JUTEKNIN: Telecommunication, Electronic, Automation, Robotics, Mechatronics, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, Control & Power
Journal homepage: https://ejurnal.uibu.ac.id/index.php/JUTEKNIN
ISSN: ……
Vol. 1, No. 1, August2025, Pp. 011 -017

Perancangan Algoritma Presisi Tinggi untuk Pemodelan Posisi Matahari Untuk Aplikasi Pelacak Panel Surya

Francisco Marcel*[1], Muhammad Nur Cholis[2], Arisandi[3], Ririn Ningkeula[4] Donny Satria Pratama[5]
1, Universitas Insan Budi Utomo, Teknik Elektro, Indonesia
2, Universitas Insan Budi Utomo, Teknik Elektro, Indonesia
3, Universitas Insan Budi Utomo, Teknik Mesin, Indonesia
4, Universitas Insan Budi Utomo, Teknik Mesin, Indonesia
5, Universitas Insan Budi Utomo, Teknik Elektro, Indonesia

Article Info
Keywords:
Solar Position, Algorithm, Energy, Panel Surya, Aplikasi

Article history:
Received 18 August 2025
Revised 20 August 2025
Accepted 30 August 2025
Available online 31 August 2025

Cite:
F. Marcel, M. N. Cholis. Arisandi, R. Ningkeula and D. S. Pratama, "Perancangan Algoritma Presisi untuk Pemodelan Posisi Matahari untuk Pelacak Panel Surya", JUTEKNIN, vol 1, no. 1 pp. 010-017, Augs, 2025.

url :
https://ejurnal.uibu.ac.id/index.php/JUTEKNIN/article/view/1909/1383

* Corresponding author.
Francisco Marcel
E-mail address:
fmarcel416@gmail.com

Abstract
Pemanfaatan PV sebagai sumber energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan kebutuhan akan solusi energi berkerlanjutan. Untuk mencapai kinerja optimal, sistem PV memerlukan mekanisme pelacakan matahari yang akurat sehingga panel selalu berada pada posisi tegak lurus terhadap matahari.Penelitian ini mengembangkan dan mengimplementasikan algoritma penentuan posisi matahari dengan presisi tinggi berbasis parameter astronomis seperti waktu lokal, koordinat geografis, serta koreksi elemen orbit matahari. Algoritma sebelumnya sudah dikembangkan terhadap model referensi standar SPA - Solar Position Algorithm dari NREL namun metode SPA ini membutuhkan komputasi kompleks yang kurang ideal untuk mikrokontroller seperti Arduino. Hasil penelitian ini menunjukkan tingkat akurasi sudut elevasi dan azimuth kurang dari 0,2 derajat, hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan algoritma yang akurat dalam penentuan posisi matahari dan cocok untuk aplikasi di mikrokontroller seperti Arduino

1. Pendahuluan

Permasalahan krisis energi global dan meningkatnya kesadaran akan dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil telah mendorong pengembangan sumber energi terbarukan, salah satunya adalah energi surya. Energi surya merupakan sumber daya yang melimpah, bersih, dan dapat dimanfaatkan hampir di seluruh belahan dunia. Salah satu teknologi utama yang digunakan untuk konversi energi surya menjadi energi listrik adalah panel surya (fotovoltaik) [1]. Namun, efisiensi panel surya sangat dipengaruhi oleh posisi relatif antara permukaan panel dan arah datangnya sinar matahari [2]. Dalam sistem panel surya konvensional yang bersifat statis, orientasi panel ditentukan berdasarkan rata-rata sudut elevasi dan azimut matahari selama satu hari atau satu musim. Variasi sudut datang cahaya matahari sepanjang hari berdampak pada penurunan efisiensi [3]. Untuk mengatasinya, dikembangkan sistem pelacakan matahari yang mampu menyesuaikan orientasi panel secara real time sesuai pergerakan matahari. Salah satu penggunaan sistem ini adalah Solar Tracking [4].

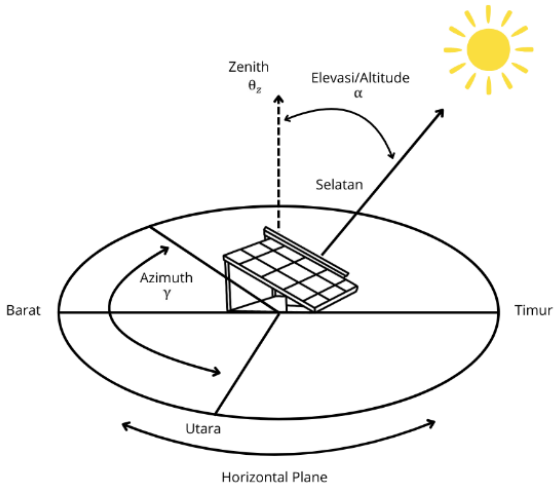
Penggunaan solar tracking ini umumnya menggunakan satu sumbu (single-axis tracker) dan dua sumbu (dual-axis tracker) dengan sensor LDR atau foto sensor [5], namun penggunaan ini tidak efisien dalam hal konsumsi motor karena sulitnya membedakan intesitas cahaya matahari saat berawan yang mengakibatkan penggunaan motor secara terus menerus untuk melacak posisi matahari [6]. Selanjutnya dari penelitian sebelumnya menggunakan metode berbasis penjadwalan tanpa menggunakan sensor Cahaya (foto sensor) hasil ini menunjukkan dapat berfungsi lebih konsisten dan lebih hemat dari segi konsumsi energi motor daripada menggunakan foto sensor [7], namun penggunaan metode ini memiliki kurangnya fleksibilitas dan potensi kesalahan dalam melacak posisi matahari Jika terjadi pergeseran waktu lokal, kesalahan pemasangan, atau kesalahan dalam penentuan parameter geografis yang mengakibatkan posisi panel menyimpang dari arah matahari yang sebenarnya [8]. Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, telah dikembangkan algoritma posisi matahari dengan perhitungan koordinat matahari (sudut elevasi dan azimut) secara real time dengan memanfaatkan parameter astronomis seperti waktu, tanggal, bujur geografis, serta

elemen orbit matahari [9]. Beberapa algoritma telah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya, di antaranya adalah Solar Position Algorithm (SPA) yang dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) [10].

Meskipun algoritma tersebut memiliki tingkat akurasi yang tinggi (hingga 0,0003 derajat untuk SPA), namun pada implementasinya memiliki keterbatasan sumber daya seperti mikrokontroler sering kali menghadapi kendala [11]. Dalam konteks sistem pelacakan panel surya berbasis mikrokontroler atau embedded system seperti Arduino, ESP32, atau STM32, SPA menjadi kurang ideal karena membutuhkan perhitungan trigonometri tingkat tinggi, manipulasi waktu Julian secara presisi, serta pemrosesan bilangan floating point yang intensif [12]. Beberapa studi menunjukkan bahwa ketika SPA diimplementasikan langsung pada mikrokontroler 8-bit tanpa optimasi, waktu eksekusi dapat memakan waktu hingga beberapa detik untuk satu siklus perhitungan, yang tentu tidak efisien bagi sistem pelacak real-time. Dengan kata lain penggunaan SPA menggunakan komputasi yang kompleks dan penggunaan konstanta astronomis yang presisi tinggi menuntut kapasitas pemrosesan dan memori yang besar [13]. Oleh karena itu, dibutuhkan algoritma alternatif yang mampu memberikan keseimbangan antara akurasi tinggi dan efisiensi komputasi, agar dapat diimplementasikan secara optimal dalam sistem pelacak matahari berbasis embedded system [14]. Dari beberapa permasalahan sebelumnya peneliti merancang dan mengembangkan algoritma penentuan posisi matahari dengan presisi tinggi yang tetap efisien secara komputasi, dengan fokus pada optimasi untuk perangkat dengan kemampuan terbatas. Algoritma ini diuji terhadap data referensi dari model presisi tinggi dan dibandingkan secara eksperimental dengan sistem pelacak matahari nyata berbasis mikrokontroler.

2. Metode Persamaan Untuk Mencari Posisi Matahari

Untuk memperoleh sudut azimut dan elevasi dalam penentuan posisi matahari, diperlukan perhitungan parameter-parameter tertentu. Pemahaman terhadap parameter-parameter ini sangat krusial untuk memperoleh akurasi dalam perhitungan posisi matahari, khususnya dalam aplikasi yang berkaitan dengan system pelacakan matahari



Gambar 1.Ilustrasi Azimuth, Zenith dan Altitude/Elevasi

Berikut persamaan parameter yang digunakan untuk mencari posisi matahari

- Julian Day
  Julian Day (JD) adalah sistem penanggalan astronomis yang merepresentasikan interval waktu dalam satuan hari, termasuk pecahan desimal, terhitung sejak tanggal acuan 1 Januari 4713 SM pukul 12:00 UTC [15]. Untuk menghitung JD dapat menggunakan persamaan di bawah ini

$$JD = \lfloor 365.25 \times (Y + 4716) \rfloor + \lfloor 30.6001 \times (M + 1) \rfloor + D + B - 1524.5 + \frac{H + \frac{m}{60} + \frac{s}{3600}}{24} \quad (1)$$

  Keterangan:
  - Y, M, D: (Year) Tahun, (Month) Bulan, (Day) Tanggal (dengan koreksi jika $M \leq 2$)
  - B: Koreksi kalender Gregorian

$$B = 2 - \left\lfloor \frac{Y}{100} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{Y}{400} \right\rfloor \quad (2)$$

  - H, m, s: (Hour) Jam, (minute) menit, (second) detik dalam UTC (Universal Time).

© 2025 The Authors. Published by Universitas Insan Budi Utomo

Fungsi dari JD adalah mengkonversi waktu kalender menjadi nilai kontinu untuk memudahkan perhitungan astronomis.

- Julian Century (JC)
  Setelah mengetahui nilai JD selanjutnya mencari nilai waktu JC. JC merupakan satuan waktu yang digunakan untuk menyederhanakan persamaan ephemeris matahari, didefinisikan sebagai interval sejak epoch J2000.0 (1 Januari 2000, 12:00 UTC).

$$JC = \frac{JD - 2451545.0}{36525} \quad (3)$$

dimana nilai 2451545.0 merupakan JD untuk epoch J2000.0 dan 36525 adalah jumlah hari dalam 1 abad Julian.

- Geometric Mean Longitude (L_0)
  Selanjutnya adalah menghitung posisi geometris matahari (Geometric Mean Longitude). Geometric Mean Longitude merupakan panjang bujur ekliptika Matahari dihitung secara rata-rata (tanpa koreksi presesi atau perturbasi), relatif terhadap titik vernal, dalam sistem koordinat heliosentris [16]. Nilai dari Geometric Mean Longitude merupakan satuan derajat yang dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini

$$L_0 = [280.46646 + JC \times (36000.76983 + JC \times 0.0003032)] \quad mod\ 360 \quad (4)$$

Dalam persamaan tersebut terdapat mod 360 yang digunakan untuk membatasi hasil dalam rentang $0° - 360°$

- Mean Anomaly (M)
  Persamaan Mean Anomaly digunakan untuk menggambarkan posisi benda langit di orbitnya sebagai fungsi waktu yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$M = 357.52911 + JC \times (35999.05029 - 0.0001537 \times JC) \quad (5)$$

- Equation of Center (C)
  Equation of Center adalah koreksi yang diterapkan pada Mean Anomaly untuk mendapatkan True Anomaly, yaitu posisi sebenarnya Matahari (atau planet) di orbit elipsnya, dibandingkan dengan posisi yang diasumsikan jika orbit berbentuk lingkaran, yang didasarkan pada hukum Kepler [16] dengan persamaan berikut

$$C = (1.914602 - JC \times 0.004817)\ sin\ M + (0.019993 - JC \times 0.000101) sin 2M + 0.000289\ sin\ 3M \quad (6)$$

- True Longitude (λ)

$$\lambda = L_0 + C \quad (7)$$

True Longitude merupakan posisi sebenarnya Matahari atau planet di sepanjang orbit elipsnya, dihitung dalam koordinat ekliptika [16]. True Longitude akan digunakan untuk perhitungan perhitungan deklinasi matahari

- Deklinasi Matahari (δ)
  Deklinasi Matahari adalah sudut antara sinar Matahari dan bidang ekuator langit yang menunjukkan posisi utara atau selatan Matahari relatif terhadap ekuator Bumi [17], parameter ini sangant penting untuk menentukan sudut azimuth dan elevasi

$$\delta = arcsin\ (sin\ \epsilon \times sin\ \lambda_{app}) \quad (8)$$

dimana:

- λ_{app} = Aparan panjang ekliptika Matahari, atau apparent solar longitude, yaitu posisi Matahari di sepanjang ekliptika yang telah dikoreksi untuk aberasi dan nutasi.

$$\lambda_{app} = \lambda - 0.00569 - 0.00478\, sin\, \omega \quad 9$$

$$\omega = 125.04 - 1934.136 \times JC \quad 10$$

- ϵ = Kemiringan sumbu Bumi terhadap bidang orbit

$$\epsilon = \epsilon_0 + 0.00256\, cos\, \omega \quad 11$$

$$\epsilon_0 = 23.439291° - JC \times 0.0130042 \quad 12$$

- Equation of Time (EOT)
  EOT menyatakan selisih antara waktu Matahari nyata dan waktu rata-rata (dalam menit), akibat eksentrisitas orbit dan kemiringan sumbu Bumi [18]. EOT digunakan untuk menentukan *Hour Angle*

$$EOT = 4 \times [y \sin 2\, L_0 - 2e \sin M + 4ey \sin M\, cos\, 2L_0 - 0.5y^2 \sin 4L_0 - 1.25e^2 \sin 2M] \quad 13$$

  dimana:

$$y = \tan^2\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \quad 14$$

$$\epsilon = 0.016709\ (eksentrisitas\ orbit\ Bumi) \quad 15$$

- Hour Angle (HA)
  Hour Angle merupakan sudut antara meridian lokal pengamat dan posisi saat ini benda langit, diukur sepanjang ekuator langit [19], sudut Hour Angle dapat ditentukan melalui persamaan berikut

$$HA = \left(\frac{\text{SolarTime}}{4}\right) - 180 \quad 16$$

$$\text{SolarTime} = \left(H \times 60 + m + \frac{s}{60} + EOT + 4 \times \text{Longitude} - 60 \times \text{TimeZone}\right)\ mod\ 1440 \quad 17$$

  dimana H = jam local, m = menit local, s = detik local, Longitude = bujur geografis, mod 1440 = jumlah menit dalam 1 hari, TimeZone = offset zona wakru UTC (sebagai contoh Waktu Indonesia Bagian Barat = +7). Dengan adanya perhitungan Solar Hour Angle selanjutnya dapat menentukan sudut elevasi dan azimuth

- Zenith Angle (θ_z)
  Sebelum mencari hasil nilai azimuth dan elevasi diperlukan mencari sudut zenith, sudut zenith merupakan sudut antara arah tegak lurus ke atas (zenith) dan arah matahari di langit [20] dengan persamaan berikut

$$\theta_z = \arccos(\sin\phi\ \sin\delta + \cos\phi\ \cos\delta\ \cos HA\ ) \quad 18$$

  Dimana ϕ merupakan sudut Latitude atau lintang pengamat

- Elevasi (α)
  Sudut elevasi merupakan sudut antara matahari dan horizon pengamat yang menunjukkan tinggi matahari di langit pada waktu tertentu yang dapat dilihat dari lokasi pengamat di Bumi [21]

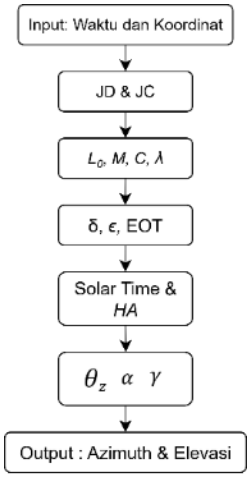
$$\alpha = 90° - \theta_z \quad 19$$

- Azimuth (γ)
  Sudut azimuth matahari (γ) adalah sudut arah horizontal matahari yang diukur dari utara searah jarum jam hingga ke posisi matahari di langit [21] dimana Utara = 0°, Timur = 90°, Selatan = 180°, Barat = 270°

$$\gamma = \arctan 2\ (sin\ HA\ cos\ HA \sin\phi - \tan\delta \cos\phi) \quad 20$$

© 2025 The Authors. Published by Universitas Insan Budi Utomo

Dari parameter persamaan ini akan digunakan dan diimplementasikan di Arduino untuk mencari posisi azimuth dan elevasi matahari yang dapat diinterpretasikan melalui diagram alir di bawah ini



Gambar 2. Flowchart Posisi Matahari

3. Hasil dan Diskusi

Pada bagian ini, algoritma yang diusulkan dibandingkan dengan tabel posisi matahari dari NREL (National Renewable Energy Laboratory). Pengujian ini dilakukan selama 1 hari dari 7.00 – 17.00 dan diambil setiap 1 jam untuk memperoleh hasil azimuth dan elevasi matahari selain itu algoritma yang diusulkan diimplenentasikan di Arduino Uno dalam bentuk Library SimpleSolarTracker.h

```
#include <SimpleSolarTracker.h>

// Koordinat Malang
SimpleSolarTracker tracker(-7.86540, 112.69130, 7);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Tanggal dan waktu saat ini (Format: Tahun, Bulan, Tanggal, 12:00:00)
  tracker.calculate(2025, 8, 17, 12, 0, 0);

  Serial.print("Azimuth: ");
  Serial.print(tracker.getAzimuth());
  Serial.print("°, Elevation: ");
  Serial.print(tracker.getElevation());
  Serial.println("°");

  delay(1000);
}
```

```
Output    Serial Monitor
Sketch uses 5960 bytes (18%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 250 bytes (12%) of dynamic memory, leaving 1798 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.
```

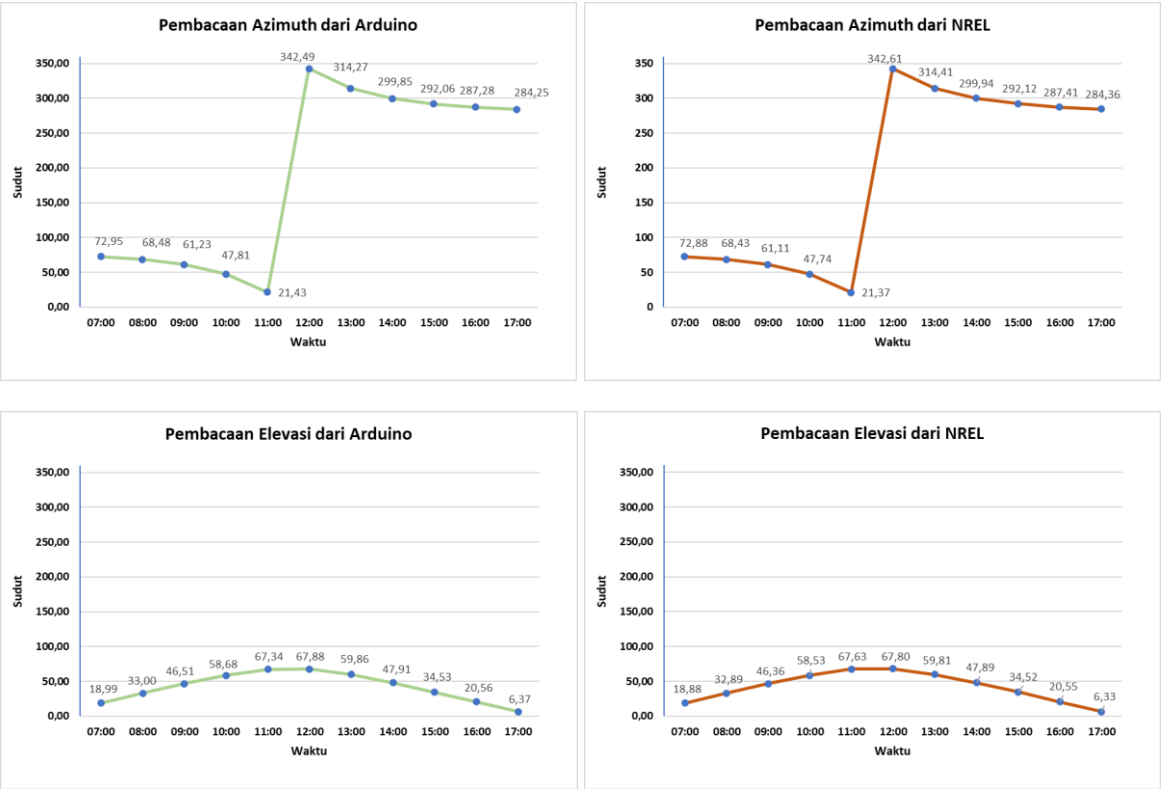
Gambar 3. Implementasi Posisi Matahari di Arduino

Dari gambar diatas dapat dibuktikan bahwa penggunaan flash memori Library SimpleSolarTracker.h di Arduino Uno membutuhkan 5.96KB dan 243 bytes untuk SRAM hal ini cukup untuk kebutuhan aplikasi untuk kebutuhan seperti solar tracker dan aplikasi lainnya. Pada gambar dan tabel di bawah ini merupakan hasil pengujian azimuth dan elevasi matahari metode yang diusulkan dengan perbandingan NREL

Tabel 1. Perbandingan Sudut Azimuth dan Elevasi

Waktu	Sudut Azimuth dari Arduino°	Sudut Azimuth dari NREL°
07:00	72,95	72,88
08:00	68,48	68,43
09:00	61,23	61,11
10:00	47,81	47,74
11:00	21,43	21,37
12:00	342,49	342,61
13:00	314,27	314,41
14:00	299,85	299,94
15:00	292,06	292,12
16:00	287,28	287,41
17:00	284,25	284,36
Total Error 0.08 °		

Waktu	Sudut Elevasi dari Arduino°	Sudut Elevasi dari NREL°
07:00	18,99	18,88
08:00	33,00	32,89
09:00	46,51	46,36
10:00	58,68	58,53
11:00	67,34	67,63
12:00	67,88	67,80
13:00	59,86	59,81
14:00	47,91	47,89
15:00	34,53	34,52
16:00	20,56	20,55
17:00	6,37	6,33
Total Error 0.11 °		



Gambar 4.Perbandingan Grafik Error Terhadap Sudut Azimuth dan Elevasi

Pada pengujian akurasi sudut posisi matahari, perhitungan berbasis Arduino dibandingkan dengan data referensi dari NREL (National Renewable Energy Laboratory). Pengambilan data dilakukan setiap jam mulai pukul 07:00 hingga 17:00 WIB. Hasil analisis menunjukkan bahwa selisih (error) sudut azimuth antara Arduino dan NREL sangat kecil, dengan total error sebesar hanya 0,08° sementara itu, pada sudut elevasi diperoleh total error error 0,11°. Secara keseluruhan, baik sudut azimuth maupun elevasi menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik dengan rata-rata error di bawah 0,2°. Hal ini membuktikan bahwa algoritma perhitungan berbasis Arduino mampu menghasilkan estimasi posisi matahari yang sebanding dengan data standar astronomis dari NREL.

© 2025 The Authors. Published by Universitas Insan Budi Utomo

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dapat dibuktikan bahwa metode algoritma yang diusulkan dapat berjalan dengan baik di Arduino Uno dengan ukuran kapasitas memori yang kecil sekitar 5.96KB dan 243 bytes untuk SRAM selain itu perbandingan sudut posisi matahari antara perhitungan berbasis Arduino dan data referensi dari NREL, diperoleh bahwa nilai error yang dihasilkan sangat kecil. Pada sudut azimuth, total error 0,08°, sedangkan pada sudut elevasi total error sebesar 0,11°. Seluruh nilai error berada di bawah 0,2°, sehingga dapat disimpulkan bahwa algoritma ini memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan sebanding dengan standar astronomis NREL. Dengan demikian, metode ini dapat dijadikan dasar yang andal dalam pengembangan sistem pelacak matahari

Referensi

[1] L. D. Jathar *et al.*, “Comprehensive review of environmental factors influencing the performance of photovoltaic panels: Concern over emissions at various phases throughout the lifecycle,” Jun. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121474.

[2] A. Fadhila Pachman, D. Hissein Didane, M. Al-Ghriybah, N. Fitriah Nasir, S. Al-Alimi, and B. Manshoor, “A Study of Global Solar Radiations Measurement in Java Island, Indonesia,” 2023.

[3] W. Lu and P. Ajay, “Solar PV tracking system using arithmetic optimization with dual axis and sensor,” *Measurement: Sensors*, vol. 33, p. 101089, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.measen.2024.101089.

[4] T. Rajesh, K. S. Tamilselvan, A. Vijayalakshmi, N. C. Kumar, and K. A. Reddy, “Design and implementation of an automatic solar tracking system for a monocrystalline silicon material panel using MPPT algorithm,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 1783–1789. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.635.

[5] N. AL-Rousan, N. A. Mat Isa, and M. K. Mat Desa, “Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, no. 7, pp. 459–469, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jksues.2020.04.004.

[6] N. Thungsuk *et al.*, “Performance Analysis of Solar Tracking Systems by Five-Position Angles with a Single Axis and Dual Axis,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 16, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16165869.

[7] N. Kuttybay *et al.*, “Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13195226.

[8] S. G. Dabade, S. S. Sarpale, S. N. Shindalkar, Y. R. Kapre, and S. P. Murme, “FABRICATION OF DUAL AXIS SOLAR TRACK-ING SYSTEM WITHOUT USING SENSORS,” 2020. [Online]. Available: http://www.ijser.org

[9] *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS 2019) : proceedings : 29th June 2019, Shah Alam, Malaysia : conference venue, Grand Blue Wave Hotel, Selangor, Malaysia*. IEEE, 2019.

[10] I. Reda and A. Andreas, “Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications,” 2003. [Online]. Available: http://www.osti.gov/bridge

[11] Y.-W. Tang, “Effects of parameters on NREL Solar Position Algorithm (SPA) and SIMATIC S7-1200 SPA_Calc_SunVector library accuracy.”

[12] K. B. De Melo, M. Kitayama, L. R. Tavares, H. Andreazza De Freitas, and M. G. Villalva, “Accuracy Analysis of Sun Position Calculation Algorithms: Ineichen and SPA,” in *2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2019. doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895282.

[13] W. Huang and B. Liu, “Solar Position Algorithm Based on the Kepler Equation,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/app12115449.

[14] M. Orosz *et al.*, “Low-cost small scale parabolic trough collector design for manufacturing and deployment in Africa,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., May 2016. doi: 10.1063/1.4949040.

[15] D. D. Mccarthy, “THE JULIAN AND MODIFIED JULIAN DATES,” 1998.

[16] B. K. P. Horn, “The Position of the Sun,” 1978.

[17] J. A. Rueda, S. Ramírez, M. A. Sánchez, and J. de D. Guerrero, “Sun Declination and Distribution of Natural Beam Irradiance on Earth,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/atmos15081003.

[18] B.D Yallop, “The Equation og Time,” 1989.

[19] L. Barazzetti, “Revitalizing Astronomical Azimuth Determination: Integrating Modern Computing with Traditional Techniques,” *Sensors*, vol. 25, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/s25061871.

[20] T. W. Cronin, “On the choice of average solar zenith angle,” *J Atmos Sci*, vol. 71, no. 8, pp. 2994–3003, 2014, doi: 10.1175/jas-d-13-0392.1.

[21] S. A. A. Shufat, E. Kurt, and A. Hancerlioğulları, “Modeling and design of azimuth-altitude dual axis solar tracker for maximum solar energy generation,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 8, no. 1, pp. 7–13, Feb. 2019, doi: 10.14710/ijred.8.1.7-13.