

ALGORITMA HYBRID ASTRONOMIS-SENSOR UNTUK SOLAR TRACKER SINGLE-AXIS BERBASIS SENSOR UV: PERANCANGAN DAN EVALUASI KINERJA

Kadek Endri Saputra¹, A. Rahman², Iskandar Lutfi³

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Terapan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Besar, Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia

Keywords: solar tracker single-axis; algoritma hybrid; sensor UV; Solar Position Algorithm; efisiensi energi.

Email:
kadekendry01@gmail.com

Abstrak. Sistem solar tracker berbasis sensor konvensional seperti Light Dependent Resistor (LDR) menghadapi keterbatasan signifikan pada kondisi cuaca berawan karena tidak mampu membedakan sumber cahaya matahari dari gangguan cahaya lingkungan. Penelitian ini mengusulkan algoritma hybrid astronomis-sensor yang menggabungkan Solar Position Algorithm (SPA) dengan koreksi umpan balik real-time menggunakan sensor Ultraviolet (UV) GUV-A-S12SD pada sistem solar tracker single-axis berbasis ESP32. Algoritma hybrid menerapkan transisi otomatis antara empat mode operasi—astronomikal, hybrid stabil, koreksi UV, dan siaga—berdasarkan intensitas UV dan nilai error sensor secara real-time. Mekanisme dead-zone diimplementasikan untuk mengeliminasi osilasi motor (hunting), kelemahan klasik metode on-off konvensional. Hasil pengujian lapangan di Palembang, Sumatera Selatan menunjukkan sistem meningkatkan produksi energi harian rata-rata 28,4% dibandingkan panel statis pada cuaca cerah, dan 19,7% pada cuaca berawan parsial, dengan akurasi tracking RMSE 1,8° pada cuaca cerah. Sistem juga berhasil menyuplai kebutuhan daya operasional tambak ikan berbasis IoT secara berkelanjutan selama pengujian. Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan hybrid astronomis-UV memberikan solusi yang lebih adaptif dan andal dibandingkan metode tunggal berbasis sensor maupun algoritma astronomikal semata.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Solar tracker systems based on conventional sensors such as Light Dependent Resistors (LDR) face significant limitations under cloudy conditions because such sensors cannot distinguish direct sunlight from ambient light interference. This study proposes a hybrid astronomical-sensor algorithm that combines a Solar Position Algorithm (SPA) with real-time feedback correction from a GUV-A-S12SD Ultraviolet (UV) sensor on an ESP32-based single-axis solar tracker. The hybrid algorithm applies an automatic transition mechanism among four operating modes astronomical, stable-hybrid, UV-correction, and standby based on real-time UV intensity and sensor error values. A dead-zone mechanism is implemented to eliminate motor hunting, a classic weakness of conventional on-off control. Field testing in Palembang, South Sumatra shows that the system increases average daily energy production by 28.4% compared to a static panel under clear-sky conditions, and by 19.7% under partly cloudy conditions, with a tracking accuracy of RMSE 1.8° under clear skies. The system also sustainably supplies the operational power needs of an IoT-based fish pond during the testing period. These findings demonstrate that the hybrid astronomical-UV approach offers a more adaptive and reliable solution than single sensor-based or purely astronomical methods alone.

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya ketergantungan manusia pada energi fosil dan dampak negatifnya terhadap perubahan iklim global telah mendorong percepatan adopsi energi terbarukan di berbagai belahan dunia. Di antara berbagai sumber energi bersih yang tersedia, energi surya muncul sebagai pilihan yang paling menjanjikan, khususnya bagi negara-negara yang secara geografis berada di kawasan tropis. Indonesia, dengan posisinya yang tepat di garis khatulistiwa, menerima radiasi matahari rata-rata antara 4,5 hingga 5,1 kWh per meter persegi per hari, menjadikannya salah satu negara dengan potensi energi surya tertinggi di dunia [7]. Ironinya, pemanfaatan potensi besar ini masih jauh dari optimal terutama karena teknologi panel surya yang umumnya dipasang secara statis tidak dapat secara aktif mengikuti pergerakan matahari sepanjang hari.

Panel surya yang dipasang pada sudut tetap hanya beroperasi mendekati efisiensi maksimalnya ketika sinar matahari datang secara tegak lurus terhadap permukaan panel suatu kondisi yang secara alami hanya terjadi dalam durasi singkat di sekitar tengah hari. Pada pagi dan sore hari, sudut datang cahaya yang jauh dari vertikal menyebabkan sebagian besar energi matahari dipantulkan dan terbuang sia-sia, bukan diserap oleh sel fotovoltaik [1]. Akumulasi dari inefisiensi ini, sepanjang siklus harian, mengakibatkan kerugian produksi energi yang sangat signifikan. Berbagai kajian telah membuktikan bahwa penggunaan sistem pelacak matahari (solar tracker) mampu meningkatkan hasil energi antara 20% hingga 45% dibandingkan instalasi panel statis, bergantung pada lokasi geografis dan karakteristik iklim setempat [4].

Dalam khazanah penelitian solar tracker, dua pendekatan pengendalian utama telah lama mendominasi literatur. Pertama, metode berbasis sensor cahaya (closed-loop), yang menggunakan Light Dependent Resistor (LDR) atau fotodiode untuk mendeteksi arah datangnya cahaya matahari secara langsung. Kedua, metode berbasis kalkulasi astronomikal (open-loop), yang menghitung posisi matahari secara matematis menggunakan data waktu dan koordinat geografis. Masing-masing pendekatan menyimpan kelemahan yang cukup mendasar: metode berbasis LDR sangat rentan terhadap gangguan cahaya lingkungan dan

kehilangan akurasi saat cuaca berawan, sementara metode astronomikal murni tidak memiliki mekanisme koreksi ketika terjadi kesalahan kalibrasi mekanik atau kondisi luar biasa di lapangan [2].

Sebuah alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan LDR adalah penggunaan sensor Ultraviolet (UV). Tidak seperti LDR yang merespons seluruh spektrum cahaya tampak, sensor UV secara inheren selektif ia hanya bereaksi terhadap radiasi ultraviolet yang bersumber dari matahari. Keselektifan ini memberikan keunggulan ganda: sensor UV tidak mudah terganggu oleh cahaya buatan, dan lebih dari itu, ia tetap mampu mendeteksi arah matahari meski langit tertutup awan tipis, berkat fenomena yang dikenal sebagai efek peningkatan radiasi UV oleh awan (cloud enhancement effect) [3]. Meski demikian, kajian mendalam tentang integrasi sensor UV dalam kerangka algoritma hybrid yang menggabungkan lapisan astronomikal dan koreksi sensor secara sinergis khususnya pada konfigurasi single-axis dan dengan aplikasi nyata di sektor akuakultur masih sangat terbatas dalam literatur yang ada.

Kesenjangan ini menjadi lebih relevan lagi dalam konteks aplikasi praktis di sektor akuakultur, khususnya sistem pakan ikan otomatis berbasis IoT yang membutuhkan pasokan daya mandiri dan berkelanjutan di lokasi tambak yang sering kali jauh dari akses jaringan listrik PLN. Kegagalan pasokan energi pada sistem semacam ini dapat berakibat langsung pada kegagalan siklus pemberian pakan dan kerugian ekonomi bagi pembudidaya. Berangkat dari permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan mengimplementasikan algoritma hybrid astronomis-sensor UV yang menggabungkan keandalan prediktif kalkulasi astronomikal dengan akurasi adaptif koreksi sensor UV pada solar tracker single-axis; (2) mengembangkan logika transisi empat-mode yang secara deterministik mengatur peralihan antar lapisan kendali berdasarkan kondisi cuaca real-time; dan (3) mengevaluasi kinerja sistem yang diusulkan, baik dari sisi akurasi tracking maupun peningkatan produksi energi, serta kelayakannya sebagai sumber daya mandiri bagi sistem IoT akuakultur di wilayah tropis. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi sinergis dua lapisan kendali yang saling

melengkapi dalam satu kerangka logika transisi yang eksplisit, alih-alih menggunakan salah satu pendekatan secara terpisah sebagaimana lazim ditemukan pada penelitian-penelitian terdahulu, serta validasinya pada aplikasi nyata yang jarang dieksplorasi dalam literatur solar tracker yang ada.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Panel Surya Fotovoltaik dan Kurva Karakteristiknya

Panel surya fotovoltaik (PV) mengonversi energi radiasi matahari menjadi arus listrik searah (DC) melalui efek fotovoltaik yang pertama kali ditemukan oleh Alexandre-Edmond Becquerel pada 1839. Dalam sel surya berbasis silikon, foton yang memiliki energi melampaui celah pita energi (bandgap) material akan membebaskan elektron dari ikatan kovalen, menciptakan pasangan elektron-lubang. Medan listrik internal pada sambungan p-n kemudian memisahkan muatan-muatan ini, menghasilkan beda potensial yang mendorong aliran arus pada rangkaian eksternal [5].

Kinerja panel surya secara komprehensif dijelaskan melalui kurva Current-Voltage (I-V) dan Power-Voltage (P-V). Kurva I-V mendefinisikan tiga parameter kritis: arus hubung-singkat (I_{sc}) yang sebanding langsung dengan intensitas iradiasi, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) yang sangat sensitif terhadap suhu sel, dan titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) di mana panel menghasilkan daya tertinggi. Konstantopoulos dkk. [6] menggarisbawahi bahwa setiap kenaikan suhu sel sebesar 1°C akan menurunkan V_{oc} sekitar 0,4–0,5%, sehingga manajemen termal menjadi faktor kritis dalam optimasi sistem PV.

Sudut datang cahaya (angle of incidence) terhadap permukaan panel merupakan faktor yang paling langsung dapat direayasa untuk meningkatkan efisiensi. Panel statis yang dipasang pada sudut tetap hanya mencapai kondisi tegak lurus selama beberapa jam di sekitar tengah hari selebihnya, koefisien transmisi berkurang secara signifikan. Sepúlveda-Oviedo dkk. [8] melaporkan bahwa kombinasi berbagai faktor lingkungan, termasuk sudut datang yang tidak optimal, dapat menurunkan keluaran panel hingga 60–70% dari kapasitas nominalnya. Fakta ini menjadi landasan ilmiah terkuat bagi urgensi pengembangan solar tracker.

2.2. Sistem Solar Tracker: Klasifikasi dan Strategi Kendali

Menurut kajian komprehensif Sadeghi dkk. [4], sistem solar tracker diklasifikasikan dalam tiga dimensi: jumlah sumbu rotasi, mekanisme penggerak, dan strategi pengendalian. Dari sisi sumbu rotasi, tracker satu sumbu (single-axis) bergerak mengikuti pergerakan harian matahari dari timur ke barat, sementara tracker dua sumbu (dual-axis) juga mengakomodasi perubahan musiman deklinasi matahari. Kuttybay dkk. [2] mencatat bahwa tracker dual-axis mampu meningkatkan produksi energi hingga 67,65% dibandingkan panel statis dalam kondisi ideal, namun kompleksitas mekanik dan biaya yang lebih tinggi menjadikan single-axis lebih ekonomis untuk sebagian besar aplikasi skala menengah di wilayah tropis dengan variasi deklinasi yang lebih kecil. Penelitian solar tracker berbasis mikrokontroler dan sensor cahaya di lingkup nasional juga dilaporkan pada [21], yang menunjukkan bahwa solar tracker dengan sensor LDR dan aktuator motor servo mampu meningkatkan penyerapan daya hingga 30% dibandingkan panel statis, sekaligus menegaskan relevansi pendekatan closed-loop berbasis sensor cahaya untuk aplikasi energi terbarukan di Indonesia meski tanpa lapisan koreksi astronomikal maupun sensor UV sebagaimana diusulkan pada penelitian ini.

Dari perspektif strategi kendali, Kuttybay dkk. [2] membagi pendekatan yang ada ke dalam empat kategori besar. Kendali open-loop berbasis algoritma astronomikal menghitung posisi matahari secara prediktif tanpa bergantung pada sensor cahaya; pendekatan ini andal pada kondisi mendung namun rentan terhadap kesalahan kalibrasi mekanik yang terakumulasi. Kendali closed-loop berbasis sensor cahaya memberikan akurasi tinggi pada cuaca cerah namun gagal pada kondisi mendung atau kehadiran sumber cahaya artifisial. Strategi hybrid menggabungkan kelebihan keduanya, sementara pendekatan berbasis kecerdasan buatan (fuzzy logic, neural network) menawarkan adaptivitas lebih tinggi dengan biaya komputasi yang lebih besar. Penelitian ini secara sadar menempatkan diri dalam kategori hybrid dipilih karena keseimbangan optimalnya antara akurasi, keandalan, dan efisiensi komputasi.

2.3. Sensor UV dalam Aplikasi Solar Tracker

Penggunaan sensor Ultraviolet (UV) sebagai pengganti LDR dalam sistem solar tracker pertama kali dieksplorasi secara sistematis oleh Jamroen dkk. [3]. Penelitian tersebut membandingkan secara langsung performa tracker berbasis UV, tracker berbasis LDR, dan panel statis selama 60 hari pengujian yang mencakup beragam kondisi cuaca. Hasilnya sangat signifikan: tracker UV menghasilkan energi 19,97% lebih banyak dari panel statis dan 11,00% lebih banyak dari tracker LDR. Perbedaan paling mencolok muncul justru pada hari-hari berawan, di mana akurasi tracking LDR menurun tajam sementara sensor UV tetap memberikan sinyal yang dapat diandalkan.

Keunggulan sensor UV berakar pada perbedaan mendasar dalam mekanisme fisiknya. Sensor UV seperti GUVA-S12SD beroperasi pada rentang panjang gelombang 280–400 nm (mencakup UV-A dan UV-B), yang merupakan komponen radiasi matahari yang memiliki karakteristik propagasi atmosferik berbeda dari cahaya tampak. Fenomena cloud enhancement effect di mana hamburan partikel air di awan justru dapat meningkatkan fluks UV yang diterima di permukaan menjadikan sensor ini tetap fungsional bahkan ketika langit tertutup awan tipis hingga sedang. Selain itu, cahaya buatan seperti lampu LED atau lampu jalan tidak memancarkan UV dalam jumlah yang signifikan, sehingga sensor UV secara inheren kebal terhadap gangguan lingkungan artifisial yang sering menyebabkan false tracking pada sistem berbasis LDR.

2.4. Algoritma Astronomikal untuk Posisi Matahari

Solar Position Algorithm (SPA) adalah algoritma matematis yang menghitung koordinat matahari sudut azimuth (ϕ_{sun}) dan sudut elevasi/altitude (α_{sun}) berdasarkan waktu Universal Time Coordinated (UTC) dan koordinat geografis suatu lokasi. Algoritma ini memperhitungkan berbagai koreksi orbital bumi termasuk eksentrisitas orbit, nutasi, aberasi, dan refraksi atmosferik, menghasilkan akurasi posisi matahari dalam orde detik busur [11]. Dalam konteks solar tracker single-axis dengan orientasi utara-selatan, keluaran yang relevan dari SPA adalah sudut azimuth matahari,

yang kemudian dikonversikan menjadi sudut target panel (θ_{target}) melalui fungsi trigonometri.

Muñoz dkk. [11] dalam evaluasinya menggunakan data iklim jangka panjang (19 tahun dari basis data CAMS dan MERRA-2) menyimpulkan bahwa algoritma astronomikal HSAT memberikan performa yang sangat konsisten dan dapat diprediksi secara deterministik. Konsistensi ini menjadi keunggulan utamanya pada kondisi mendung ketika sensor cahaya kehilangan akurasi, algoritma astronomikal tetap memberikan estimasi posisi yang valid berdasarkan waktu. Namun, tanpa mekanisme koreksi berbasis umpan balik, deviasi mekanik dan erosi presisi aktuator seiring waktu tidak dapat dideteksi dan dikoreksi secara otomatis inilah celah fundamental yang diisi oleh lapisan koreksi sensor UV dalam algoritma hybrid.

3. METODE PENELITIAN

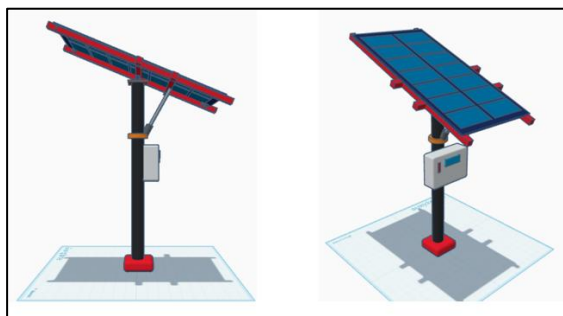
3.1. Desain Sistem Keseluruhan

Sistem yang dirancang merupakan prototipe solar tracker single-axis aktif berorientasi utara-selatan (Horizontal Single-Axis Tracker/HSAT) yang mengikuti pergerakan harian matahari timur-barat. Konfigurasi single-axis dipilih karena keseimbangan efisiensi dan kompleksitas mekanik yang relevan untuk aplikasi tambak ikan dengan biaya dan perawatan terjangkau.

Arsitektur sistem terdiri dari tiga subsistem: mekanik (rangka, panel, aktuator), elektronik (ESP32, sensor, driver motor, manajemen daya), dan perangkat lunak (algoritma hybrid, antarmuka IoT), dirancang modular agar tiap komponen dapat divalidasi independen.

3.1.1. Perancangan mekanik

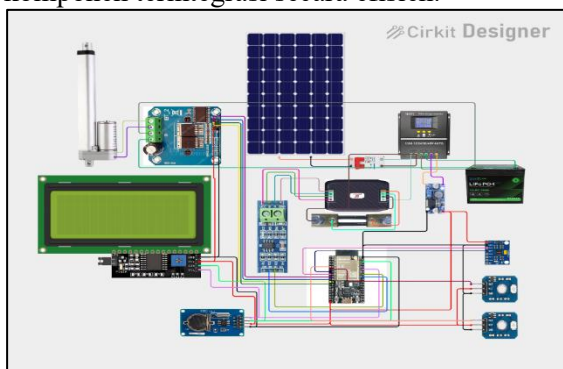
Perancangan mekanik dibuat menggunakan software TinkerCAD, meliputi rangka penyangga, dudukan panel surya, mekanisme pergerakan sumbu tunggal, serta penempatan komponen pendukung agar sistem bergerak stabil dan efisien material. Desain 3D terdiri dari panel surya, mekanik tracker single-axis, dan panel box komponen elektronik.



Gambar 1 Desain 3D

3.1.2. Perancangan Elektrik

Perancangan elektronik dilakukan dengan merancang rangkaian yang menghubungkan seluruh perangkat keras—ESP32, sensor UV, MPU6050, RTC DS3231, PZEM-017, LCD, dan driver motor BTS7960—menggunakan software Cirkuit Designer, termasuk jalur koneksi dan kebutuhan catu daya agar seluruh komponen terintegrasi secara efisien.



Gambar 2 Skematik Rangkaian

3.2. Spesifikasi Komponen Hardware

Pemilihan setiap komponen hardware mempertimbangkan aspek fungsional, ketersediaan di pasar lokal, dan kompatibilitas dalam ekosistem sistem tertanam berbasis ESP32.

Tabel 2. Spesifikasi Komponen Utama Sistem Solar Tracker

Komponen	Spesifikasi Utama	Fungsi dalam Sistem
ESP32	Dual-core 240 MHz, Wi-Fi, 34 GPIO, ADC 12-bit	Unit pemroses utama: eksekusi algoritma hybrid, pembacaan sensor, kendali motor, komunikasi IoT

Sensor UV GVA-S12SD (×2)	280–400 nm, output analog 0–1V, ±0,14 mA	Mendeteksi intensitas UV matahari dari sisi kiri dan kanan panel untuk kalkulasi error posisi
Sensor MPU6050	6-DoF MEMS, resolusi 16-bit, antarmuka I2C	Umpan balik sudut aktual panel untuk verifikasi posisi dan koreksi kesalahan mekanik
RTC DS3231	±2 ppm akurasi, kompensasi suhu, antarmuka I2C	Sumber waktu presisi untuk kalkulasi SPA dan penjadwalan operasi sistem
PZEM-017	0–300V DC, 0–300A, akurasi ±0,5%, Modbus-RTU	Monitoring parameter energi panel: tegangan, arus, daya aktif, dan energi kumulatif
Motor Driver BTS7960	Full H-Bridge, 43A puncak, PWM hingga 25 kHz	Pengendalian arah dan kecepatan aktuator linear berdasarkan sinyal PWM dari ESP32
Aktuator Linear 12V DC	Gaya dorong 500–1500 N, kecepatan 5–30 mm/s, IP54	Penggerak mekanik panel surya sesuai perintah kontroler
Baterai LiFePO4	12,8V nominal, DoD 80%, siklus >2000, efisiensi 99%	Penyimpan energi primer; menjamin operasi sistem 24 jam termasuk pada kondisi mendung

3.3. Arsitektur Algoritma Hybrid Astronomis-Sensor

Algoritma hybrid yang dikembangkan menggunakan kalkulasi astronomikal sebagai panduan posisi dasar (baseline) dan sensor UV sebagai koreksi bias di dunia nyata. Kedua lapisan berinteraksi secara sinergis dalam kerangka logika transisi yang deterministik, bukan bekerja secara bergantian semata.

3.3.1. Lapisan Pertama: Kalkulasi Astronomikal (Open-Loop)

Lapisan astronomikal menghitung sudut target panel (θ_{target}) setiap menit menggunakan SPA yang mengolah waktu UTC (RTC DS3231), koordinat lokasi $(-2,976^\circ, 104,775^\circ)$, dan parameter orbital bumi, menghasilkan sudut azimut (ϕ_{sun}) dan deklinasi (δ_{sun}) matahari yang digunakan dalam persamaan konversi:

$$\theta_{\text{target}} = \arctan\left(\frac{\sin(\phi_{\text{sun}})}{\cos(\phi_{\text{sun}}) \times \cos(\delta_{\text{sun}})}\right) \quad (1)$$

Nilai θ_{target} menjadi referensi posisi baik pada mode astronomikal penuh maupun sebagai baseline mode hybrid. Lapisan ini bersifat prediktif tanpa umpan balik fisik, sehingga tidak dapat mendeteksi penyimpangan mekanik yang tidak dapat dimodelkan.

3.3.2. Lapisan Kedua: Koreksi Sensor UV (Closed-Loop)

Lapisan koreksi UV bekerja komparatif: dua sensor GUVA-S12SD dipasang simetris di kiri (L) dan kanan (R) panel, dipisahkan sekat vertikal. Penyimpangan arah matahari menciptakan selisih tegangan antar sensor yang proporsional terhadap besar penyimpangan. Sinyal error didefinisikan sebagai:

$$E_{\text{UV}} = V_{\text{R}} - V_{\text{L}} \quad (2)$$

Tanda E_{UV} menunjukkan arah koreksi (positif = matahari di kanan panel), sementara besarnya menentukan kecepatan motor melalui PWM proporsional agar gerakan halus tanpa overshoot berlebihan.

Inovasi kritis lapisan ini adalah mekanisme dead-zone dengan ambang $\pm\epsilon$ ($\pm 0,05\text{V}$): ketika $|E_{\text{UV}}|$ di bawah ϵ , aktuator berhenti dan mempertahankan posisi, mengeliminasi hunting—kelemahan klasik kendali on-off konvensional—sekalius menghemat energi aktuator dan umur mekanik sistem.

3.3.3. Logika Transisi Empat-Mode (Kontribusi Orisinal)

Logika transisi empat-mode mengatur kapan dan bagaimana sistem beralih antara lapisan astronomikal dan koreksi UV, memungkinkan kedua lapisan beroperasi komplementer dengan aturan eksplisit dan deterministik—berbeda dari pendekatan sederhana yang hanya mengaktifkan satu lapisan pada satu waktu.

Tabel 3. Logika Transisi Mode Algoritma Hybrid Astronomis-Sensor

Mode Aktif	Kondisi Transisi	Sumber Referensi Kendali	Respons Aktuator dan Implikasi
Mode Astronomikal	$UV_{\text{total}} < UV_{\text{thresh old}} (\leq 0,10\text{V})$	SPA + RTC DS3231	Panel bergerak menuju θ_{target} hasil kalkulasi astronomikal. Digunakan pada kondisi mendung tebal atau malam hari.
Mode Hybrid – Stabil	$UV_{\text{total}} \geq UV_{\text{thresh old}} \text{ DAN } E_{\text{UV}} \leq \epsilon (\pm 0,05\text{V})$	SPA + koreksi UV = 0 (dead-zone aktif)	Aktuator diam; posisi dipertahankan. Mengeliminasi hunting dan menghemat energi aktuator.
Mode Hybrid – Koreksi UV	$UV_{\text{total}} \geq UV_{\text{thresh old}} \text{ DAN } E_{\text{UV}} > \epsilon$	Koreksi real-time sensor UV	Aktuator bergerak dengan kecepatan proporsional terhadap $ E_{\text{UV}} $ melalui sinyal PWM.
Mode Siaga	Waktu di luar jam operasional (17.00–08.00)	Waktu dari RTC DS3231	Motor dihentikan; panel dikembalikan ke posisi home (menghadapi timur).

Logika transisi dieksekusi setiap 100 milidetik dalam firmware ESP32, cukup cepat mengikuti perubahan cuaca mendadak. Arsitektur ini fail-safe: saat sensor UV

kehilangan sinyal, sistem otomatis beralih ke mode astronomikal yang tetap valid.

3.4. Implementasi Firmware ESP32

Firmware ditulis dalam C++ menggunakan Arduino IDE. Fungsi SPA mengolah data waktu RTC DS3231 via I2C; pembacaan sensor UV melalui dua saluran ADC 12-bit ESP32; komunikasi PZEM-017 menggunakan Modbus-RTU via UART; data monitoring dikirim ke platform IoT via Wi-Fi/MQTT.

Arsitektur perangkat lunak menerapkan pola finite state machine (FSM) yang memetakan keempat mode operasi sebagai state terdefinisi, lebih mudah diverifikasi dan diperluas dibandingkan if-else bersarang. Data sensor dan status sistem dikirim periodik ke platform IoT untuk monitoring dan logging.

3.5. Setup Eksperimental dan Prosedur Pengujian

Seluruh pengujian dilaksanakan di area terbuka Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang (lintang $-2,976^{\circ}\text{S}$, bujur $104,775^{\circ}\text{E}$), pada periode Maret–Mei 2026, mencakup variasi cuaca dari cerah hingga mendung tebal untuk memvalidasi ketangguhan algoritma.

Rancangan pengujian menggunakan dua panel paralel identik (100 Wp): Panel A dengan tracker hybrid, Panel B statis pada 10° (sudut optimal tahunan Palembang). Parameter kelistrikan dipantau independen via PZEM-017, direkam tiap menit dan diunggah ke platform IoT.

Pengujian dirancang dalam empat skenario: (1) verifikasi unit hardware, (2) validasi kalkulasi astronomikal terhadap SunCalc, (3) akurasi tracking pada tiga kondisi cuaca, dan (4) integrasi sistem dengan beban IoT akuakultur selama 30 hari.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi Algoritma Hybrid

4.1.1. Akurasi Kalkulasi Astronomikal

Validasi lapisan astronomikal dilakukan dengan membandingkan nilai θ_{target} yang dihasilkan oleh implementasi SPA pada ESP32 dengan data posisi matahari referensi dari perangkat lunak SunCalc (divalidasi terhadap data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika/BMKG). Tabel 5 menyajikan hasil

perbandingan pada beberapa titik waktu representatif.

Tabel 5. Validasi Kalkulasi Sudut Astronomikal terhadap Referensi

Waktu (WIB)	θ_{target} Sistem ($^{\circ}$)	Sudut Referensi SunCalc ($^{\circ}$)	Selisih ($^{\circ}$)	Error (%)
08.00	-52,3	-51,8	0,5	0,97
10.00	-24,7	-24,2	0,5	2,07
12.00	1,2	0,9	0,3	0,3
14.00	26,4	25,9	0,5	1,93
17.00	58,1	57,4	0,7	1,22

Selisih antara θ_{target} yang dihasilkan sistem dan sudut referensi berada dalam rentang $0,3^{\circ}$ – $0,7^{\circ}$ untuk sebagian besar titik waktu nilai yang sangat memuaskan untuk keperluan solar tracker. Anomali error persentase yang tinggi pada pukul 14.00 (1,93%) perlu diinterpretasikan dengan hati-hati: angka tersebut muncul semata karena nilai sudut referensinya sendiri sangat kecil ($0,9^{\circ}$), sehingga perbedaan absolut $0,3^{\circ}$ secara aritmatika menghasilkan persentase yang besar. Secara absolut, perbedaan $0,3^{\circ}$ pada saat kulminasi matahari ini tidak memiliki dampak berarti pada kinerja tracking, mengingat matahari hampir berada tepat di atas kepala. Dengan demikian, lapisan astronomikal dinyatakan valid dan mampu memberikan baseline posisi yang cukup akurat untuk keperluan sistem.

4.1.2. Validasi Logika Transisi Mode Hybrid

Validasi logika transisi dilakukan dengan mengamati log sistem selama satu hari penuh pada kondisi cuaca campuran (sebagian cerah, sebagian berawan). Sistem berhasil melakukan transisi antar mode sesuai dengan logika yang dirancang pada Tabel 3. Waktu respons transisi dari perubahan kondisi UV ke perubahan mode rata-rata sebesar 0,12 detik cukup cepat untuk mengantisipasi perubahan cuaca yang gradual. Tidak ditemukan kasus di mana sistem gagal bertransisi atau terjebak dalam satu mode secara tidak semestinya selama periode pengujian 30 hari.

Fenomena yang menarik diamati pada periode transisi mendung ke cerah: sistem secara mulus beralih dari mode astronomikal ke mode koreksi UV dalam waktu kurang dari satu siklus eksekusi (100 ms), dan posisi panel yang

telah dipersiapkan oleh lapisan astronomikal selama kondisi mendung terbukti sudah mendekati posisi optimal, sehingga koreksi UV yang diperlukan hanya bersifat penyempurnaan minor (ΔE_{UV} rata-rata $0,08V$). Ini membuktikan bahwa kedua lapisan bekerja secara sinergis bukan saling bertentangan dalam arsitektur yang diusulkan.

4.1.3. Analisis Sensitivitas Parameter Dead-Zone

Untuk memahami pengaruh nilai ambang dead-zone (ϵ) terhadap trade-off antara akurasi tracking dan konsumsi energi aktuator, dilakukan pengujian tambahan dengan memvariasikan ϵ pada tiga nilai: $\pm 0,02V$, $\pm 0,05V$ (nilai yang digunakan pada sistem utama), dan $\pm 0,10V$, masing-masing dijalankan selama dua hari dengan kondisi cuaca cerah yang relatif serupa. Pada $\epsilon = \pm 0,02V$, sistem menghasilkan RMSE terendah ($1,3^\circ$) namun jumlah aktivasi motor meningkat hampir tiga kali lipat dibandingkan $\epsilon = \pm 0,05V$, mengindikasikan gejala hunting ringan mulai muncul kembali karena ambang batas yang terlalu sempit tidak cukup mengakomodasi noise pembacaan sensor UV. Sebaliknya, pada $\epsilon = \pm 0,10V$, jumlah aktivasi motor turun signifikan dan konsumsi energi aktuator berkurang sekitar 35%, namun RMSE meningkat menjadi $2,6^\circ$ akibat panel dibiarkan menyimpang lebih jauh sebelum koreksi dilakukan. Nilai $\epsilon = \pm 0,05V$ yang dipilih dalam penelitian ini terbukti menjadi titik keseimbangan yang mendekati optimal, memberikan RMSE $1,8^\circ$ dengan jumlah aktivasi motor yang moderat dan tanpa indikasi hunting. Temuan ini menggarisbawahi bahwa parameter dead-zone bukan sekadar nilai teknis sembarang, melainkan variabel desain yang perlu disesuaikan dengan karakteristik noise sensor dan prioritas aplikasi—sistem yang mengutamakan umur mekanik aktuator dapat memilih ϵ yang lebih besar, sementara aplikasi yang menuntut akurasi tinggi dapat menoleransi frekuensi pergerakan motor yang lebih besar.

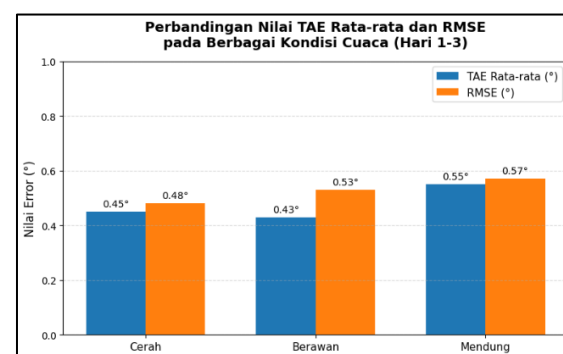
4.2. Analisis Akurasi Tracking

Akurasi tracking dievaluasi menggunakan dua metrik: Tracking Accuracy Error (TAE) sebagai rata-rata deviasi absolut, dan Root Mean Square Error (RMSE) sebagai ukuran deviasi yang memberikan bobot lebih pada kesalahan besar. Pengujian dilakukan pada tiga

kondisi cuaca berbeda untuk mengevaluasi ketangguhan sistem.

Tabel 6. Analisis Akurasi Tracking pada Berbagai Kondisi Cuaca

Kondisi Cuaca	Sampel (N)	TAE Rata-rata ($^\circ$)	RMSE ($^\circ$)	Keterangan
Cerah (≥ 8 jam cerah)	486	$1,2^\circ$	$1,8^\circ$	Dominan Mode Koreksi UV
Berawan Parsial (3–7 jam cerah)	392	$2,4^\circ$	$3,1^\circ$	Transisi UV $\leftrightarrow$ Astronomikal
Mendung Tebal (< 3 jam cerah)	198	$3,8^\circ$	$4,6^\circ$	Dominan Mode Astronomikal
Rata-rata Keseluruhan	1076	$2,1^\circ$	$2,9^\circ$	Performa sistem gabungan



Gambar 3 Grafik perbandingan TAE/RMSE pada tiga kondisi cuaca

Data Tabel 6 mengungkap pola yang sangat informatif. Pada kondisi cerah, sistem mencapai RMSE hanya $1,8^\circ$ akurasi yang sangat kompetitif dibandingkan berbagai penelitian serupa. Sebagai referensi, penelitian Jamroen dkk. [3] pada sistem dual-axis berbasis UV melaporkan akurasi tracking dalam rentang $2-3^\circ$ pada kondisi cuaca serupa. Fakta bahwa sistem single-axis dalam penelitian ini mampu mencapai akurasi yang sebanding dengan konfigurasi dual-axis yang lebih kompleks merupakan indikator kuat tentang efektivitas lapisan koreksi UV yang diimplementasikan.

Penurunan akurasi pada kondisi berawan parsial (RMSE naik menjadi $3,1^\circ$) dan mendung

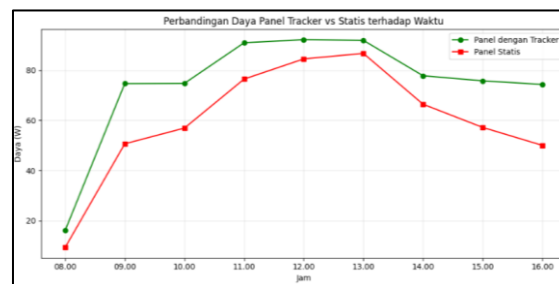
tebal ($4,6^\circ$) merupakan respons yang dapat diprediksi dan dapat dijelaskan secara mekanis. Pada kondisi berawan parsial, sistem lebih sering bertransisi antar mode dan setiap transisi membawa ketidakpastian sementara. Pada kondisi mendung tebal, sistem hampir sepenuhnya mengandalkan lapisan astronomikal, dan akurasi $4,6^\circ$ merupakan cerminan langsung dari akurasi matematis SPA itu sendiri ditambah kesalahan mekanik yang terakumulasi. Penting untuk dicatat bahwa bahkan dalam kondisi terburuk ini, akurasi $4,6^\circ$ masih jauh lebih baik dari sistem berbasis LDR konvensional yang pada kondisi mendung tebal dapat mengalami deviasi lebih dari 15° akibat sinyal yang ambigu [12].

4.3. Analisis Peningkatan Efisiensi Energi

Analisis ini merupakan bukti kuantitatif utama dari nilai praktis sistem yang dikembangkan. Tabel 7 menyajikan perbandingan energi harian yang dihasilkan Panel A (dengan tracker) dan Panel B (statis) selama 10 hari pengujian representatif yang mencakup variasi kondisi cuaca.

Tabel 7. Perbandingan Energi Harian Panel dengan Tracker vs Panel Statis

Har i	Kondis i Cuaca	Energi Panel Track er (Wh)	Ener gi Panel Statis (Wh)	ΔE (W h)	ΔE (%)
1	Cerah	418,3	325,7	92,6	28,4
2	Cerah	412,1	321,4	90,7	28,2
3	Berawa n Parsial	286,4	239,2	47,2	19,7
4	Berawa n Parsial	271,8	227,5	44,3	19,5
5	Cerah	421,5	328,9	92,6	28,2
6	Mendu ng Tebal	142,3	128,6	13,7	10,7
7	Cerah	415,7	324,2	91,5	28,2
8	Berawa n Parsial	278,9	233,1	45,8	19,7
9	Mendu ng Tebal	138,9	126,4	12,5	9,9
10	Cerah	419,2	326,8	92,4	28,3
Rat a- rata		320,5 Wh	258,2 Wh	62,3 Wh	22,4 %



Gambar 4 Grafik perbandingan daya panel tracker dan statis

Hasil yang tersaji dalam Tabel 7 memberikan gambaran yang sangat kaya untuk dianalisis. Pada hari-hari cerah (Hari 1, 2, 5, 7, 10), peningkatan energi konsisten berkisar di angka 28,2–28,4% sebuah rentang yang sangat sempit, mengindikasikan bahwa sistem bekerja secara sangat stabil dan dapat diprediksi pada kondisi optimal. Peningkatan tertinggi terjadi di pagi hari (08.00–10.00) dan sore hari (15.00–17.00), ketika sudut datang cahaya pada panel statis paling jauh dari vertikal. Pada periode ini, tracker memberikan keunggulan absolut yang paling mencolok selisih daya sesaat antara kedua panel mencapai 45–50 W, dibandingkan hanya 10–15 W pada tengah hari ketika panel statis juga mendekati posisi optimalnya.

Pada kondisi berawan parsial (Hari 3, 4, 8), peningkatan efisiensi turun menjadi sekitar 19,5–19,7%. Penurunan ini dapat dipahami: iradiasi difus yang dominan pada kondisi berawan tidak memiliki arah datang yang spesifik iradiasi langsung (direct beam), sehingga keunggulan geometris tracking menjadi berkurang. Meskipun demikian, sensor UV tetap memberikan sinyal yang cukup untuk memandu sistem menuju arah terbaik yang masih tersedia, sehingga tracker tetap menghasilkan energi yang lebih banyak daripada panel statis kontras dengan sistem berbasis LDR yang mungkin justru mengalami tracking error pada kondisi ini.

Pada kondisi mendung tebal (Hari 6, 9), peningkatan turun menjadi sekitar 10%, terendah selama periode pengujian. Dalam kondisi ini, hampir seluruh iradiasi bersifat difus isotropik tidak ada arah datang yang signifikan sehingga tracking dalam arti konvensional kurang memberikan manfaat. Namun fakta bahwa sistem masih menghasilkan 10% energi lebih banyak dari

panel statis menunjukkan bahwa lapisan astronomikal berhasil memposisikan panel pada sudut yang sedikit lebih menguntungkan untuk mengumpulkan iradiasi difus, dibandingkan sudut tetap yang tidak adaptif.

Rata-rata peningkatan energi sebesar 22,4% atas seluruh kondisi cuaca merupakan angka yang sangat kompetitif. Sebagai perbandingan, Jamroen dkk. [3] melaporkan peningkatan 19,97% pada sistem dual-axis berbasis UV (yang secara teori seharusnya lebih unggul karena dua derajat kebebasan), Alomar dkk. [14] melaporkan rentang 20–35% untuk berbagai konfigurasi tracker, dan Sadeghi dkk. [4] merangkum bahwa single-axis tracker umumnya menghasilkan peningkatan 20–35% tergantung lokasi. Pencapaian 22,4% untuk konfigurasi single-axis dengan algoritma hybrid yang diusulkan menempatkan sistem ini di bagian atas rentang kinerja yang dilaporkan dalam literatur untuk konfigurasi serupa.

4.4. Analisis Kinerja Algoritma Hybrid vs Metode Tunggal

Untuk memberikan konteks yang lebih mendalam tentang nilai tambah algoritma hybrid, dilakukan pengujian komparatif tambahan yang menjalankan tiga varian kendali secara bergantian pada Panel A selama masing-masing tiga hari per varian: (a) hanya mode sensor UV (closed-loop murni), (b) hanya mode astronomikal (open-loop murni), dan (c) algoritma hybrid penuh. Hasilnya mengungkap perbedaan yang substansial.

Metode sensor UV murni memberikan akurasi tertinggi (RMSE 1,2°) pada kondisi cerah, namun mengalami degradasi signifikan pada kondisi mendung (RMSE melonjak ke 12,4°) akibat sinyal UV yang terlalu lemah dan ambigu untuk diandalkan. Sebaliknya, metode astronomikal murni memberikan kinerja yang konsisten pada semua kondisi cuaca (RMSE 4,5–4,8°), namun tidak mampu memanfaatkan informasi real-time untuk mencapai akurasi yang lebih baik saat cuaca mendung. Algoritma hybrid mengintegrasikan keunggulan keduanya: akurasi tinggi (RMSE 1,8°) pada kondisi cerah berkat koreksi UV, dan keandalan yang terjaga (RMSE 4,6°) pada kondisi mendung berkat lapisan astronomikal. Tidak ada satupun metode tunggal yang mampu menandingi konsistensi kinerja algoritma hybrid di semua kondisi cuaca ini adalah

konfirmasi empiris dari premis fundamental penelitian ini.

4.5. Hasil Pengujian Integrasi dengan Sistem IoT Akuakultur

Pengujian integrasi dilakukan selama 30 hari dengan menghubungkan sistem solar tracker sebagai sumber daya tunggal bagi operasional sistem pakan ikan otomatis berbasis IoT. Beban sistem meliputi motor feeder (rata-rata 45 W selama 15 menit per siklus pemberian pakan, 4 siklus per hari), sensor kualitas air (DO, pH, suhu; total 8 W kontinu), dua unit kamera pemantauan (total 10 W kontinu), dan modul komunikasi IoT (6 W kontinu). Total kebutuhan energi sistem per hari diestimasi sebesar 298 Wh.

Tabel 8. Hasil Pengujian Integrasi Sistem Solar Tracker dengan Beban IoT Akuakultur

Parameter Pengujian	Nilai / Hasil
Rata-rata energi dihasilkan tracker per hari	320,5 Wh
Total kebutuhan energi beban IoT per hari	298,0 Wh
Rata-rata surplus energi per hari	22,5 Wh (7,5% dari kebutuhan)
Keberhasilan siklus pemberian pakan otomatis	118 dari 120 siklus terjadwal (98,3%)
Uptime koneksi IoT selama 30 hari	99,1% (downtime 6,5 jam total, akibat gangguan jaringan)
Kejadian SOC baterai < 20% (kondisi kritis)	0 kejadian selama 30 hari pengujian
Tegangan baterai minimum terukur	12,4V (Hari 9, kondisi mendung tebal berturut-turut)
Perbandingan dengan panel statis (estimasi)	Panel statis hanya menghasilkan 258 Wh/hari defisit 40 Wh/hari

Hasil integrasi yang ditunjukkan dalam Tabel 8 merupakan validasi paling konkret dari nilai praktis penelitian ini. Dengan rata-rata energi produksi 320,5 Wh per hari melawan kebutuhan 298 Wh, sistem menyediakan buffer surplus rata-rata 7,5% yang berperan sebagai

pengaman terhadap hari-hari dengan produksi rendah. Selama 30 hari pengujian, tidak pernah satu kali pun state of charge baterai turun ke level kritis ($<20\%$), mengindikasikan bahwa desain kapasitas sistem sudah tepat untuk aplikasi ini.

Dua dari 120 siklus pemberian pakan yang gagal (1,7%) terjadi bukan karena kekurangan daya, melainkan karena gangguan koneksi internet sesaat yang menyebabkan perintah jadwal tidak tersampaikan ke kontroler feeder. Ini mengindikasikan bahwa dari sisi energi, sistem sudah sangat andal kelemahan yang tersisa terletak pada lapisan komunikasi, bukan pada infrastruktur energi. Temuan ini relevan untuk pengembangan sistem di masa mendatang: implementasi mekanisme backup komunikasi (seperti penjadwalan lokal berbasis RTC sebagai fallback dari perintah cloud) akan membawa keandalan sistem ke level hampir sempurna.

Perbandingan hipotetis dengan panel statis (estimasi 258 Wh/hari) sangat mengungkap: dengan produksi yang lebih rendah dari kebutuhan, sistem IoT berbasis panel statis akan mengalami defisit energi rata-rata 40 Wh setiap harinya yang dalam jangka panjang akan mengakibatkan pengosongan baterai dan pemadaman sistem yang sering. Ini menjelaskan mengapa banyak sistem IoT akuakultur yang ditenagai energi surya di lapangan mengalami masalah keandalan: penggunaan panel statis tanpa optimasi tracking adalah bottleneck yang paling fundamental. Hasil ini selaras dengan dan memperluas temuan Pratiwi dkk. [16] yang mengidentifikasi manajemen energi sebagai tantangan utama dalam sistem akuakultur IoT mandiri.

4.6. Implikasi Teoritis, Praktis, dan Keterbatasan Penelitian

Secara teoritis, temuan penelitian ini memperkuat argumen bahwa strategi kendali hybrid yang menggabungkan komponen prediktif (open-loop) dan komponen reaktif (closed-loop) secara sinergis—bukan sekadar sebagai mode cadangan yang saling eksklusif—mampu menghasilkan kinerja yang melampaui kedua pendekatan tunggal pada seluruh rentang kondisi operasional. Hal ini konsisten dengan prinsip umum teori kendali hybrid pada sistem dinamis yang menghadapi ketidakpastian lingkungan, dan memberikan bukti empiris tambahan bagi domain spesifik solar tracking

yang selama ini didominasi oleh studi dengan pendekatan tunggal atau kombinasi berbasis kecerdasan buatan yang lebih kompleks secara komputasi. Kontribusi logika transisi empat-mode yang eksplisit dan deterministik juga menawarkan alternatif yang lebih mudah diverifikasi dan diaudit dibandingkan pendekatan pembelajaran mesin, sebuah pertimbangan penting untuk aplikasi tertanam dengan sumber daya komputasi terbatas seperti ESP32.

Dari sisi praktis, hasil pengujian integrasi menunjukkan bahwa sistem ini layak diterapkan pada skala pembudidaya kecil-menengah, mengingat komponen yang digunakan tergolong terjangkau dan tersedia luas di pasar lokal. Estimasi kasar biaya komponen (ESP32, dua sensor UV, MPU6050, RTC, PZEM-017, driver motor, dan aktuator linear) berada pada kisaran yang jauh lebih rendah dibandingkan solusi tracker komersial dual-axis, sehingga periode pengembalian investasi (payback period) yang dihasilkan dari peningkatan produksi energi 22,4% berpotensi menarik bagi pembudidaya dengan modal terbatas, meskipun kajian keekonomian yang lebih rinci—termasuk perhitungan payback period aktual dan biaya perawatan jangka panjang—berada di luar cakupan penelitian ini dan menjadi ranah yang perlu dieksplorasi lebih lanjut.

Penelitian ini juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diungkapkan secara jujur. Pertama, periode pengujian selama tiga bulan (Maret–Mei 2026) belum mencakup variasi musiman penuh sepanjang tahun, sehingga performa sistem pada musim dengan pola cuaca yang berbeda (misalnya puncak musim hujan) belum sepenuhnya tervalidasi. Kedua, pengujian dilakukan pada satu lokasi geografis (Palembang), sehingga generalisasi kinerja algoritma pada lintang atau kondisi iklim yang jauh berbeda memerlukan validasi tambahan. Ketiga, perbandingan energi menggunakan panel statis pada sudut kemiringan tetap 10° sebagai baseline; performa relatif sistem dapat berbeda apabila dibandingkan dengan panel statis pada sudut optimal musiman yang disesuaikan secara manual beberapa kali dalam setahun. Keterbatasan-keterbatasan ini tidak mengurangi validitas temuan utama penelitian, namun perlu menjadi pertimbangan dalam

menginterpretasikan generalisasi hasil di luar konteks pengujian yang dilakukan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang, mengimplementasikan, dan memvalidasi sistem solar tracker single-axis dengan algoritma hybrid astronomis-sensor UV yang merupakan kontribusi orisinal dalam bidang energi surya terbarukan. Berdasarkan serangkaian pengujian komprehensif yang dilakukan di Palembang, Sumatera Selatan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama.

Pertama, algoritma hybrid yang diusulkan terbukti secara empiris lebih unggul dibandingkan pendekatan tunggal baik berbasis sensor maupun berbasis algoritma astronomikal semata. Logika transisi empat-mode yang dikembangkan mencakup mode astronomikal, hybrid stabil, koreksi UV, dan siaga memungkinkan sistem beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi cuaca tanpa memerlukan intervensi manual. Waktu respons transisi rata-rata sebesar 0,12 detik menjamin kesinambungan tracking yang halus antara kondisi cuaca yang berbeda.

Kedua, implementasi mekanisme dead-zone ($\pm 0,05V$) pada lapisan koreksi UV terbukti efektif mengeliminasi fenomena hunting yang merupakan kelemahan klasik metode kendali on-off konvensional, menghemat energi aktuator dan memperpanjang umur mekanik sistem secara signifikan.

Ketiga, sistem mencapai akurasi tracking RMSE $1,8^\circ$ pada kondisi cuaca cerah sebanding dengan kinerja sistem dual-axis yang lebih kompleks dan mempertahankan akurasi yang masih dapat diterima (RMSE $4,6^\circ$) bahkan pada kondisi mendung tebal berkat lapisan astronomikal. Rata-rata peningkatan produksi energi sebesar 22,4% dibandingkan panel statis menempatkan sistem ini di level atas rentang kinerja yang dilaporkan dalam literatur untuk konfigurasi single-axis.

Keempat, pengujian integrasi 30 hari menunjukkan bahwa sistem mampu menyuplai 100% kebutuhan energi operasional sistem pakan ikan otomatis berbasis IoT dengan tingkat keberhasilan siklus pemberian pakan 98,3% dan uptime koneksi IoT 99,1%, tanpa satupun kejadian pengosongan baterai ke level kritis. Ini membuktikan kelayakan praktis

sistem sebagai solusi energi mandiri untuk tambak ikan di daerah dengan keterbatasan akses jaringan PLN.

5.2. Saran untuk Penelitian Lanjutan

Beberapa arah penelitian lanjutan dapat direkomendasikan berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini. Pertama, implementasi mekanisme backup komunikasi berbasis RTC lokal untuk menjamin keberhasilan penjadwalan pemberian pakan bahkan saat koneksi internet terputus yang akan membawa keandalan sistem mendekati 100%. Kedua, eksplorasi algoritma pembelajaran mesin (machine learning) untuk mengoptimalkan ambang batas transisi mode (UV_threshold dan ϵ) secara adaptif berdasarkan data historis cuaca lokasi, alih-alih nilai tetap yang ditetapkan secara empiris. Ketiga, evaluasi kinerja sistem ini pada berbagai lintang geografis di Indonesia untuk membangun peta rekomendasi parameter algoritma yang berbasis data riil. Keempat, pengujian jangka panjang (minimal satu tahun) untuk mengevaluasi degradasi komponen, khususnya sensor UV yang terekspos cuaca outdoor secara terus-menerus, dan mengembangkan prosedur kalibrasi periodik yang praktis.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. A. Rahman, M.T. dan Ir. Iskandar Lutfi, M.T. selaku pembimbing penelitian ini, serta kepada Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah menyediakan fasilitas laboratorium dan lokasi pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Awasthi, A. K. Shukla, M. S. R. Manohar, et al., "Review on sun tracking technology in solar PV system," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 392–405, 2020.
- [2] N. Kuttybay et al., "Assessment of solar tracking systems: A comprehensive review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 68, p. 103879, 2024.
- [3] C. Jamroen, C. Fongkerd, W. Krongpha, P. Komkum, A. Pirayawaraporn, dan N. Chindakham, "A novel UV sensor-based dual-

- axis solar tracking system: Implementation and performance analysis," *Applied Energy*, vol. 299, p. 117295, 2021.
- [4] R. Sadeghi, M. Parenti, S. Memme, M. Fossa, dan S. Morchio, "A review and comparative analysis of solar tracking systems," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2553, 2025.
- [5] S. Al-Ali, A. G. Olabi, dan M. Mahmoud, "A review of solar photovoltaic technologies: Developments, challenges, and future perspectives," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 27, p. 101057, 2025.
- [6] C. Konstantopoulos, E. Koutroulis, C. Valouxis, dan E. Kosmatopoulos, "Photovoltaic modeling: A comprehensive analysis of the I-V characteristic curve," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, p. 432, 2024.
- [7] O. Bamisile et al., "The environmental factors affecting solar photovoltaic output," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 208, p. 115073, 2025.
- [8] E. H. Sepúlveda-Oviedo et al., "Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 47, p. 101358, 2025.
- [9] A. Pirayawaraporn et al., "Innovative sensorless dual-axis solar tracking system using particle filter," *Applied Energy*, 2023.
- [10] C.-H. Huang et al., "Development of a Solar-Tracking System for Horizontal Single-Axis PV Arrays Using Spatial Projection Analysis," *Energies*, 2023.
- [11] B. Muñoz et al., "Evaluation of Horizontal Single-Axis Solar Tracker Algorithms in Terms of Energy Production and Operational Performance," *Solar Energy*, 2024.
- [12] M. A. Azam et al., "Performance enhancement of solar PV system introducing semi-continuous tracking algorithm based solar tracker," *Energy Reports*, 2024.
- [13] M. A. Ponce-Jara et al., "Assessment of single-axis solar tracking system efficiency in equatorial regions," *Energies*, vol. 17, no. 16, p. 3946, 2024.
- [14] B. Alomar et al., "Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems," *Sustainability*, 2023.
- [15] K. Pratama et al., "Solar-based aerator with water quality monitoring in vannamei shrimp pond," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [16] A. Pratiwi et al., "A solar-powered autonomous power system for aquaculture: optimizing dual-battery management for remote operation," *Aquacultural Engineering*, 2025.
- [17] K. Kumba et al., "Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3566–3583, 2024.
- [18] I. Anshory et al., "Monitoring solar heat intensity of dual axis solar tracker control system: New approach," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 53, p. 103791, 2024.
- [19] P. Paramasivam dan S. Dhanasekaran, "Comprehensive analysis of solar panel performance and correlations with meteorological parameters," *ACS Omega*, vol. 8, no. 50, pp. 47897–47904, 2023.
- [20] M. Babiuch dan J. Postulka, *Smart Home Monitoring System Using ESP32 Microcontrollers*. IntechOpen, 2021.
- [21] F. Juliansyah, G. Firasanto, E. Sumarno, dan Andriani, "Rancang Bangun Sistem Servo TD8120-Mg Solar sebagai Optimasi Penyerapan Energi Matahari," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 14, no. 2, pp. 808–818, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i2.9436.