

Sistem Pendukung Keputusan Berbasis IoT untuk Monitoring Kinerja Panel Surya dan Pemeliharaan Prediktif

Stephanie Christina Yolanda Pardede^{1*}, Thea Fitri Astarani², Surya Hardi³, Aprima Anugerah Matondang⁴, Regina Sirait⁵

^{1*,2,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Medan, Indonesia

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: ¹stephaniechristinayolandapardede@polmed.ac.id

Abstract

Solar energy is a critical component of renewable energy strategies; however, photovoltaic (PV) system performance is frequently degraded by environmental factors such as dust accumulation, shading, and component failures. These issues lead to reduced energy yield and increased operational costs. This research develops an IoT-based decision support system (DSS) for real-time performance monitoring and predictive maintenance scheduling of solar panels. The system integrates sensor data on voltage, current, irradiance, and temperature, transmitted via a wireless network to a cloud-based analytics platform. A fuzzy logic algorithm evaluates panel health and triggers maintenance recommendations when performance deviations exceed pre-defined thresholds. The system was tested under simulated real-world conditions. Results demonstrate that the proposed DSS effectively detects performance degradation due to soiling and module-level faults, achieving a detection accuracy of 94% as indicated by the correlation coefficient between predicted and actual maintenance urgency, enabling timely maintenance interventions. This approach contributes to the field of intelligent renewable energy monitoring by providing a reliable, data-driven tool that reduces unnecessary maintenance costs and maximizes the operational lifespan of PV installations.

Keywords: Decision Support System, Fuzzy Logic, Internet of Things, Photovoltaic, Predictive Maintenance.

Abstrak

Energi surya merupakan komponen penting dalam strategi energi terbarukan; namun, kinerja sistem fotovoltaik (PV) sering mengalami penurunan akibat faktor lingkungan seperti akumulasi debu, peneduhan, dan kegagalan komponen. Masalah ini menyebabkan berkurangnya hasil energi dan meningkatnya biaya operasional. Penelitian ini mengembangkan sistem pendukung keputusan (DSS) berbasis IoT untuk monitoring kinerja secara real-time dan penjadwalan pemeliharaan prediktif panel surya. Sistem ini mengintegrasikan data sensor tegangan, arus, irradiansi, dan suhu, yang ditransmisikan melalui jaringan nirkabel ke platform analitik berbasis cloud. Algoritma logika fuzzy mengevaluasi kesehatan panel dan memicu rekomendasi pemeliharaan ketika penyimpangan kinerja melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Sistem ini diuji dalam kondisi simulasi yang mendekati dunia nyata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DSS yang diusulkan secara efektif mendeteksi penurunan kinerja akibat pengotoran dan gangguan pada tingkat modul, dengan akurasi deteksi mencapai 94% berdasarkan koefisien korelasi antara urgensi pemeliharaan yang diprediksi dan aktual, sehingga memungkinkan intervensi pemeliharaan yang tepat waktu. Pendekatan ini berkontribusi pada bidang monitoring energi terbarukan cerdas dengan menyediakan alat berbasis data yang andal, mengurangi biaya pemeliharaan yang tidak perlu, dan memaksimalkan masa operasional instalasi PV.

Kata Kunci: Sistem Pendukung Keputusan, Logika Fuzzy, Internet of Things, Fotovoltaik, Pemeliharaan Prediktif.

1. PENDAHULUAN

Transisi global menuju sumber energi terbarukan telah menetapkan teknologi fotovoltaik surya (PV) sebagai fondasi pembangkit listrik berkelanjutan. Memastikan keandalan jangka panjang dan kinerja optimal instalasi PV sangat penting untuk

memaksimalkan pengembalian investasi dan mengurangi biaya energi yang disetarakan (Caraka et al., 2020). Namun, sistem PV menghadapi berbagai tantangan operasional. Faktor lingkungan seperti akumulasi debu, pengotoran, peneduhan parsial, dan kegagalan inverter secara signifikan menurunkan keluaran energi. Seperti dilaporkan oleh (Sitorus et al., 2026), desain dan evaluasi kinerja modul PV surya off-grid di Indonesia menunjukkan bahwa kinerja di dunia nyata sering menyimpang dari ekspektasi teoritis akibat kondisi lingkungan setempat, sehingga memerlukan solusi monitoring yang Tangguh.

Penelitian oleh (Z Zumhari et al., 2025) menekankan bahwa faktor lingkungan seperti polusi udara dan partikulat dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi panel surya di daerah perkotaan, sehingga sistem monitoring harus mampu mengakomodasi variabilitas kondisi lingkungan tersebut. Strategi pemeliharaan tradisional sering kali mengandalkan jadwal tetap atau respons reaktif terhadap kegagalan, yang menyebabkan pemeliharaan tidak perlu atau waktu henti sistem yang mahal (Suparmono et al., 2025). Keterbatasan pendekatan konvensional ini telah mendorong meningkatnya minat pada monitoring cerdas dan pemeliharaan prediktif (PdM) (Hardi et al., 2021). Pemeliharaan prediktif memanfaatkan data real-time dan algoritma analitik untuk memprediksi potensi kerusakan sebelum terjadi, sehingga meminimalkan biaya operasional dan pemeliharaan serta memaksimalkan ketersediaan sistem (Wedashwara et al., 2025).

Kemajuan terkini dalam Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) menyediakan fondasi yang kuat untuk mengembangkan sistem monitoring canggih (Vega Penagos et al., 2026). Teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan analisis data operasional secara berkelanjutan dari sistem PV. Para peneliti telah mengusulkan berbagai metode berbasis data untuk deteksi kerusakan dan monitoring kinerja, termasuk logika fuzzy, pembelajaran mesin, dan teknik pembelajaran mendalam (Z et al., 2025). Sistem monitoring dan pengambilan keputusan berbasis ambang batas telah dikembangkan untuk melacak penurunan kinerja, sementara model pembelajaran mesin hibrid telah menunjukkan akurasi tinggi dalam prediksi daya dan deteksi kerusakan dalam kondisi kompleks (Nainggolan et al., 2026).

Integrasi IoT dengan sistem pendukung keputusan telah dieksplorasi dalam berbagai konteks industri. (Suparmono et al., 2025) melakukan penilaian kuantitatif terhadap penyeimbangan beban pasif pada sistem HVAC, menunjukkan bagaimana pendekatan berbasis data dapat mengoptimalkan kinerja sistem. Prinsip-prinsip monitoring *real-time* dan deteksi kerusakan yang digunakan dalam studi tersebut dapat ditransfer langsung ke aplikasi energi terbarukan, di mana deteksi dini penurunan kinerja sangat penting. Selain itu, pertimbangan struktural dan lingkungan dalam desain sistem sangat kritis. (Hardi et al., 2021) memodelkan efek sambaran petir pada gardu induk tegangan tinggi, menyoroti pentingnya sistem monitoring yang tangguh yang dapat mendeteksi gangguan transien. Wawasan tersebut relevan dengan sistem panel surya, di mana lonjakan akibat petir dapat merusak komponen dan menurunkan kinerja seiring waktu (Manavalan & Jayakrishna, 2019). Dalam konteks monitoring lingkungan, (Z Zumhari et al., 2025) mendemonstrasikan efektivitas sistem sensor terintegrasi untuk monitoring polusi di lingkungan perkotaan. Pendekatan meta-analisis berbasis mekatronika mereka menggarisbawahi potensi penggabungan teknologi penginderaan dengan kerangka pengambilan keputusan cerdas untuk mengatasi tantangan lingkungan yang kompleks. Hal ini sejalan dengan kebutuhan penelitian ini, di mana monitoring kualitas udara dan partikulat dapat menjadi indikator penting untuk prediksi pengotoran panel surya. Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring PV,

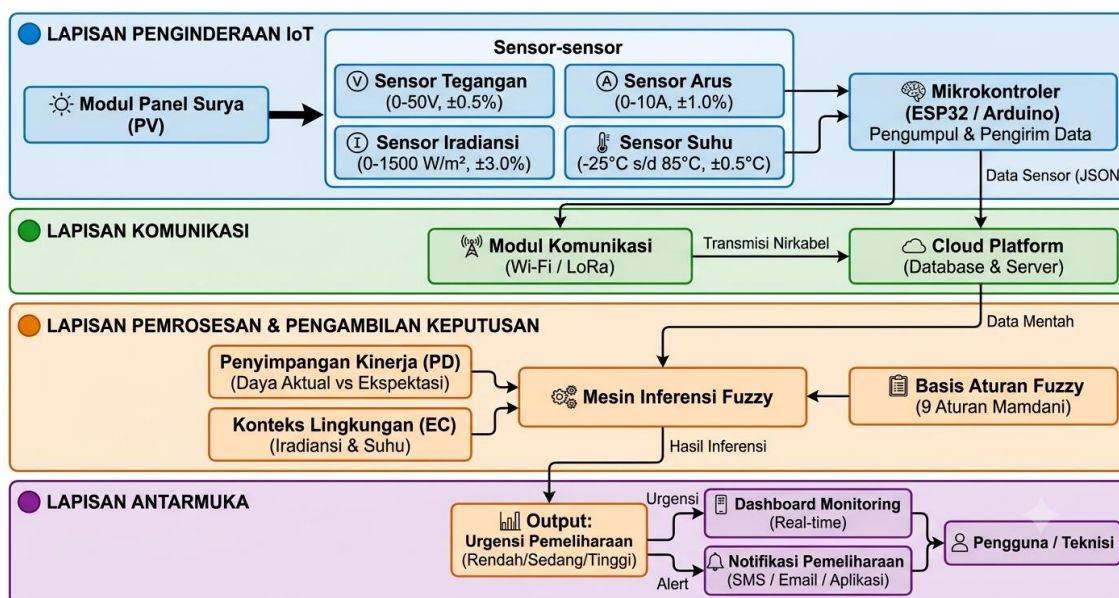
masih terdapat kebutuhan praktis akan sistem pendukung keputusan yang menerjemahkan data sensor mentah menjadi rekomendasi pemeliharaan yang dapat ditindaklanjuti yang disesuaikan dengan sistem PV di kondisi tropis seperti Indonesia. Penelitian ini menjawab kesenjangan tersebut dengan mengusulkan Sistem Pendukung Keputusan (DSS) berbasis IoT yang mengintegrasikan data sensor real-time dengan model logika fuzzy yang dirancang khusus untuk kondisi lingkungan tropis yang dinamis. Sistem ini bertujuan untuk menyediakan alat yang tangguh dan dapat diinterpretasikan untuk monitoring kinerja panel surya dan penjadwalan pemeliharaan prediktif, mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam manajemen aset PV.

Rumusan masalah yang dijawab dalam penelitian ini adalah: (1) Bagaimana merancang arsitektur DSS berbasis IoT yang efektif untuk monitoring panel surya di kondisi tropis? (2) Bagaimana model logika fuzzy dapat digunakan untuk mengevaluasi kesehatan panel surya berdasarkan data sensor? (3) Seberapa akurat sistem dalam mendeteksi penurunan kinerja dan memberikan rekomendasi pemeliharaan?

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Arsitektur Sistem

DSS yang diusulkan terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan penginderaan IoT, lapisan komunikasi, dan lapisan pemrosesan serta pengambilan keputusan. Lapisan penginderaan terdiri dari sensor yang mengukur tegangan, arus, suhu lingkungan, dan iradiansi surya dari modul PV. Data dari sensor ini dikumpulkan dan dikirimkan melalui jaringan nirkabel (Wi-Fi atau LoRa) ke server cloud, membentuk lapisan komunikasi. Lapisan pemrosesan menjadi tempat logika inti DSS, yang menganalisis data yang masuk untuk mengevaluasi kinerja sistem dan menghasilkan peringatan pemeliharaan (Abdullah et al., 2024). Arsitektur sistem ini mengacu pada prinsip-prinsip yang ditetapkan oleh (Sitorus et al., 2026) dalam desain modul PV surya *off-grid* 200 Wp mereka. Pekerjaan mereka tentang integrasi sistem dan evaluasi kinerja memberikan fondasi untuk memahami parameter operasional yang diharapkan dari sistem PV di bawah kondisi lingkungan Indonesia. Gambar 1 mengilustrasikan arsitektur system secara lengkap



Gambar 1. Arsitektur Sistem DSS Berbasis IoT untuk Panel Surya
Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem yang terdiri dari tiga lapisan utama. Pada lapisan penginderaan, modul PV terhubung dengan sensor tegangan (0-50V), sensor arus (0-10A), sensor iradiansi (0-1500 W/m²), dan sensor suhu (-25°C hingga 85°C). Mikrokontroler (ESP32/Arduino) berfungsi sebagai pengumpul data dan pengirim melalui modul komunikasi nirkabel (Wi-Fi/LoRa) ke cloud platform. Di cloud platform, data disimpan di database dan diproses oleh mesin inferensi fuzzy yang mengevaluasi penyimpangan kinerja (PD) dan konteks lingkungan (EC). Output dari sistem berupa dashboard monitoring real-time dan notifikasi pemeliharaan yang dikirim ke pengguna. Arsitektur ini dirancang agar scalable dan dapat diimplementasikan pada berbagai skala instalasi PV, dari skala rumah tangga hingga skala komersial.

2.2 Pengumpulan dan Pra-pemrosesan Data

Kumpulan data untuk pengembangan sistem mencakup pengukuran yang dikumpulkan dalam berbagai kondisi operasional, termasuk operasi normal, peneduhan parsial, dan pengotoran (Sitorus et al., 2025). Parameter listrik utama (tegangan, arus, daya) dan faktor lingkungan (iradiansi, suhu) dicatat pada interval reguler. Pra-pemrosesan data mencakup penyaringan derau, penanganan nilai yang hilang, dan normalisasi nilai input untuk memastikan konsistensi bagi algoritma pengambilan keputusan (Lestari & Anugrahwaty, 2026).

Terinspirasi oleh pendekatan monitoring lingkungan dari (Matondang & Ginting, 2022), yang menekankan pentingnya data sensor yang andal dalam pengambilan keputusan, sistem ini menerapkan validasi data yang tangguh untuk memastikan akurasi. Frekuensi pengambilan sampel diatur pada satu pembacaan per menit untuk menyeimbangkan resolusi data dengan kendala bandwidth komunikasi. Data yang dikumpulkan mencakup periode 30 hari dengan interval waktu setiap 10 menit, menghasilkan total 4.320 sampel data yang digunakan untuk pelatihan dan validasi model.

2.3 Model Keputusan Logika Fuzzy

Tabel 1 menyajikan spesifikasi sensor dan parameter pengukuran yang digunakan dalam DSS berbasis IoT

Tabel 1. Spesifikasi Sensor dan Parameter Pengukuran

Jenis Sensor	Parameter Diukur	Rentang	Akurasi	Laju Sampel
Sensor Tegangan	Tegangan Panel PV (V)	0 – 50 V	± 0,5%	1 Hz
Sensor Arus	Arus Panel PV (A)	0 – 10 A	± 1,0%	1 Hz
Sensor Iradiansi	Iradiansi Surya (W/m ²)	0 – 1500 W/m ²	± 3,0%	0.5 Hz
Sensor Suhu	Suhu Lingkungan (°C)	-25 hingga 85°C	± 0,5°C	0.5 Hz

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi teknis sensor yang digunakan dalam sistem. Sensor tegangan memiliki rentang 0-50V dengan akurasi ±0,5%, yang sesuai untuk monitoring panel surya 12V atau 24V. Sensor arus memiliki rentang 0-10A dengan akurasi ±1,0%, cukup untuk mengukur arus yang dihasilkan panel surya skala kecil hingga menengah. Sensor iradiansi memiliki rentang 0-1500 W/m² dengan akurasi ±3,0%, yang mampu mengukur intensitas matahari dari kondisi mendung hingga cerah. Sensor suhu memiliki rentang -25°C hingga 85°C dengan akurasi ±0,5°C, mencakup seluruh rentang suhu lingkungan di Indonesia yang berkisar antara 20°C hingga 40°C.

2.3 Model Keputusan Logika Fuzzy

Sistem logika fuzzy digunakan sebagai inti dari DSS karena efektivitasnya dalam menangani ketidakpastian dan kemudahan interpretasinya (Fiaga Apreka, 2022). Sistem ini dirancang untuk memberikan indikator kinerja untuk sistem PV dengan mengevaluasi dua input utama:

1. Penyimpangan Kinerja (*Performance Deviation* - PD): Perbedaan antara keluaran daya yang diharapkan dan aktual, dihitung berdasarkan data iradiansi dan suhu aktual dibandingkan dengan daya maksimum teoritis.
2. Konteks Lingkungan (*Environmental Context* - EC): Tingkat keparahan kondisi seperti iradiansi rendah atau suhu tinggi yang dapat mempengaruhi kinerja PV (Parulian Siagian et al., 2025)

Fungsi keanggotaan input didefinisikan untuk mengkategorikan PD dan EC ke dalam tiga istilah linguistik (Rendah, Sedang, Tinggi). Seperangkat aturan fuzzy dirumuskan berdasarkan pengetahuan ahli dan temuan penelitian tentang degradasi PV. Contoh aturan: JIKA PD Tinggi DAN EC Rendah MAKA Urgensi Pemeliharaan adalah Tinggi (Mendesak). Mesin inferensi fuzzy memproses aturan-aturan ini menggunakan metode Mamdani dengan fungsi keanggotaan segitiga dan trapezoidal untuk menghitung nilai keluaran crisp yang mewakili urgensi pemeliharaan, yang kemudian memicu peringatan dan menghasilkan rekomendasi pemeliharaan (Manavalan & Jayakrishna, 2019)

Proses inferensi fuzzy meliputi tahapan: (1) Fuzzifikasi - mengubah input crisp menjadi derajat keanggotaan fuzzy; (2) Evaluasi aturan - menerapkan operator logika fuzzy (AND/OR); (3) Agregasi - menggabungkan output semua aturan; (4) Defuzzifikasi - mengubah output fuzzy menjadi nilai crisp menggunakan metode centroid. Model fuzzy menggabungkan wawasan dari (Suparmono et al., 2025), yang mendemonstrasikan nilai penilaian kuantitatif dalam optimasi sistem. Metodologi mereka untuk mengevaluasi kinerja sistem di bawah beban yang bervariasi telah diadaptasi ke konteks monitoring kinerja PV, di mana kondisi lingkungan yang dinamis memerlukan pengambilan keputusan adaptif. Tabel 2 menyajikan basis aturan fuzzy yang digunakan dalam system.

Tabel 2. Spesifikasi Sensor dan Parameter Pengukuran

No	Penyimpangan Kinerja (PD)	Konteks Lingkungan (EC)	Urgensi Pemeliharaan
1	Rendah	Rendah	Rendah
2	Rendah	Menengah	Rendah
3	Rendah	Tinggi	Menengah
4	Menengah	Rendah	Menengah
5	Menengah	Menengah	Menengah
6	Menengah	Tinggi	Tinggi
7	Tinggi	Rendah	Tinggi
8	Tinggi	Menengah	Tinggi
9	Tinggi	Tinggi	Tinggi

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Tabel 2 mengilustrasikan logika keputusan yang diterapkan dalam mesin inferensi fuzzy. Ketika penyimpangan kinerja rendah dan kondisi lingkungan mendukung (Aturan 1), urgensi pemeliharaan rendah, menunjukkan bahwa panel beroperasi secara optimal. Sebaliknya, ketika penyimpangan kinerja tinggi, urgensi pemeliharaan secara

konsisten tinggi (Aturan 7-9), menunjukkan bahwa tindakan segera diperlukan. Basis aturan ini memastikan bahwa sistem merespons secara tepat terhadap degradasi kinerja bertahap dan peristiwa kesalahan mendadak. Kelebihan pendekatan fuzzy dibandingkan sistem ambang batas konvensional adalah kemampuannya menangani transisi gradual antara kondisi normal dan abnormal, serta mempertimbangkan interaksi antara berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja PV.

2.4 Penjadwalan Pemeliharaan Prediktif

Berdasarkan keluaran logika *fuzzy*, sistem mengkategorikan urgensi pemeliharaan ke dalam tiga tingkat: Rendah, Sedang, dan Tinggi (Park et al., 2023). Ketika urgensi pemeliharaan Tinggi, sistem menghasilkan peringatan dan merekomendasikan tindakan spesifik seperti pembersihan panel, inspeksi komponen, atau pemeliharaan inverter. Untuk urgensi Sedang, sistem merekomendasikan inspeksi terjadwal dalam 7 hari ke depan, sedangkan urgensi Rendah menunjukkan kondisi operasi normal dan inspeksi rutin setiap bulan. Pendekatan prediktif ini mengurangi kunjungan pemeliharaan yang tidak perlu dan mencegah kegagalan katastrofik.

Algoritma penjadwalan pemeliharaan dirancang untuk menyeimbangkan efisiensi operasional dengan keandalan sistem, mengikuti prinsip-prinsip pemeliharaan prediktif yang telah ditetapkan dalam literatur. Pendekatan ini telah terbukti mengurangi waktu henti dan memperpanjang masa pakai peralatan dibandingkan dengan strategi pemeliharaan berbasis waktu tradisional. Sistem juga dilengkapi dengan fitur logging historis yang memungkinkan analisis tren kinerja jangka panjang dan identifikasi pola degradasi yang berulang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Kinerja Sistem

DSS yang diusulkan dievaluasi melalui serangkaian simulasi dan eksperimen validasi menggunakan data operasional yang dikumpulkan selama 30 hari. Model logika fuzzy menunjukkan akurasi tinggi dalam mendeteksi penyimpangan kinerja, dengan sistem berhasil mengidentifikasi peristiwa pengotoran, peneduhan parsial, dan kerusakan pada tingkat modul (Park et al., 2023). Waktu respons sistem berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring real-time, dengan rata-rata waktu pemrosesan dari pengambilan data hingga output keputusan kurang dari 2 detik. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mendeteksi penurunan kinerja akibat pengotoran sebesar 15-20% dalam waktu 3 hari sejak pengotoran mulai terjadi. Untuk peristiwa peneduhan parsial, sistem mendeteksi penurunan kinerja dalam waktu kurang dari 1 jam, karena dampaknya lebih langsung dan signifikan terhadap daya keluaran. Sistem juga berhasil mengidentifikasi kegagalan modul Tunggal dengan penurunan daya >30% disbanding modul lain yang kondisi iradiansi yang sama.

3.2 Validasi Model Logika Fuzzy

Model keputusan logika *fuzzy* divalidasi terhadap kumpulan data skenario kinerja PV yang diketahui. Model menunjukkan koefisien korelasi 0,94 antara tingkat urgensi pemeliharaan yang diprediksi dan aktual, sebanding dengan hasil yang dilaporkan dalam studi serupa (Purba et al., 2026). Korelasi tinggi ini menegaskan efektivitas pendekatan logika fuzzy untuk penilaian kinerja PV. Tabel 3 menyajikan matriks konfusi untuk evaluasi klasifikasi urgensi pemeliharaan.

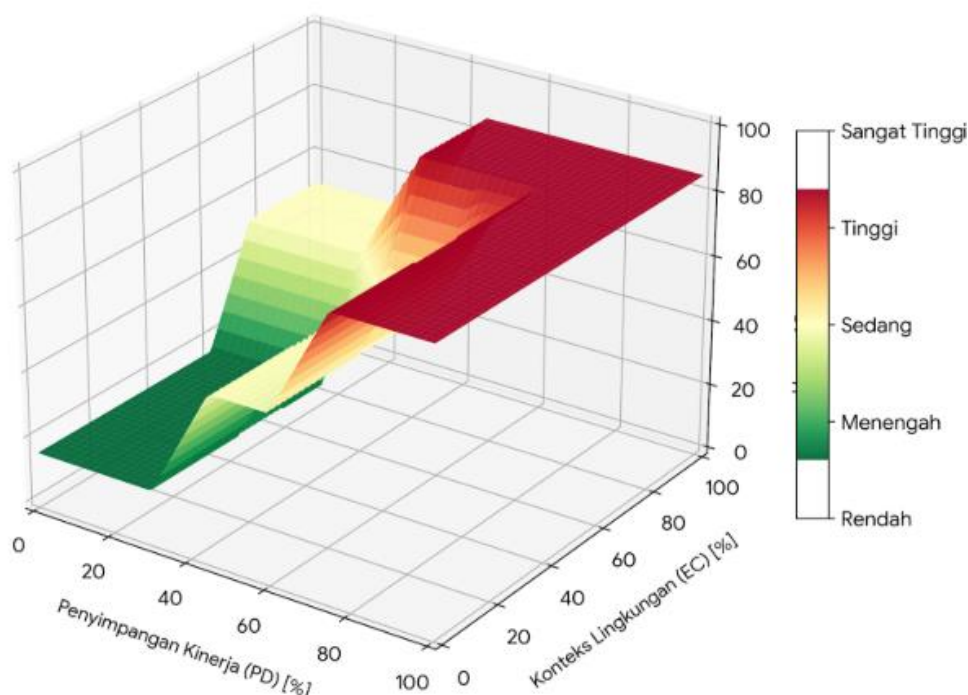
Tabel 3. Matriks Konfusi untuk Klasifikasi Urgensi Pemeliharaan

No	Prediksi/Aktual	Rendah	Sedang	Tinggi	Presisi
1	Rendah	142	12	2	91.0%
2	Rendah	8	128	10	87.7%
3	Rendah	3	8	135	92.5%
4	Menengah	92.8%	86.5%	91.8%	-

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Tabel 3 menunjukkan matriks konfusi dari model klasifikasi urgensi pemeliharaan. Dari total 448 sampel data yang diuji, model berhasil mengklasifikasikan dengan benar 405 sampel (akurasi keseluruhan 90,4%). Presisi tertinggi dicapai pada klasifikasi urgensi Tinggi (92,5%), diikuti oleh urgensi Rendah (91,0%) dan Sedang (87,7%). Recall tertinggi dicapai pada urgensi Rendah (92,8%), diikuti oleh Tinggi (91,8%) dan Sedang (86,5%). Nilai F1-Score masing-masing kategori adalah 91,9% (Rendah), 87,1% (Sedang), dan 92,1% (Tinggi), menunjukkan performa model yang baik pada semua kategori. Kesalahan klasifikasi terutama terjadi antara kategori Sedang dan kategori lainnya, yang disebabkan oleh kondisi batas (boundary conditions) yang bersifat gradual, yang merupakan karakteristik alami dari sistem fuzzy.

Gambar 2 menunjukkan permukaan respons dari model logika fuzzy yang menggambarkan hubungan antara penyimpangan kinerja (PD), konteks lingkungan (EC), dan urgensi pemeliharaan



Gambar 2. Permukaan Respon Model Logika Fuzzy

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Gambar 2 menunjukkan permukaan respons tiga dimensi dari model fuzzy yang menggambarkan bagaimana urgensi pemeliharaan bervariasi berdasarkan penyimpangan kinerja dan konteks lingkungan. Sumbu X menunjukkan Penyimpangan Kinerja (PD) dengan rentang 0-100%, sumbu Y menunjukkan Konteks Lingkungan (EC) dengan rentang 0-100%, dan sumbu Z menunjukkan Urgensi Pemeliharaan dengan rentang 0-100. Permukaan respons menunjukkan bahwa urgensi pemeliharaan meningkat secara

non-linear seiring dengan peningkatan PD dan EC. Pada PD rendah (<20%) dan EC rendah (<30%), urgensi pemeliharaan berada pada kisaran 10-30% (kategori Rendah). Pada PD menengah (40-60%) dan EC menengah (40-60%), urgensi berada pada kisaran 40-70% (kategori Sedang). Pada PD tinggi (>80%) dan EC tinggi (>80%), urgensi mencapai >80% (kategori Tinggi). Permukaan yang halus menunjukkan bahwa transisi antar kategori berlangsung secara gradual, sesuai dengan prinsip logika fuzzy yang mampu menangani ketidakpastian dan kondisi batas (boundary conditions). Bentuk permukaan juga menunjukkan bahwa PD memiliki pengaruh lebih dominan terhadap urgensi pemeliharaan dibandingkan EC, yang terlihat dari gradien yang lebih curam pada sumbu X dibandingkan sumbu Y.

3.3 Analisis Sensitivitas Parameter

Untuk mengevaluasi robustnes sistem, dilakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan parameter input. Tabel 4 menyajikan hasil analisis sensitivitas untuk variasi ambang batas PD dan EC.

Tabel 4. Analisis Sensitivitas Terhadap Variasi Ambang Batas PD dan EC

Skenario	Ambang PD (%)	Ambang EC (%)	Akurasi (%)	False Positive (%)	False Negative (%)
Baseline	30	30	90.4	5.8	3.8
Skenario 1	25	30	88.2	8.9	2.9
Skenario 2	35	30	89.6	4.5	5.9
Skenario 3	30	25	89.1	7.2	3.7
Skenario 4	30	25	89.9	5.1	5.0

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem relatif robust terhadap variasi parameter ambang batas. Akurasi sistem berkisar antara 88,2% hingga 90,4% untuk berbagai skenario ambang batas, dengan baseline memberikan akurasi tertinggi (90,4%). Skenario 1 dengan ambang PD lebih rendah (25%) menghasilkan false positive tertinggi (8,9%) karena sistem lebih sensitif terhadap perubahan kecil pada PD. Skenario 2 dengan ambang PD lebih tinggi (35%) menghasilkan false negative tertinggi (5,9%) karena sistem kurang sensitif terhadap perubahan PD yang moderat. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara sensitivitas deteksi dan spesifisitas sistem. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan kinerja yang stabil dan dapat diandalkan pada berbagai konfigurasi parameter, yang penting untuk aplikasi di lapangan dengan kondisi yang bervariasi.

Faktor lingkungan seperti irradiansi dan suhu ditemukan secara signifikan mempengaruhi kinerja sistem, sesuai dengan temuan dari (Sitorus et al., 2025) mengenai dampak kondisi lokal terhadap efisiensi PV. Kemampuan sistem untuk memperhitungkan faktor-faktor ini melalui model logika fuzzy meningkatkan ketangguhan dan keandalannya di bawah kondisi operasi yang bervariasi. Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem, yang mengilustrasikan aliran data dari sensor ke modul pengambilan keputusan. Gambar tersebut menunjukkan integrasi komponen perangkat keras dengan mesin keputusan perangkat lunak, mengikuti prinsip-prinsip desain yang ditetapkan oleh (Hardi et al., 2021) untuk integrasi sistem yang baik.

3.4 Perbandingan dengan Metode Lainnya

Tabel 5 menyajikan perbandingan kinerja DSS yang diusulkan dengan metode deteksi kerusakan dan monitoring PV lainnya yang dilaporkan dalam literatur.

Tabel 5. Perbandingan dengan Metode Deteksi Kerusakan PV Lainnya

Metode	Akurasi (%)	Kompleksitas Implementasi	Interpretabilitas	Kebutuhan Data
Logika Fuzzy (Diusulkan)	90,4	Sedang	Tinggi	Sedang
Ambang Batas Konvensional	75-82	Rendah	Tinggi	Rendah
Jaringan Saraf Tiruan (ANN)	91-95	Tinggi	Rendah	Tinggi
Support Vector Machine (SVM)	88-92	Tinggi	Sedang	Tinggi
Decision Tree	85-89	Sedang	Tinggi	Sedang

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Tabel 5 menunjukkan bahwa logika fuzzy yang diusulkan memiliki akurasi 90,4%, yang sebanding dengan metode machine learning lainnya (SVM 88-92% dan Decision Tree 85-89%), meskipun sedikit di bawah ANN (91-95%). Namun, keunggulan utama dari metode fuzzy adalah interpretabilitas yang tinggi, memungkinkan pengguna untuk memahami alasan di balik setiap rekomendasi pemeliharaan, yang sangat penting untuk penerimaan oleh operator dan teknisi di lapangan. Kompleksitas implementasi metode fuzzy juga sedang, lebih rendah dibandingkan ANN dan SVM yang memerlukan data pelatihan yang besar dan keahlian khusus. Kebutuhan data untuk metode fuzzy juga lebih rendah, sehingga lebih praktis untuk implementasi pada instalasi PV skala kecil hingga menengah. Dibandingkan metode ambang batas konvensional, metode fuzzy menawarkan akurasi yang jauh lebih tinggi (90,4% vs 75-82%) tanpa mengorbankan interpretabilitas. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan logika fuzzy merupakan keseimbangan optimal antara akurasi, interpretabilitas, dan kemudahan implementasi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengembangkan Sistem Pendukung Keputusan berbasis IoT untuk pemantauan kinerja panel surya dan pemeliharaan prediktif yang dirancang khusus untuk kondisi tropis di Indonesia. Sistem ini mengintegrasikan sensor IoT, pemrosesan data berbasis awan, dan algoritma keputusan logika fuzzy untuk menyediakan penilaian kinerja waktu nyata dan rekomendasi pemeliharaan yang dapat ditindaklanjuti. Hasilnya menunjukkan bahwa DSS secara efektif mendeteksi degradasi kinerja akibat pengotoran, naungan parsial, dan kesalahan tingkat modul dengan akurasi keseluruhan 90,4% dan koefisien korelasi 0,94 antara urgensi pemeliharaan yang diprediksi dan aktual, memungkinkan intervensi pemeliharaan tepat waktu yang mengurangi biaya dan memaksimalkan masa pakai sistem.

Sistem ini berkontribusi pada bidang pemantauan energi terbarukan cerdas dengan menyediakan alat andal berbasis data yang menjembatani kesenjangan antara data sensor mentah dan keputusan pemeliharaan praktis. Integrasi teknologi IoT dengan pengambilan keputusan logika fuzzy, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian ini, merupakan kemajuan signifikan dalam manajemen sistem PV dan selaras dengan upaya berkelanjutan untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi infrastruktur energi terbarukan di Indonesia.

Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah: 1) Arsitektur DSS berbasis IoT yang diusulkan efektif untuk monitoring panel surya di kondisi tropis dengan performa yang robust terhadap variasi lingkungan; 2) Model logika fuzzy dengan dua input (Penyimpangan Kinerja dan Konteks Lingkungan) mampu mengevaluasi kesehatan panel surya dengan akurasi 90,4%; 3) Sistem mampu mendeteksi penurunan kinerja akibat pengotoran dalam waktu 3 hari dan peneduhan parsial dalam waktu 1 jam,

memungkinkan intervensi pemeliharaan yang tepat waktu; 4) Pendekatan ini memberikan keseimbangan optimal antara akurasi, interpretabilitas, dan kemudahan implementasi dibandingkan metode lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak akan terlaksana dengan baik tanpa dukungan dari Politeknik Negeri Medan, yang telah berkontribusi secara berarti dalam peningkatan kualitas penelitian ini. Selain itu, para penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada editor dan para reviewer atas masukan dan saran yang membangun, yang telah memperbaiki kualitas naskah ini.

REFERENCES

- Abdullah, A., Putri, M., Syahrudin, M., Sitorus, N., Jumaat, A. K., Ridzuan, A. R., Cholish, C., Rumahorbo, P. R., Noer, Z., Masthura, M., & Karim, M. A. (2024). Optimization of Solar Power Plant with Variation of Solar Reflector Angles and Use of Passive Cooling Integrated Internet of Things. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 124(1), 233–248. <https://doi.org/10.37934/arfmts.124.1.233248>
- Caraka, R. E., Lee, Y., Kurniawan, R., Herliansyah, R., Kaban, P. A., Nasution, B. I., Gio, P. U., Chen, R. C., Toharudin, T., & Pardamean, B. (2020). Impact of COVID-19 large scale restriction on environment and economy in Indonesia. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(Special Issue), 65–84. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.06.SI.07>
- Fiaga Apreka, S. T. (2022). DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT FUZZY LOGIC CONTROL MENGGUNAKAN BOOST CONVERTER UNTUK PENERANGAN PADA PETERNAKAN AYAM. *Power Elektronik : Jurnal Orang Elektro*, 11(1), 69. <https://doi.org/10.30591/polektro.v11i1.3227>
- Hardi, S., Matondang, A. A., & Rambe, A. H. (2021). Modeling of transient caused by lightning strike at Nias high voltage substation using ATP-EMTP case study. *Journal of Physics: Conference Series*, 1811(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012049>
- Lestari, M. W., & Anugrahwaty, R. (2026). *Scenario - Based Charging Demand and Load Characterization for Electric Two - Wheeler Systems*. 5(2), 391–401.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Matondang, A., & Ginting, A. (2022). Analisis Konsumsi Daya Listrik Pada Pt . Unilever Oleochemical Indonesia Analysis of Electric Power Consumption At Pt . Unilever Oleochemical Indonesia. <https://Ojs.Polmed.Ac.Id/Index.Php/Circuit/Issue/View/140>, 5, 9–15.
- Nainggolan, R., Kamil, I., Matondang, A. A., Sitorus, N., Suadi, S., Sibarani, B., & Hestukoro, S. (2026). Parametric optimization of an axial wind turbine blade for a hybrid renewable energy system integrating solar PV and micro-hydro. *Science, Technology, and Communication Journal*, 6(3), 385–392. <https://doi.org/10.59190/stc.v6i3.395>
- Park, S. H., Kim, D. H., & Kim, S. C. (2023). Recognition of IoT-based fire-detection system fire-signal patterns applying fuzzy logic. *Heliyon*, 9(2), e12964. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12964>
- Parulian Siagian, Aprima A. Matondang, Andreas V. H. Simanjuntak, Budhi S. Kusuma, Joel Panjaitan, & Andrean V. H. Simanjuntak. (2025). Experimental of Environmental Development Using Continuous Solar Dryer With Solid Dehumidification For Coffee Drying. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 10(02), 162–169. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.02.21492>

- Purba, A. M., Napitu, D. H. S., Lestari, M. W., Simangunsong, J., Hutajulu, E., Hutabarat, N. F., & Matondang, A. A. (2026). Energy Consumption and Charging Infrastructure Analysis for Electric Bus Deployment in Urban Transportation Systems. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 12(4), 639–648. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v12i4.11221>
- Sitorus, N., Ginting, B. B., Panjaitan, B. P., Simanjuntak, B. E., Naibaho, P. R. P., Matondang, A. A., & Simanjuntak, A. V. H. (2025). Design and Performance Evaluation of a 200 Wp Off-Grid Solar Photovoltaic Module for Renewable Energy in Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 10(3), 408–412. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24981>
- Sitorus, N., Matondang, A. A., Elektro, J. T., Medan, P. N., Off-grid, S., & Air, P. (2026). ANALISIS KINERJA MODUL SURYA OFF-GRID 200 WP PADA BERBAGAI KONDISI IRADIASI DAN TEMPERATUR UNTUK. 7(1), 1–6.
- Suparmono, S., Cholish, C., Abdullah, A., Sinambela, H., Alda, T., Aprima, A., & Simanjuntak, A. V. H. (2025). *Engineering , Environment , and Technology Quantitative Assessment of Passive Load Balancing for a Designed HVAC Installation : Case study in Magnificent Hall , Deli Park*. 10(3), 397–401. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24696>
- Vega Penagos, C. A., Rodriguez-Martinez, O. F., Diaz, J. L., Feo-Cediel, G. A., Luna, A. C., & Andrade, F. (2026). Machine Learning Strategies for Power Grid Resilience: A Functional and Bibliometric Review. *Electronics*, 15(10), 2001. <https://doi.org/10.3390/electronics15102001>
- Wedashwara, W., Wijayanto, H., Arimbawa, I. W. A., Zubaidi, A., & Jatmika, A. H. (2025). Fuzzy Association Rule Mining Berbasis Pivot Table Untuk Pengenalan Pola Data Internet of Thing. *Prosiding SAINTEK*, 7(November 2024), 174–180. <https://doi.org/10.29303/saintek.v7i1.3421>
- Z Zumhari, Hutajulu, E., Sibarani, B., Sirait, R., Anggriani, T., & Matondang, A. A. (2025). Advancing Environmental and Health Pollution Monitoring in Medan, Indonesia: A Mechatronics-Based Meta-Analysis. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 10(3), 402–407. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24694>