yang mendukung set instruksi AVX2.
- RAM:

- Minimum: 8 GB.
- Rekomendasi: 16 GB.
- Penyimpanan:
 - 4,2 GB untuk instalasi MATLAB saja.
 - 4–6 GB untuk instalasi standar.
 - 24 GB untuk instalasi seluruh produk.
 - Disarankan menggunakan SSD untuk meningkatkan kinerja.
- Grafik:
 - Tidak memerlukan kartu grafis khusus, tetapi disarankan menggunakan kartu grafis dengan akselerasi perangkat keras yang mendukung *OpenGL 3.3* dan memori GPU 1 GB.
 - Akselerasi GPU menggunakan *Parallel Computing Toolbox* membutuhkan GPU dengan kemampuan komputasi tertentu.

C. Pengumpulan dan Penentuan Sampel Dataset.

Penelitian ini memanfaatkan sistem *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* untuk memprediksi sudut *altitude* matahari berdasarkan data waktu sebagai input. Data untuk pelatihan diperoleh dari situs *timeanddate.com*, yang menyediakan informasi astronomi terpercaya dan dapat diakses secara bebas. Data ini mencakup:

- Input berupa waktu (bulan, hari, jam, dan menit).
- Output berupa sudut *altitude* matahari.



Gambar 6 Laman www.timeanddate.com.

Pengambilan data dilakukan pada setiap perubahan sudut sebesar 6° , mulai dari 0° di timur hingga 0° di barat, untuk menangkap perubahan sudut *altitude* secara lebih rinci. Pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan model *ANFIS* yang efisien dan memiliki tingkat akurasi tinggi dalam mendukung sistem penjelajah surya.

Dataset dibagi secara acak dengan rasio 3:1:

- 75% data digunakan untuk pelatihan (*training*).

- 25% data digunakan untuk pengujian (*testing*).

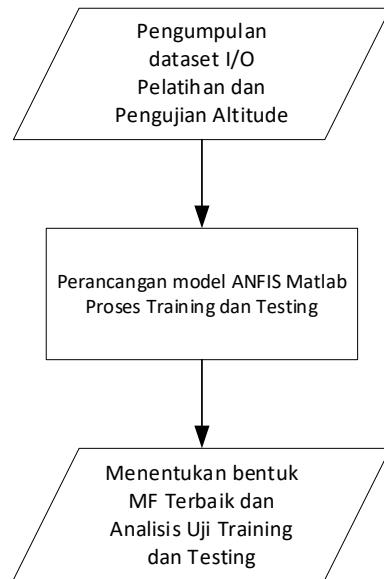
Pembagian ini bertujuan untuk memastikan data yang mencukupi baik untuk pelatihan maupun pengujian model *ANFIS*. Rasio ini juga sejalan dengan kebutuhan proyeksi, di mana minimal 20% data harus digunakan untuk pengujian[6]. Akurasi model dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error (RMSE)*, yang dirumuskan pada Persamaan 9. Nilai *RMSE* mendekati nol menunjukkan tingkat keakuratan model yang sangat baik[7].



Gambar 7 Perbandingan antara data pelatihan dan data pengujian

D. Pengolahan ANFIS

Proses pengolahan *ANFIS* dijelaskan melalui diagram alir berikut:



Gambar 8 Diagram Alir Pengolahan ANFIS

Setelah dataset pelatihan dan pengujian terkumpul, langkah berikutnya adalah merancang model *ANFIS* menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dataset input dan output dimasukkan ke dalam *Neuro-Fuzzy Designer* untuk dilakukan pelatihan (*training*) serta pengujian (*testing*). Model dilatih menggunakan metode optimasi *hybrid* dengan batas iterasi maksimum (*epoch*) sebanyak 1500 untuk sudut *altitude*, dan toleransi galat disetel pada nilai nol guna mencapai hasil prediksi yang lebih presisi. Jika proses pelatihan belum mencapai tingkat konvergensi, jumlah iterasi dapat ditingkatkan sesuai kebutuhan.

Untuk menentukan fungsi keanggotaan (*Membership Function/MF*), digunakan metode *grid partition* dengan konfigurasi berbasis variabel linguistik berikut:

1. Bulan

Variabel ini dibagi menjadi lima kategori yang mencerminkan empat siklus tahunan pergerakan matahari, yaitu:

- Periode pertama, dari selatan menuju ekuator, dengan kurva yang terbagi antara Desember dan Januari-Maret.
- Periode kedua, dari ekuator ke utara.
- Periode ketiga, dari utara kembali ke ekuator.
- Periode keempat, dari ekuator kembali ke selatan.

2. Hari

Dibagi menjadi tiga kategori: awal bulan, tengah bulan, dan akhir bulan.

3. Jam

Diklasifikasikan ke dalam tiga kategori: meninggi, puncak, dan menurun.

4. Menit

Dibagi menjadi tiga kategori: menit awal, menit tengah, dan menit akhir.

Pada sistem ini, fungsi keanggotaan output disetel dalam format linier menggunakan pendekatan *FIS Sugeno*. Untuk mengevaluasi kinerja, berbagai jenis *Membership Function (MF)* diuji, termasuk *trimf*, *gbellmf*, *gaussmf*, *gauss2mf*, *pimf*, *dsgnfmf*, dan *psigmf*. Tujuannya adalah untuk menemukan konfigurasi *MF* yang menghasilkan nilai galat terkecil dalam bentuk *Root Mean Square Error (RMSE)*.

Setelah model dilatih, data uji digunakan untuk mengevaluasi kemampuan prediksi model terhadap data aktual. Proses validasi input dan output dilakukan menggunakan *Rule Viewer* pada *toolbox* MATLAB. Model terbaik dipilih berdasarkan tipe *MF* yang menghasilkan *RMSE* terendah, sehingga sistem mampu memberikan hasil prediksi yang akurat baik untuk data pelatihan maupun data pengujian.

4. Hasil dan Pembahasan

A. Pengambilan Sampel sudut altitude

Dataset untuk sumbu altitude dikumpulkan dari situs timeanddate.com selama tahun 2024 dengan interval setiap 6° dari matahari terbit hingga terbenam. Dataset ini mencakup variabel bulan, hari, jam, menit, dan sudut *altitude* nya. Total data yang

diperoleh adalah 10.515 sampel, yang dibagi secara acak menjadi 75% (7.886 data) untuk pelatihan dan 25% (2.629 data) untuk pengujian, menggunakan rasio 3:1. Dataset mentah disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Mentah untuk Sudut Altitude

No	Input				Output Target (°)	
	Bulan	Hari	Jam	Menit	T&D	Penyesuaian
1	1	1	5	41	0	0
2	1	1	6	9	6	6
3	1	1	6	36	12	12
4	1	1	7	2	18	18
5	1	1	7	27	24	24
6	1	1	7	53	30	30
7	1	1	8	19	36	36
8	1	1	8	47	42	42
9	1	1	9	13	48	48
10	1	1	9	41	54	54
11	1	1	10	9	60	60
12	1	1	10	42	66	66
13	1	1	11	23	72	72
14	1	1	11	33	73	73
15	1	1	11	55	73	73
16	1	1	12	19	72	108
17	1	1	13	5	66	114
18	1	1	13	38	60	120
19	1	1	14	6	54	126
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabel 1 menunjukkan dua kategori data output target:

- T&D, yaitu data yang diperoleh dari situs timeanddate.com.

- Penyesuaian, yaitu data yang telah disesuaikan dengan klasifikasi posisi matahari. Ketika matahari sedang meninggi dari timur menuju puncak, posisinya direpresentasikan dalam rentang 0° hingga 90° . Sementara itu, saat matahari tergelincir dari puncak menuju terbenam, posisinya direpresentasikan dalam rentang 90° hingga 180° .

B. Pembentukan Sistem ANFIS

Sistem ANFIS dibangun menggunakan berbagai jenis fungsi keanggotaan, seperti *trimf* (fungsi keanggotaan segitiga), *gbellmf* (fungsi lonceng umum), *gaussmf* (fungsi Gaussian), *gauss2mf* (kombinasi fungsi Gaussian), *pimf* (fungsi berbentuk pi), *dsigmf* (selisih dua fungsi sigmoid), dan *psigmf* (produk dua fungsi sigmoid). Evaluasi sistem dilakukan dengan menghitung galat *Root Mean Square Error* (RMSE) pada data pelatihan dan pengujian. Hasil pengukuran RMSE untuk masing-masing fungsi keanggotaan disajikan pada Tabel 2.

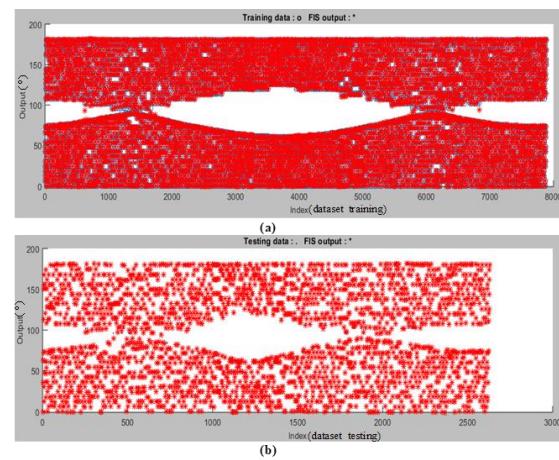
Tabel 2 Galat (RMSE) pada Data Pelatihan dan Pengujian untuk Sistem Altitude

No	Epoch	Fungsi keanggotaan	Training data error (RMSE)	Testing data error (RMSE)
1	1500	Trim (segitiga)	1.30	1.28
2	1500	gbell (lonceng generelized bell)	1.09	1.10
3	1500	gauss1 (lonceng gauss)	1.70	1.64
4	1500	gauss2 (lonceng gauss Kombinasi)	1.90	1.81
5	4000	Pi (Lonceng Pi)	0.68	0.83
6	1500	Dsig (Difference of two sigmoidal)	0.56	0.60

7	1500	Psig (Product of two sigmoidal)	0.51	0.56
---	------	------------------------------------	------	------

Hasil komputasi di MATLAB menunjukkan bahwa fungsi keanggotaan *psigmf* memiliki kinerja paling optimal dibandingkan jenis kurva lainnya, dengan nilai galat RMSE sebesar 0,51 pada data pelatihan dan 0,56 pada data pengujian. Perbedaan galat yang kecil antara kedua dataset ini mencerminkan bahwa model memiliki akurasi dan stabilitas yang sangat baik. Dengan keunggulan tersebut, fungsi *psigmf* direkomendasikan untuk diimplementasikan pada sistem penjejak surya satu sumbu (*single-axis tracking*) di sumbu altitude.

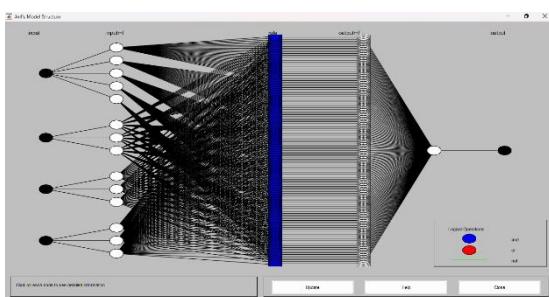
Untuk hasil visualisasi sebaran data antara output FIS dan data target pada proses pelatihan serta pengujian ditampilkan dalam Gambar 9. Grafik pada Gambar(a) menunjukkan bahwa output FIS yang direpresentasikan oleh tanda bintang merah mendekati nilai data target pelatihan yang ditunjukkan dengan lingkaran biru. Pola distribusi ini konsisten dalam rentang sudut *altitude* antara 0° hingga 180° . Hal serupa terlihat pada Gambar(b), yang membandingkan hasil prediksi FIS dengan data target pengujian. Sebaran data pada pengujian menunjukkan pola yang hampir identik dengan data pelatihan, mengindikasikan bahwa model ANFIS mampu memprediksi sudut *altitude* dengan akurasi tinggi untuk data yang tidak dilibatkan dalam proses pelatihan. Konsistensi hasil ini mengonfirmasi bahwa model memiliki performa yang stabil dengan selisih galat yang kecil antara prediksi dan nilai target.



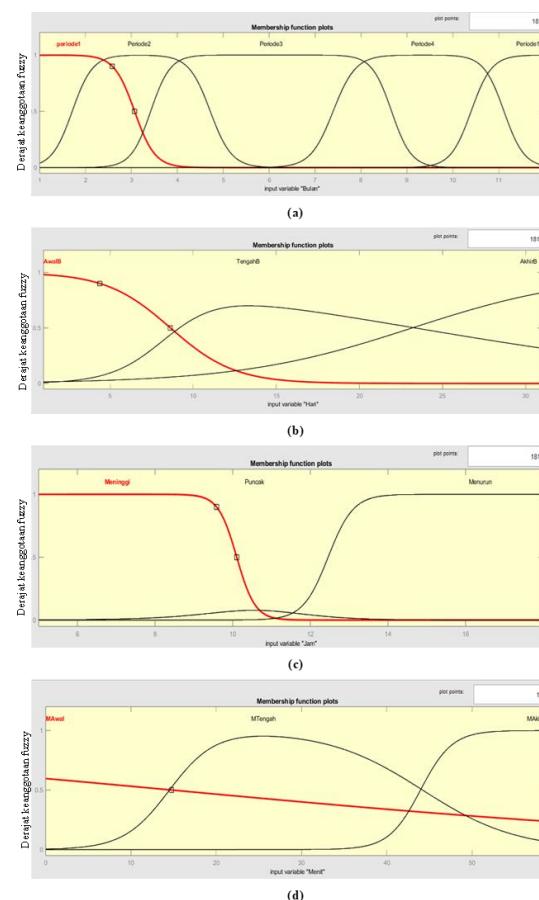
Gambar 9 Hasil model ANFIS pada sudut altitude:
(a) sebaran data target pelatihan terhadap output

FIS, dan (b) sebaran data target pengujian terhadap output FIS.

Model ANFIS menghasilkan 135 aturan yang membentuk basis pengetahuan untuk model FIS Sugeno. Fungsi keanggotaan variabel input pada FIS Sugeno, yang dihasilkan oleh sistem ANFIS setelah proses pelatihan, divisualisasikan pada Gambar 11. Variabel *bulan* (a) dibagi menjadi lima kategori yang mencerminkan siklus tahunan posisi matahari. Variabel *hari* (b) dikelompokkan ke dalam tiga kategori: awal bulan, tengah bulan, dan akhir bulan, untuk menangkap variasi temporal data. Variabel *jam* (c) memiliki tiga kategori, yaitu meninggi, puncak, dan menurun, yang merepresentasikan pergerakan matahari sepanjang hari. Adapun variabel *menit* (d) dibagi menjadi tiga kategori: menit awal, tengah, dan akhir, untuk memetakan perubahan posisi matahari dalam skala waktu kecil. Visualisasi ini menggambarkan bagaimana sistem ANFIS mengolah input secara terstruktur untuk menghasilkan prediksi sudut *altitude* dengan akurasi tinggi.



Gambar 10 Arsitektur ANFIS hasil Training data.



Gambar 11 menampilkan fungsi keanggotaan untuk input sudut altitude, yaitu: (a) variabel bulan, (b) variabel hari, (c) variabel jam, dan (d) variabel menit.

5. SIMPULAN

Model ANFIS yang menggunakan fungsi keanggotaan *Product of Sigmoidal Function* (psigmf) terbukti memiliki performa terbaik dalam estimasi sudut altitude, dengan nilai RMSE mencapai 0,51 pada data pelatihan dan 0,56 pada data pengujian. Kinerja ini menunjukkan tingkat akurasi dan stabilitas yang sangat baik, sebagaimana terlihat dari perbedaan galat yang minimal antara kedua dataset. Visualisasi sebaran data juga mengonfirmasi kemampuan model untuk menghasilkan prediksi yang konsisten dengan data target berdasarkan referensi timeanddate.com. Berdasarkan hasil tersebut, fungsi psigmf dianggap paling sesuai untuk diterapkan pada sistem penjejak surya satu sumbu (*single-axis tracking*) pada sumbu altitude.

KEPUSTAKAAN

- [1] R. A. Prasetyo, A. Stefanie, dan W. N. Adzillah, "Optimasi Daya Pada Panel Surya Dengan Solar Tracker System Dual Axis Menggunakan Metode Fuzzy Logic Controller," *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 7, no. 1, hal. 1–8, 2021, doi: 10.5281/zenodo.4657052.
- [2] P. Duffett-Smith dan J. Zwart, *Practical Astronomy with your Calculator or Spreadsheet*. Cambridge University Press, 2011.
- [3] N. AL-Rousan, N. A. Mat Isa, dan M. K. Mat Desa, "Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 32, no. 7, hal. 459–469, 2020, doi: 10.1016/j.jksues.2020.04.004.
- [4] S. Kesumadewi dan S. Hartati, *Neuro-Fuzzy : Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf*, 2nd ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.
- [5] I. The MathWorks, "MATLAB R2024b System Requirements for Windows," 2024. <https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html> (diakses Nov 21, 2024).
- [6] R. J. Hyndman dan G. Athanasopoulos, *Forecasting : Principles and Practice*. Colorado, 2018.
- [7] F. X. DIEBOLD, *Element of Forecasting*, Fourth Edi. Mason: Thomson South-Western, 2007