ANALISIS AKURASI PANEL SURYA PELACAK MATAHARI *OPEN-LOOP* BERDASARKAN ALGORITMA POSISI MATAHARI (SPA)

Achmad Aqilah Abdurohman[1], Ilham Fauzan Zaman Urip[2*], Muhammad Ridwan[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. PHH. Mustofa No. 23, Bandung 40124, Indonesia
[2]ilham.fauzanzaman@mhs.itenas.ac.id

Abstract

Fixed solar panels suffer from reduced efficiency due to non-optimal alignment with the sun. This study evaluates the performance of a dual-axis Sun Tracking Solar Panel utilizing the Solar Position Algorithm (SPA) on an open-loop microcontroller platform. Experimental validation was conducted in Bandung, Indonesia, by comparing measured mechanical angles against theoretical SPA references. The results demonstrate high tracking consistency, with average azimuth accuracy exceeding 90% and altitude accuracy ranging between 88%–92%. However, systematic mechanical deviations were identified. The altitude axis exhibited a maximum error of 12.38% (8.62°) near solar noon due to servo torque limitations (identified as the "Early Plateau" phenomenon), while the azimuth axis showed a 9.13% initialization lag. Despite these hardware constraints, the system proved its algorithmic precision, achieving a minimal error of 0.07% during low-load periods, confirming the viability of the proposed tracking logic.

Keywords: *Altitude, Azimuth, Solar Position Algorithm, Renewable energy, Solar panel, Sun tracking.*

Abstrak

Panel surya statis sering mengalami penurunan efisiensi karena ketidakselarasan yang optimal dengan matahari. Penelitian ini mengevaluasi kinerja *Sun Tracking Solar Panel* dua sumbu menggunakan *Solar Position Algorithm* (SPA) pada platform mikrokontroler *open-loop*. Validasi eksperimental dilakukan di Bandung, Indonesia, dengan membandingkan sudut mekanis terukur terhadap referensi teoritis SPA. Hasil penelitian menunjukkan konsistensi pelacakan yang tinggi, dengan akurasi rata-rata azimut melebihi 90% dan akurasi elevasi (*altitude*) berkisar antara 88%–92%. Namun, ditemukan deviasi mekanis sistematis; sumbu elevasi menunjukkan kesalahan maksimum sebesar 12,38% (8,62°) saat tengah hari karena keterbatasan torsi servo (fenomena *"Early Plateau"*), sementara sumbu azimut menunjukkan jeda inisialisasi sebesar 9,13%. Terlepas dari keterbatasan perangkat keras tersebut, sistem ini membuktikan presisi algoritma dengan kesalahan minimal 0,07% pada periode beban rendah, yang mengonfirmasi kelayakan logika pelacakan yang diusulkan.

Kata Kunci: Altitude, Azimut, *Solar Position Algorithm*, Energi terbarukan, Panel surya, Pelacakan matahari.

Article History
Received: January 2026
Reviewed: January 2026
Published: January 2026

Plagiarism Checker No: 235
Prefix DOI :
10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya permintaan energi listrik dan dampak lingkungan dari bahan bakar fosil mendorong adopsi sumber terbarukan secara lebih luas, terutama tenaga surya. Energi surya dihasilkan dengan memanfaatkan radiasi matahari. Energi yang diterima Bumi dari matahari diperkirakan mencapai sekitar 1,8×1011 MW [1]. Meskipun Indonesia menerima iradiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, yakni sekitar 4,5 kWh/m^2/hari [2].

Kinerja panel surya statis tetap terbatas karena tidak dapat terus-menerus menghadap ke arah matahari. Akibatnya, intensitas radiasi yang diterima dan keluaran listrik secara keseluruhan menurun seiring dengan perubahan posisi matahari sepanjang hari. Sistem pelacak matahari menawarkan solusi dengan menyesuaikan orientasi panel untuk mengikuti gerak semu matahari [3]. Pelacak dua sumbu memberikan akurasi penyelarasan yang lebih tinggi daripada sistem sumbu tunggal, dan metode berbasis algoritma dianggap lebih andal dibandingkan pelacak berbasis sensor yang sering terganggu oleh tutupan awan dan bayangan.

Solar Position Algorithm (SPA) digunakan secara luas untuk menghitung sudut azimut dan elevasi secara *real-time* berdasarkan koordinat geografis, tanggal, serta waktu lokal. Implementasi SPA pada mikrokontroler memungkinkan aktuator untuk mengorientasikan panel ke arah posisi yang telah dihitung. Hal ini dapat dicapai melalui strategi pelacakan matahari *open-loop* menggunakan SPA yang didasarkan pada hubungan geometris antara matahari dan bumi [4].

Namun, sistem skala kecil seringkali menghadapi batasan praktis seperti kesalahan pemosisian servo, *backlash* mekanis, dan fleksibilitas struktural yang dapat mengurangi akurasi pelacakan. Oleh karena itu, diperlukan validasi eksperimental untuk menentukan kinerja aktual dari sistem tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan memvalidasi pelacak surya SPA dua sumbu berbiaya rendah di Bandung, dengan fokus pada evaluasi keandalan pelacakan serta identifikasi batasan akurasi secara praktis.

2. METODE PENELITIAN

2.1 *Sun-Tracking Solar Panel*



Gambar 1 Panel Surya Pelacak Matahari

Panel surya pelacak matahari (Sun tracking solar panels) merupakan sistem yang dirancang untuk mengikuti pergerakan matahari sepanjang hari guna memaksimalkan iradiasi matahari serta meningkatkan efisiensi konversi energi. Sistem ini menggunakan aktuator otomatis yang memutar panel untuk menjaga sudut datang (*incidence angle*) sinar matahari agar tetap optimal setiap saat [5]. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, panel pelacak matahari menyesuaikan orientasinya guna menangkap intensitas surya yang lebih tinggi.

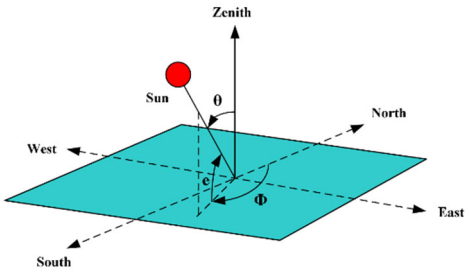
Terdapat dua jenis utama mekanisme pelacakan matahari:

1. Pelacak sumbu tunggal (*Single-axis trackers*): Memutar panel pada satu sumbu, biasanya dari timur ke barat, untuk mengikuti matahari selama jam siang hari.
2. Pelacak dua sumbu (*Dual-axis trackers*): Berputar secara horizontal maupun vertikal, memungkinkan pelacakan yang lebih akurat dengan mempertimbangkan variasi posisi matahari harian serta musiman [6].

Sistem pelacakan matahari mampu meningkatkan efisiensi energi, namun memerlukan biaya instalasi dan pemeliharaan yang lebih tinggi dikarenakan kompleksitas mekanisnya.

2.2 Sistem Koordinat Astronomi

Sistem koordinat astronomi adalah sebuah kerangka kerja yang digunakan untuk menentukan posisi benda-benda langit menggunakan pasangan garis lintang-bujur sferis, yang analog dengan sistem koordinat geografis Bumi tetapi diadaptasi ke bola langit dan posisi pengamat di Bumi [7].



Gambar 2 Sudut Matahari [8]

Pada Gambar 2 ini, beberapa sudut utama digunakan untuk mendeskripsikan posisi benda langit relatif terhadap pengamat atau titik referensi tertentu. Jenis-jenis sudut utama adalah sebagai berikut, dengan rumus yang diperoleh dari [9]:

1. Azimut: Sudut yang diukur searah jarum jam dari utara sejati ke arah suatu objek pada bidang horizontal, berkisar antara 0° hingga 360° [10].
   a. Jika γ<0°:

$$\beta = \cos^{-1}\frac{(\sin\delta\cos\varphi - \cos\delta\sin\varphi\cos\gamma)}{\cos\alpha} \quad (1)$$

   b. Jika γ≥0°:

$$\beta = 360 - \cos^{-1}\frac{(\sin\delta\cos\varphi - \cos\delta\sin\varphi\cos\gamma)}{\cos\alpha} \quad (2)$$

2. Elevasi (Altitude): Sudut vertikal suatu objek di atas cakrawala, berkisar dari 0° di cakrawala hingga 90° di zenit. Elevasi negatif menunjukkan objek berada di bawah cakrawala [10].

$$\alpha = sin^{-1}.sin\,\delta\,.sin\,\varphi + cos\,\delta\,cos\,\varphi\,cos\,\gamma \quad (3)$$

3. Deklinasi Surya: Sudut antara lintasan harian semu matahari dan proyeksi ekuator Bumi pada bola langit [11].

$$\alpha = -23.45° \times cos\,\frac{360}{365}(d+10) \quad (4)$$

4. Sudut Jam (Hour Angle - HRA): Sudut jam adalah sudut antara bidang meridian yang melewati pusat Matahari dan meridian lokal (bidang vertikal lokasi pengamat). Sudut ini menunjukkan waktu surya sejati [12].

$$HRA = 15°(LST - 12) \quad (5)$$

5. Koordinat Geografis Permukaan Bumi: Koordinat geografis menentukan lokasi berdasarkan garis lintang dan garis bujur, yang berfungsi sebagai input penting untuk menentukan posisi relatif terhadap khatulistiwa.

6. Meridian Waktu Surya Lokal (*Local Solar Time Meridian*): *Local Solar Time Meridian* (LSTM) adalah bujur referensi untuk zona waktu tertentu, di mana matahari melintasi meridian lokal tepat pada pukul 12:00 waktu standar.

$$LSTM = 15° \times \Delta T_{UTC} \qquad (6)$$

7. Persamaan Waktu (*Equation of Time*): *Equation of Time* memperhitungkan perbedaan antara waktu surya sejati (jam matahari) dan waktu surya rata-rata (jam konvensional), yang berfungsi sebagai faktor koreksi yang diperlukan.

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) \qquad (7)$$

$$EOT = 9{,}87\,sin(2B) - 7{,}53\,cos(B) - 1{,}5\,sin(B) \qquad (8)$$

8. Faktor Koreksi Waktu (*Time Correction Factor*): Faktor Koreksi Waktu adalah nilai yang digunakan untuk mengoreksi waktu surya lokal (LST) agar sesuai dengan waktu surya rata-rata, dengan mempertimbangkan posisi geografis suatu lokasi.

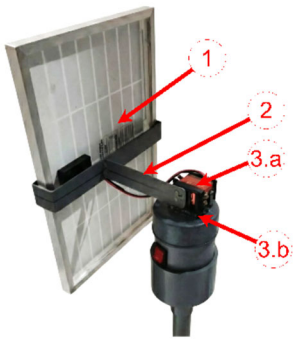
$$TC = 4(Longitude - LSTM) + EOT \qquad (9)$$

9. Waktu Surya Lokal (*Local Solar Time*): Waktu surya lokal adalah waktu berdasarkan posisi Matahari di langit relatif terhadap lokasi tertentu di permukaan Bumi. LST mewakili waktu lokal yang ditentukan secara astronomis dari gerak harian semu Matahari.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \qquad (10)$$

2.3 Desain Mekanik Mekanisme Pelacakan

Gambar 3 menunjukkan desain sistem Panel Surya Pelacak Matahari. Komponen-komponen yang digunakan dalam konstruksi perangkat ini mencakup hal-hal sebagai berikut:



Gambar 3 Desain Perangkat Panel Surya Pelacak Matahari

Komponen yang digunakan dalam konstruksi perangkat meliputi hal-hal berikut:

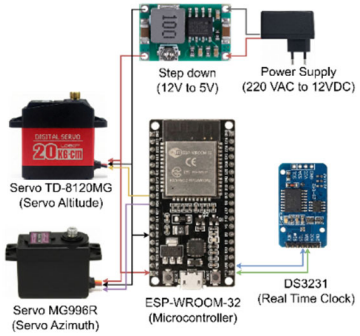
1. Panel Surya: Panel surya digunakan untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik.
2. Penyangga Panel Surya: Struktur penyangga digunakan untuk menahan panel surya dan berfungsi sebagai salah satu elemen penghubung antara poros servo dan panel.
3. Motor Servo: Motor Servo dan Kinematika: Dua motor servo (MG996R dan TD-8120MG) digunakan untuk menjalankan pergerakan dua sumbu. Aktuasi mekanis beroperasi secara hierarkis:

a. Servo 1 (Elevasi/Kemiringan): Servo ini terpasang pada lengan penyangga dan memutar panel surya secara vertikal untuk menyesuaikan sudut elevasi (altitude).
b. Servo 2 (Azimut/Yaw): Servo ini berfungsi sebagai pemutar basis. Bagian ini menggerakkan seluruh rakitan atas yang mencakup panel surya, lengan penyangga, dan Servo 1 secara horizontal untuk menyesuaikan sudut azimut.

Mekanisme kerja sistem panel surya pelacak matahari ini beroperasi dengan menghitung lintasan matahari secara *real-time* pada interval empat menit. Parameter yang digunakan untuk menghitung lintasan matahari adalah garis lintang (*latitude*), garis bujur (*longitude*), dan waktu lokal. Berdasarkan ketiga parameter tersebut, mikrokontroler menghitung sudut elevasi dan azimut matahari, yang kemudian digunakan untuk memposisikan panel surya ke arah jalur matahari yang telah dihitung.

Untuk mencapai pemosisian ini, dua motor servo digunakan untuk menyesuaikan orientasi panel sesuai dengan sudut yang dihitung oleh mikrokontroler. Sistem kontrol beroperasi dengan menghitung lintasan matahari secara *real-time*. Sistem ini memanfaatkan *Solar Position Algorithm* (SPA) berdasarkan hubungan geometris antara matahari dan bumi.

a. Parameter Input: Mikrokontroler menggunakan parameter spesifik berupa garis lintang, garis bujur, dan waktu lokal untuk menghitung lintasan matahari.
b. Proses: Sistem menghitung sudut elevasi dan azimut matahari pada interval empat menit. Sudut-sudut yang dihitung ini berfungsi sebagai setpoint untuk mekanisme pelacakan.
c. Output: Output dari algoritma terdiri dari sudut azimut dan elevasi. Sudut-sudut yang dihitung ini berfungsi sebagai setpoint referensi yang dikirim ke motor servo untuk menyesuaikan orientasi panel menuju posisi matahari yang ditargetkan.



Gambar 4 Skema yang mengilustrasikan integrasi antara mikrokontroler dan aktuator servo

Diagram Rangkaian Listrik Gambar 4 menunjukkan sistem kelistrikan yang mengintegrasikan mikrokontroler dengan aktuator. Motor servo beroperasi berdasarkan perintah yang dikirim dari mikrokontroler melalui sinyal Pulse Width Modulation (PWM). Mikrokontroler memproses data SPA dan mengirimkan lebar pulsa yang presisi ke servo untuk mencapai sudut yang ditargetkan.

Pergerakan fisik sistem digerakkan oleh dua motor servo yang bertindak sebagai aktuator, yang menyediakan gerakan rotasi di sepanjang sumbu ganda. Setelah menerima sinyal PWM dari mikrokontroler, aktuator secara fisik memutar panel surya secara horizontal untuk menyesuaikan sudut azimut dan secara vertikal untuk menyesuaikan sudut elevasi. Mekanisme aktuasi ini secara terus-menerus mengorientasikan ulang panel agar selaras dengan posisi matahari spesifik yang dihitung oleh sistem.

2.4 Pengaturan Eksperimen dan Prosedur Pengukuran

Sebelum melakukan pengujian, dilakukan pengaturan nol (*zero-setting*) untuk sudut elevasi pada lengan penyangga relatif terhadap sumbu horizontal permukaan datar (0°), serta untuk sudut azimut pada sisi panjang panel surya yang sejajar dengan pipa penyangga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Proses "pengaturan nol" ini memastikan bahwa sudut servo sesuai secara akurat dengan sudut azimut dan elevasi yang dihitung.

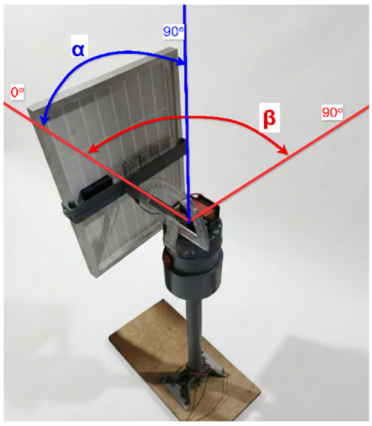
a. Kalibrasi Elevasi (*Altitude*): Lengan penyangga disejajarkan secara horizontal untuk menetapkan titik referensi 0° relatif terhadap cakrawala, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Dalam konfigurasi ini, panel surya diposisikan tegak lurus terhadap sumbu vertikal (90°), namun lengan mekanis itu sendiri berada pada posisi awal 0°.
b. Kalibrasi Azimut: Sudut azimut dinolkan dengan menyejajarkan sisi panjang panel surya sejajar dengan pipa penyangga utama, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. Penyelarasan ini berfungsi sebagai referensi awal untuk rotasi horizontal sebelum sistem mulai melakukan pelacakan.

Pengukuran ini dilakukan untuk membandingkan sudut mekanis aktual dari prototipe terhadap sudut referensi ideal yang dihasilkan oleh *Solar Position Algorithm* (SPA). Data dikumpulkan setiap jam dari pukul 06:00 hingga 18:00 untuk menganalisis konsistensi sistem sepanjang hari.

Jendela waktu spesifik ini dipilih untuk mencakup seluruh periode foto efektif yang tersedia di Bandung selama bulan Desember, guna memastikan bahwa kinerja pelacakan dievaluasi di seluruh siklus harian (*diurnal*) yang lengkap dari menjelang matahari terbit hingga menjelang matahari terbenam. Interval per jam dipilih alih-alih menit ke menit dikarenakan sifat manual dari proses pengukuran yang menggunakan busur derajat analog standar. Alat dasar ini dipilih karena memberikan verifikasi fisik langsung terhadap posisi lengan penyangga secara independen dari sensor elektronik, yang mana hal ini sejalan dengan tujuan biaya rendah dari prototipe ini. Sementara itu, perubahan pada tingkat menit akan sulit untuk dibedakan secara akurat mengingat keterbatasan resolusi dari alat pengukuran manual tersebut.

Prosedur untuk memvalidasi akurasi pelacakan adalah sebagai berikut:

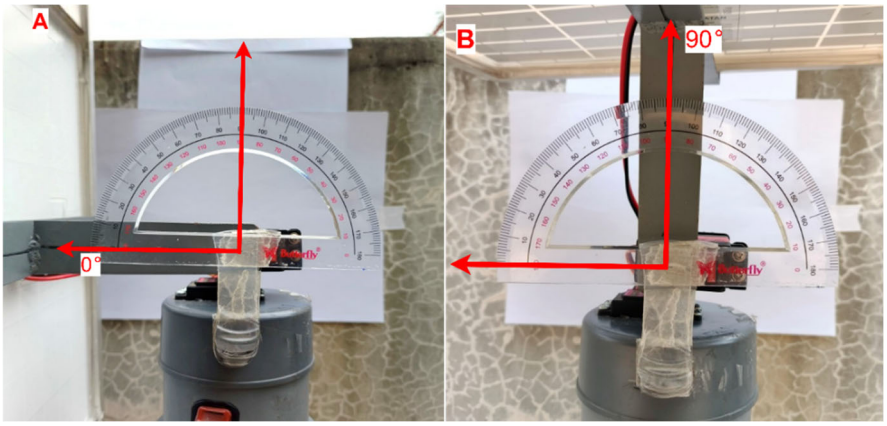
a. Metode Pengukuran: Sudut azimut dan elevasi aktual dari lengan penyangga panel diukur secara manual menggunakan busur derajat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai-nilai terukur ini kemudian dicatat dan dibandingkan dengan nilai SPA yang ditampilkan oleh sistem.
b. Cakupan Pengumpulan Data: Validasi eksperimental dilakukan di Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung, yang terletak pada koordinat 6,89815 (Lintang) dan 107,63581 (Bujur). Pengumpulan data dilakukan pada tanggal 26 Desember 2024 dan 27 Desember 2024.



Gambar 5 Panel surya pada sudut elevasi (α) dan azimut (β)

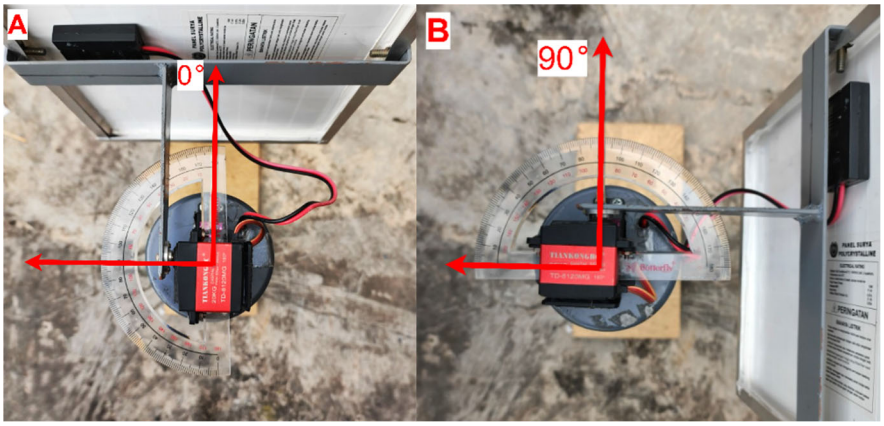
Pada Gambar 5, garis biru menunjukkan panel surya yang diposisikan tegak lurus terhadap bidang horizontal (cakrawala), membentuk sudut 90° yang digunakan sebagai referensi nol derajat. Garis merah menunjukkan panel surya yang dipasang dengan sumbu penggerak azimut utama yang sejajar dengan garis horizontal, di mana sudut azimut diukur mulai dari posisi 0°.

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 6, pengukuran sudut elevasi memverifikasi pergerakan vertikal sistem. Posisi sudut ditentukan dengan membaca skala berwarna hitam pada busur derajat.



Gambar 6 Pengukuran sudut elevasi.
(A) Lengan penyangga sejajar secara horizontal pada titik referensi 0°.
(B) Lengan penyangga diputar secara vertikal ke posisi 90°
yang digerakkan oleh servo elevasi

Gambar 6 (A) menunjukkan sistem pada posisi Pengaturan Nol (*Zero-Setting*). Di sini, lengan penyangga mekanis memanjang lurus secara horizontal, sejajar dengan tanda 0° pada busur derajat. Posisi horizontal ini berfungsi sebagai garis dasar (*baseline*) atau cakrawala untuk pelacakan elevasi. Gambar 6 (B) menggambarkan lengan setelah rotasi vertikal 90°. Servo elevasi telah mengangkat lengan penyangga hingga tegak lurus dengan tanah, sejajar dengan tanda 90°. Hal ini menunjukkan kemampuan mekanisme untuk melacak matahari dari cakrawala hingga ke zenit.



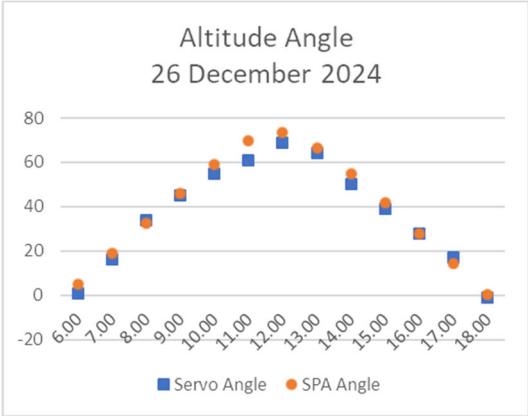
Gambar 7 Pengukuran sudut azimut.
(A) Lengan mekanis disejajarkan pada titik referensi 0° untuk kalibrasi.
(B) Mekanisme diputar secara horizontal ke posisi 90°
yang digerakkan oleh servo azimut

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, pengukuran sudut azimut berfokus pada rotasi horizontal sistem. Untuk pengukuran ini, sudut dibaca dari skala berwarna merah pada busur derajat. Gambar 7 (A) menunjukkan kondisi Pengaturan Nol, di mana lengan mekanis disejajarkan paralel dengan sumbu dasar, sesuai dengan tanda 0° pada busur derajat. Ini menetapkan kerangka acuan awal untuk algoritma pelacakan. Gambar 7 (B) menunjukkan sistem yang sedang beroperasi, di mana servo azimut telah memutar struktur pendukung searah jarum jam. Lengan sejajar sempurna dengan tanda 90°, memverifikasi kemampuan aktuator untuk melakukan perpindahan sudut yang besar secara akurat relatif terhadap bidang horizontal.

3. HASIL dan PEMBAHASAN

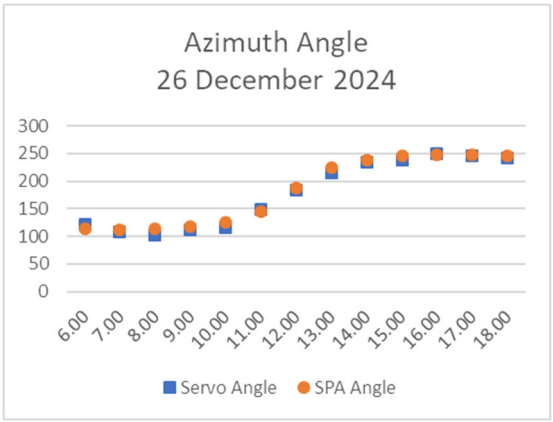
Hasil pengujian mengukur sudut lengan penyangga panel pada sudut azimut dan elevasi setiap jam dari tanggal 26 Desember 2024 hingga 1 Januari 2025. Panel surya melacak matahari pada koordinat ITENAS Bandung (Elevasi: -6,89815, Lintang: 107,63581).

Gambar 8 menunjukkan sudut elevasi (*altitude*) yang dihasilkan oleh lengan penyangga panel dibandingkan dengan perhitungan dari *Solar Position Algorithm* (SPA). Pada pagi hari (06:00-07:00), sudut elevasi lengan penyangga lebih rendah daripada perhitungan SPA. Selama tengah hari (08:00-15:00), sudut lengan penyangga dan sudut SPA cenderung selaras dengan perbedaan yang sangat kecil, menunjukkan akurasi yang baik selama periode tersebut. Namun, pada sore hari (16:00-18:00), sudut lengan penyangga kembali menunjukkan deviasi yang lebih besar dibandingkan dengan SPA, dengan perbedaan mencapai sekitar 10 derajat.



Gambar 8 Hasil Uji Sudut Elevasi pada 26 Desember 2024

Gambar 9 menunjukkan sudut azimut yang dihasilkan oleh lengan penyangga panel dibandingkan dengan perhitungan dari *Solar Position Algorithm* (SPA). Pada pagi hari (06:00-10:00), sudut azimut lengan penyangga berbeda secara signifikan dari sudut SPA.



Gambar 9 Hasil Uji Sudut Azimut pada 26 Desember 2024

Deviasi terbesar terjadi pada pukul 08:00, dengan selisih 10,35°. Selama tengah hari (11:00-14:00), sudut azimut dari kedua kumpulan data tersebut hanya menunjukkan perbedaan kecil, kecuali pada pukul 13:00, di mana muncul deviasi yang relatif besar. Pada sore hari (15:00-18:00), sudut lengan penyangga dan sudut SPA menunjukkan perbedaan yang sangat kecil, dengan deviasi terkecil sebesar 1,60°.

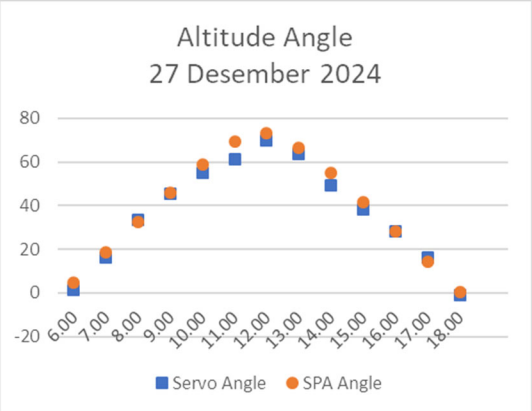
Tabel 1 Hasil Pengujian untuk 26 Desember 2024

Time	Altitude (˚)			Azimuth (˚)		
	Measurable	SPA	Difference	Measurable	SPA	Difference
06:00	1	5,01	4,01	121	112,97	8,03
07:00	16	18,76	2,76	107	112,37	5,37
08:00	34	32,49	1,51	103	113,35	10,35
09:00	45	46,01	1,01	111	116,72	5,72
10:00	55	58,86	3,86	116	124,88	8,88
11:00	61	69,62	8,62	149	145,14	3,86
12:00	69	73,38	4,38	183	187,96	4,96
13:00	64	66,50	2,50	215	223,71	8,71
14:00	50	54,75	4,75	234	238,64	4,64
15:00	39	41,60	2,60	237	244,77	7,77
16:00	28	27,98	0,02	249	247,19	1,81
17:00	17	14,22	2,78	246	247,60	1,60
18:00	1	0,50	0,50	242	246,55	4,55

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian selisih sudut antara sudut terukur dari lengan penyangga panel dan sudut yang dihitung oleh *Solar Position Algorithm* (SPA) pada tanggal 26 Desember 2024. Untuk sudut elevasi, deviasi terbesar terjadi pada pukul 11:00 dengan selisih 8,62˚. Deviasi ini cenderung menurun dari tengah hari ke sore hari, dengan perbedaan terkecil terjadi pada pukul 16:00 sebesar 0,02˚, yang menunjukkan akurasi tinggi selama periode tersebut.

Untuk sudut azimut, deviasi terbesar terjadi pada pukul 10:00 dengan selisih 8,88˚. Dari pagi hingga tengah hari, perbedaannya berfluktuasi tetapi umumnya menurun, dengan deviasi terkecil pada pukul 17:00 sebesar 1,60˚.

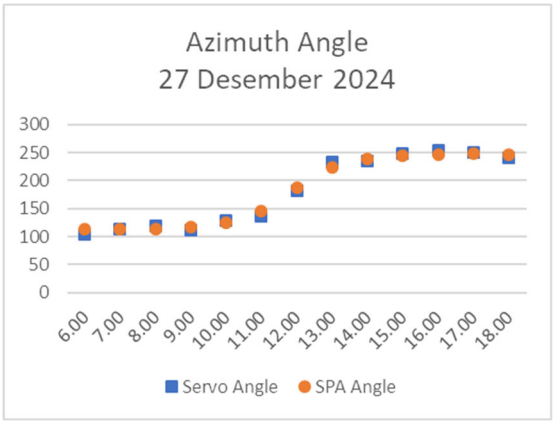
Gambar 10 menunjukkan perbandingan sudut elevasi yang dihasilkan oleh lengan penyangga panel dengan perhitungan *Solar Position Algorithm* (SPA) pada tanggal 27 Desember 2024.



Gambar 10 Hasil Uji Sudut Elevasi pada 27 Desember 2024

Pada pagi hari (06:00–07:00), sudut lengan penyangga lebih rendah dari nilai SPA. Selama tengah hari (08:00–15:00), sudut lengan penyangga dan sudut SPA cenderung selaras, dengan perbedaan terbesar terjadi pada pukul 11:00, mencapai 8,58˚. Namun, pada sore hari (16:00–18:00), deviasi sudut servo meningkat menjadi sekitar 1,6˚ dari nilai SPA.

Gambar 11 menunjukkan perbandingan sudut azimut yang dihasilkan oleh lengan penyangga panel dengan perhitungan *Solar Position Algorithm* (SPA) pada tanggal 27 Desember 2024.



Gambar 11 Hasil Uji Sudut Azimut pada 27 Desember 2024

Pada pagi hari (06:00–10:00), sudut azimut lengan penyangga cenderung berbeda secara signifikan dari sudut SPA, dengan deviasi terbesar terjadi sekitar pukul 08:00. Selama tengah hari (11:00–14:00), perbedaan antara kedua sudut tersebut menjadi lebih kecil dan lebih konsisten, meskipun deviasi yang mencolok muncul pada jam-jam tertentu, seperti pada pukul 13:00. Pada sore hari (15:00–18:00), sudut servo dan sudut SPA selaras lebih erat, dengan perbedaan yang sangat kecil.

Tabel 2 Hasil Pengujian untuk 27 Desember 2024

Time	Altitude (˚)			Azimuth (˚)		
	Measurable	SPA	Difference	Measurable	SPA	Difference
06:00	1	4,90	3,90	104	112,94	8,94
07:00	16	18,65	2,65	113	112,33	0,67
08:00	33	32,39	0,61	119	113,29	5,71
09:00	45	45,91	0,91	112	116,62	4,62
10:00	55	58,78	3,78	128	124,71	3,29
11:00	61	69,58	8,58	137	144,81	7,81
12:00	70	73,44	3,44	182	187,59	5,59
13:00	64	66,61	2,61	233	223,60	9,40
14:00	49	54,87	5,87	236	238,63	2,63
15:00	38	41,72	3,72	248	244,79	3,21
16:00	28	28,10	0,10	255	247,23	7,77
17:00	16	14,34	1,66	251	247,65	3,35
18:00	1	0,61	0,39	240	246,60	6,60

Tabel 2 menyajikan hasil pengujian selisih sudut antara sudut terukur dari lengan penyangga panel dan sudut yang dihitung menggunakan *Solar Position Algorithm* (SPA) pada tanggal 27 Desember 2024. Perbedaan dianalisis baik untuk sudut elevasi maupun azimut.

Untuk sudut elevasi, selisih terbesar sebesar 8,58˚ terjadi pada pukul 11:00, diikuti oleh fluktuasi sepanjang hari. Perbedaan terkecil, 0,10˚, tercatat pada pukul 16:00, menunjukkan akurasi tinggi pada waktu tersebut. Selisih yang relatif besar juga diamati pada awal pengukuran, yakni 3,90˚ pada pukul 06:00.

Untuk sudut azimut, selisih terbesar sebesar 9,40˚ terjadi pada pukul 13:00. Selisih yang signifikan juga muncul pada pagi hari (8,94˚ pada pukul 06:00), kemudian turun tajam menjadi 0,67˚ pada pukul 07:00, sebelum naik kembali dan berfluktuasi hingga tengah hari. Setelah pukul 13:00, selisih cenderung menurun, dengan nilai terkecil 0,67˚ pada pukul 07:00. Namun, terjadi peningkatan lagi pada pukul 16:00, mencapai 7,77˚, sebelum menurun kembali menjadi 3,35˚ pada pukul 17:00. Secara keseluruhan, akurasi azimut tidak konsisten sepanjang hari.

4. ANALISA

Analisis kinerja sistem pelacakan ini didasarkan secara ketat pada perbandingan kuantitatif antara sudut lengan penyangga yang diukur (menggunakan busur derajat) dan sudut referensi teoritis yang dihitung oleh *Solar Position Algorithm* (SPA). Evaluasi ini membedah data yang dikumpulkan pada tanggal 26 dan 27 Desember 2024 untuk mengidentifikasi pola kesalahan spesifik di sepanjang sumbu elevasi (*altitude*) dan azimut.

4.1. Analisis Pelacakan Elevasi (*Altitude*)

Data pelacakan elevasi menunjukkan lintasan "kurva lonceng" yang jelas, namun dengan pola deviasi sistematis yang berulang secara identik pada kedua hari pengujian.

a. Deviasi Puncak Pelacakan Rendah pada pukul 11:00: Temuan data yang paling signifikan adalah peremehan konsisten terhadap sudut elevasi satu jam sebelum tengah hari surya.
b. Pada tanggal 26 Desember, sudut terukur adalah 61° sementara SPA meminta 69,62°, yang menghasilkan deviasi maksimum sebesar 8,62°.
c. Pada tanggal 27 Desember, sudut terukur kembali berada di angka 61° terhadap target SPA sebesar 69,58°, menghasilkan deviasi yang hampir identik sebesar 8,58°.
d. Interpretasi Data: Perulangan ini mengonfirmasi adanya kesalahan sistematis spesifik di mana sistem secara konsisten gagal mencapai titik setel vertikal puncak antara elevasi 60°–70°. Nilai terukur mencapai dataran tinggi lebih awal daripada yang ditentukan oleh algoritma (dikenal sebagai Fenomena Plateau Dini).

Fase Elevasi Sore Hari dengan Presisi Tinggi: Berbeda dengan kesalahan di tengah hari, data menunjukkan akurasi yang luar biasa pada penurunan sore hari (16:00–18:00).

a. Pada pukul 16:00 tanggal 26 Desember, deviasi turun hingga ke angka yang sangat kecil yaitu 0,02° (Terukur: 28° vs SPA: 27,98°).
b. Pada pukul 16:00 tanggal 27 Desember, deviasi serupa rendahnya berada di angka 0,10°.
c. Interpretasi Data: Kontras yang tajam ini menunjukkan bahwa logika pelacakan sangat akurat untuk sudut datang yang lebih rendah (di bawah 30°), namun akurasi linier menurun seiring dengan meningkatnya sudut yang diperlukan menuju zenit.

4.2. Analisis Data Azimut

Data azimut menunjukkan volatilitas (fluktuasi) yang lebih tinggi dibandingkan dengan data elevasi, yang ditandai dengan perbedaan signifikan pada jam-jam transisi tertentu.

a. Lag Inisialisasi Pagi (06:00–08:00): Sistem kesulitan untuk mengunci azimut yang benar segera setelah matahari terbit.
b. Pada tanggal 26 Desember, kesalahan azimut terbesar hari itu terjadi pada pukul 08:00, dengan selisih 10,35° (Terukur: 103° vs SPA: 113,35°).
c. Pada tanggal 27 Desember, kesalahan awal yang signifikan sebesar 8,94° tercatat pada pukul 06:00.
d. Interpretasi Data: Data menunjukkan adanya "fenomena mengejar" (*catch-up phenomenon*) di mana sudut terukur tertinggal secara signifikan di belakang pergeseran pagi matahari yang cepat sebelum stabil sekitar pukul 09:00.

Lonjakan Deviasi Pasca-Siang (13:00): Pola kritis diamati segera setelah matahari melewati titik tertingginya (tengah hari surya).

a. Pada tanggal 26 Desember, kesalahan melonjak menjadi 8,71° pada pukul 13:00.
b. Pada tanggal 27 Desember, kesalahan melonjak lebih tinggi lagi menjadi 9,40° pada pukul 13:00, yang merupakan kesalahan azimut maksimum untuk hari itu.
c. Interpretasi Data: Secara astronomis, pukul 13:00 mewakili periode perubahan azimut yang cepat. Data menunjukkan bahwa meskipun akurasi cukup wajar pada pukul 12:00 (kesalahan sekitar 4–5°), sistem gagal mempertahankan akurasi ini selama transisi pukul 12:00 hingga 13:00, sehingga menghasilkan divergensi mendadak sebelum kesalahan berkurang kembali pada sore hari (turun menjadi 1,60° pada pukul 17:00).

4.3. Reproduksibilitas dan Akurasi Statistik

Membandingkan kumpulan data dari kedua hari tersebut mengungkapkan reproduksibilitas yang tinggi dalam perilaku sistem. Profil kesalahan, khususnya kesalahan elevasi puncak pada pukul 11:00 dan lonjakan azimut pada pukul 13:00 muncul pada stempel waktu yang persis sama dengan magnitudo yang sebanding.

a. Selisih Kesalahan Maksimum Elevasi:

$$8.62° - 8.58° = 0.04° \qquad (11)$$

b. Selisih Lonjakan Azimut Pukul 13:00:

$$8.71° - 9.40° = 0.69° \qquad (12)$$

Kemiripan statistik ini menunjukkan bahwa kesalahan tersebut bukanlah anomali acak, melainkan karakteristik yang dapat diprediksi dari konfigurasi sistem saat ini di bawah kondisi pengujian. Untuk mengevaluasi lebih lanjut presisi sistem, persentase kesalahan dihitung berdasarkan deviasi antara nilai referensi SPA dan sudut servo terukur:

a. akurasi Elevasi (*Altitude*): Pelacakan elevasi umumnya mempertahankan rentang akurasi 88%–92%. Persentase kesalahan tertinggi terjadi sekitar pukul 11:00, mencapai sekitar 12,38% (berdasarkan deviasi 8,62° dari target 69,62°) pada tanggal 26 Desember. Sebaliknya, sistem mencapai performa puncaknya pada sore hari, dengan kesalahan turun hingga serendah 0,07% pada pukul 16:00.
b. Akurasi Azimut: Pelacakan azimut menunjukkan keandalan keseluruhan yang lebih tinggi dengan akurasi yang secara konsisten melebihi 90%. Skenario terburuk diamati pada pukul 08:00, dengan persentase kesalahan 9,13% (deviasi 10,35°). Bahkan selama lonjakan sudut yang signifikan pada pukul 13:00 tanggal 27 Desember (deviasi 9,40°), kesalahan relatif tetap rendah sekitar 4,20% dikarenakan penyebut sudut azimut yang lebih besar.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengevaluasi kinerja sistem panel surya pelacak matahari dua sumbu menggunakan *Solar Position Algorithm* (SPA) pada platform kontrol *open-loop* berbasis mikrokontroler. Berdasarkan validasi eksperimental yang dilakukan di Bandung, Indonesia, kesimpulan berikut dapat ditarik:

1. **Kinerja Pelacakan**: Prototipe menunjukkan kemampuan untuk melacak lintasan matahari secara otonom. Pelacakan azimut mencapai konsistensi tinggi dengan akurasi rata-rata melebihi 90%, sementara pelacakan elevasi (*altitude*) mempertahankan rentang akurasi antara 88%–92% sepanjang hari.
2. **Batasan Sistem**: Deviasi yang signifikan teridentifikasi pada titik-titik operasional tertentu. Mekanisme elevasi mengalami kesalahan maksimum sebesar 12,38% (sekitar 8,6°) mendekati tengah hari surya (pukul 11:00), yang disebabkan oleh keterbatasan torsi motor servo dalam menahan beban panel terhadap gravitasi. Demikian pula, mekanisme azimut menunjukkan jeda inisialisasi sebesar 9,13% pada pagi hari karena *stiction* (gesekan statis) mekanis.

Secara keseluruhan, meskipun terdapat keterbatasan mekanis yang melekat pada aktuator servo berbiaya rendah dan konfigurasi *open-loop*, sistem ini membuktikan bahwa pelacakan berbasis algoritma merupakan solusi yang layak untuk pemosisian surya. Fenomena *"Early Plateau"* yang diamati pada data elevasi menunjukkan bahwa untuk pengembangan di masa depan, diperlukan aktuator dengan torsi yang lebih tinggi atau mekanisme penyeimbang (*counter-weight*) guna menghilangkan kesalahan penurunan (*droop error*) di tengah hari.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Efendi, R. I. Mainil, dan A. Aziz, "Comparison of the Efficiency of Solar PV Fixed, Single-Axis, and Dual-Axis Solar Trackers: A Review," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 10, no. 1, hlm. 84–93, Jan 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.1.9.

[2] J. G. D. Marpaung, Rahmaniar, dan A. Faisal, "Optimization The Utilization of Solar Power Plants with A Capacity of 50 WP in Supporting the Welfare of Rural Communities," *International Conferance Of Digital Sciences And Engineering Technology*, hlm. 438–447, Okt 2024.

[3] R. Syafrialdi dan Wildian, "RANCANG BANGUN SOLAR TRACKER BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA8535 DENGAN SENSOR LDR DAN PENAMPIL LCD," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 4, no. 2, 2015, doi: 10.25077/jfu.4.2.%25p.2015.

[4] K. Melo, H. Moreira, dan M. Villalva, "Influence of Solar Position Calculation Methods Applied to Horizontal Single-Axis Solar Trackers on Energy Generation," *Energies*, vol. 13, Jul 2020, doi: 10.3390/en13153826.

[5] M. Asri dan Serwin, "RANCANG BANGUN SOLAR TRACKING SYSTEM UNTUK OPTIMASI OUTPUT DAYA PADA PANEL SURYA," *Jurnal Informatik Sains dan Teknologi*, vol. 4, no. 1, hlm. 11–20, Apr 2019.

[6] M. Pardawantara, F. Antony, dan Rachmansyah, "PERANCANGAN SISTEM SOLAR TRACKING DUAL AXIS UNTUK OPTIMASI PANEL SURYA MENGGUNAKAN SENSOR LDR DAN GYROSCOPE BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT)," *Journal of Intelligent Networks and IoT Global*, vol. 1, no. 2, hlm. 98–106, Des 2023, doi: 10.36982/jinig.v1i2.3645.

[7] M. R. Calabretta dan E. W. Greisen, "Representations of celestial coordinates in FITS," *A&A*, vol. 395, no. 3, hlm. 1077–1122, Des 2002, doi: 10.1051/0004-6361:20021327.

[8] Y. Rizal, S. H. Wibowo, dan Feriyadi, "Application of Solar Position Algorithm for Sun-Tracking System," *Energy Procedia*, vol. 32, hlm. 160–165, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.021.

[9] R. Milne, "Note on the Equation, of Time," *Math. Gaz.*, vol. 10, no. 155, hlm. 372–375, 1921, doi: 10.1017/S0025557200232944.

[10] M. Božiková *dkk.*, "The Effect of Azimuth and Tilt Angle Changes on the Energy Balance of Photovoltaic System Installed in the Southern Slovakia Region," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 19, hlm. 8998, Jan 2021, doi: 10.3390/app11198998.

[11] H. González-Camarillo *dkk.*, "Closed-Loop Solar Tracking Control Strategy to Correct Drift in a CPV System Using Image Processing," *Processes*, vol. 13, no. 4, hlm. 944, Mar 2025, doi: 10.3390/pr13040944.

[12] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, dan T. Ajzoul, "Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, hlm. 87–99, Apr 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.044.