

Rancang Bangun Sistem *Solar Tracker* menggunakan Kamera dengan Pengolahan Citra

Serti Octavia, Swastya Rahastama[✉], Menasita Mayantasari, Ayu Lia Pratama

Fisika, Jurusan Sains Teknologi Pangan dan Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

[✉]Email: swastya.r@lecturer.itk.ac.id

Submitted: 09-09-2024 **Revised:** 10-10-2024 **Accepted:** 11-11-2024

ABSTRAK

Sistem *solar tracker* dapat membantu panel surya untuk mengarah tepat pada posisi matahari. Penelitian ini bertujuan untuk membangun *single-axis solar tracker* menggunakan kamera sebagai penjejak matahari menggunakan teknik pengolahan citra berbasis *hue, saturation, and value* (HSV). Dalam penelitian ini menggunakan sistem kontrol pada *solar tracker* memanfaatkan Raspberry Pi 4, sistem penggerak menggunakan motor servo, sensor GY-302 sebagai sensor cahaya, serta sensor kemiringan MPU-6050 untuk menentukan tingkat akurasi dari *solar tracker* terhadap posisi matahari. Implementasi dari sistem *solar tracker* telah dilakukan untuk memantau pergerakan matahari selama dua jam pada kondisi langit cerah berawan. Tingkat akurasi berdasarkan sudut kemiringan *solar tracker* yang dideteksi didapatkan perbedaan rata-rata hingga 3.99°. Tiga momen tutupan awan terjadi pada percobaan selama 6 menit. Selama momen tutupan awan, posisi matahari masih dapat dideteksi pada frame dan membuat adanya pergerakan pada *solar tracker* yang disebabkan oleh adanya cahaya yang bocor dari awan. Regresi linear dari grafik pengukuran sudut kemiringan *solar tracker* selama percobaan lapangan menunjukkan nilai intercept dan slope yang tidak jauh berbeda dari hasil perhitungan posisi matahari, sehingga sistem pengenalan objek matahari dengan metode HSV yang telah diterapkan untuk *solar tracker* ini mampu untuk menjejak matahari dengan baik.

Kata Kunci: *solar tracker; pengolahan citra; tutupan awan.*

ABSTRACT

A solar tracker system could help solar panels to accurately align with the sun's position. This research aimed to build a single-axis solar tracker using a camera as a sun tracker through image processing techniques based on hue, saturation, and value (HSV). The control system of the solar tracker utilized a Raspberry Pi 4, the drive system used a servo motor, the GY-302 used a light sensor, the MPU-6050 tilt sensor used to determine the accuracy level of the solar tracker against the sun's position. The implementation of the solar tracker system was conducted to monitor the sun's movement for two hours under partly cloudy conditions. The accuracy level based on the tilt angle of the solar tracker detected by the MPU6050 against the calculated actual sun position angle showed an average difference of up to 3.99°. Three instances of cloud cover occurred during the six-minute trial. During the cloud cover moments, the sun's position could still be detected in the frame, causing movement in the solar tracker due to light leaking through the clouds. Linear regression of the solar tracker's tilt angle measurement graph during the field trial showed intercept and slope values that were not far different from the calculated sun position, indicating that the sun recognition system using the HSV method applied to the solar tracker could track the sun well.

Keywords: *solar tracker; image processing, clouds.*

PENDAHULUAN

Pengembangan sumber energi baru dan terbarukan harus ditingkatkan mengingat peran strategis dan kenaikan harga bahan bakar minyak, sehingga menjadi alternatif yang berkelanjutan dalam penyediaan energi [1]. Energi terbarukan merujuk pada sumber energi alam yang dapat diperbaharui [2]. Salah satu misi utama dalam mewujudkan *sustainable development goals* terkait penyediaan energi bersih dan berkelanjutan adalah pemanfaatan energi surya yang lebih masif. Dewasa ini panel surya bukanlah hal yang asing lagi. Panel surya sudah banyak digunakan dalam berbagai sektor di Indonesia, baik sektor industri, sektor pertanian, maupun sektor peternakan [3]. Sayangnya panel surya sangat bergantung pada kondisi penyinaran matahari pada suatu daerah yang mungkin saja tidak dapat menghasilkan daya yang diinginkan. Tutupan awan yang tinggi pada suatu daerah membuat implementasi panel surya tidak maksimal.

Guna memaksimalkan konversi energi matahari menjadi energi listrik pada panel surya, berbagai cara telah dilakukan seperti peningkatan efisiensi kuantum pada sel surya, peningkatan kinerja kontak dengan mengurangi arus bocor, penerapan teknik penjejak matahari menggunakan *solar tracker*, dan lain sebagainya [4]–[6]. Teknik penjejak matahari menggunakan *solar tracker* bertujuan untuk memaksimalkan intensitas matahari yang datang pada panel surya sehingga dapat meningkatkan pemanenan energi surya [7], [8]. *Solar tracker* dapat membantu panel surya agar sinar matahari yang datang selalu mengarah tegak lurus terhadap panel surya [9]. Sistem *solar tracker* dapat dibangun dengan menggunakan berbagai cara, seperti memanfaatkan sensor cahaya berupa fotoresistor dengan melihat perubahan resistansi, melalui perhitungan astronomi dengan memperkirakan posisi azimuth dan elevasi matahari pada waktu tertentu, atau menggunakan alat bantu berupa kamera dengan teknik pengenalan objek [10]–[12].

Implementasi *solar tracker* memungkinkan pemantauan objek matahari menggunakan kamera dengan teknik pengolahan citra. Pemantauan ini memanfaatkan video secara *real-time* untuk mengikuti pergerakan matahari. Dengan penggunaan satu kamera yang terpasang, dimungkinkan untuk menggerakkan banyak panel secara bersamaan.

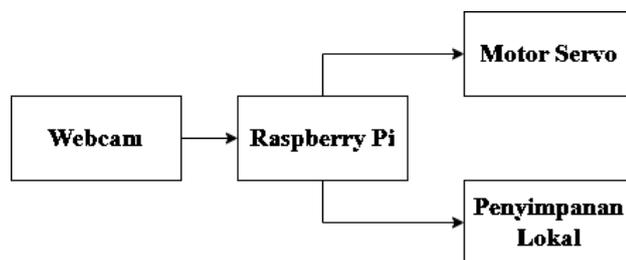
Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan *solar tracker* untuk meningkatkan daya input yang dihasilkan. Salah satu penelitian tersebut menggunakan teknik pengolahan citra dengan mengintegrasikan berbagai metode, seperti *grayscale*, *gaussian blur*, *threshold*, *erode* dan *dilate*, serta *contour* untuk mendeteksi posisi matahari [13], [14]. Penelitian ini memanfaatkan dataset gambar untuk menerapkan teknik pengolahan citra. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pengolahan citra sangat efektif untuk diaplikasikan pada *solar tracker*, dengan tingkat keberhasilan mencapai 100% pada kondisi cerah dan 80% pada kondisi berawan. Penelitian lain juga telah melakukan upaya serupa untuk mengoptimalkan output panel surya, dan hasil analisis menunjukkan bahwa pengolahan citra dapat secara signifikan meningkatkan kinerja panel surya.

Dari latar belakang yang telah dijelaskan diatas maka dalam penelitian ini menggunakan rancangan sistem *solar tracker* untuk menjejak posisi matahari dengan memanfaatkan kamera secara langsung. Selain itu, dalam penelitian ini menggunakan metode *hue, saturation, value* (HSV) dalam mendeteksi posisi matahari terutama saat berawan. Metode HSV adalah metode yang menyerupai cara manusia dalam melihat warna, sehingga sangat ideal untuk mengidentifikasi sebuah objek [11], [15]., Selain itu, metode HSV banyak digunakan dalam mendeteksi dan menganalisis objek pada bidang fotografi seperti penelitian yang dilakukan oleh Relin (2024) [16]. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah melihat

keakuratan penggunaan metode HSV dalam mencari posisi matahari, baik pada kondisi berawan maupun cerah.

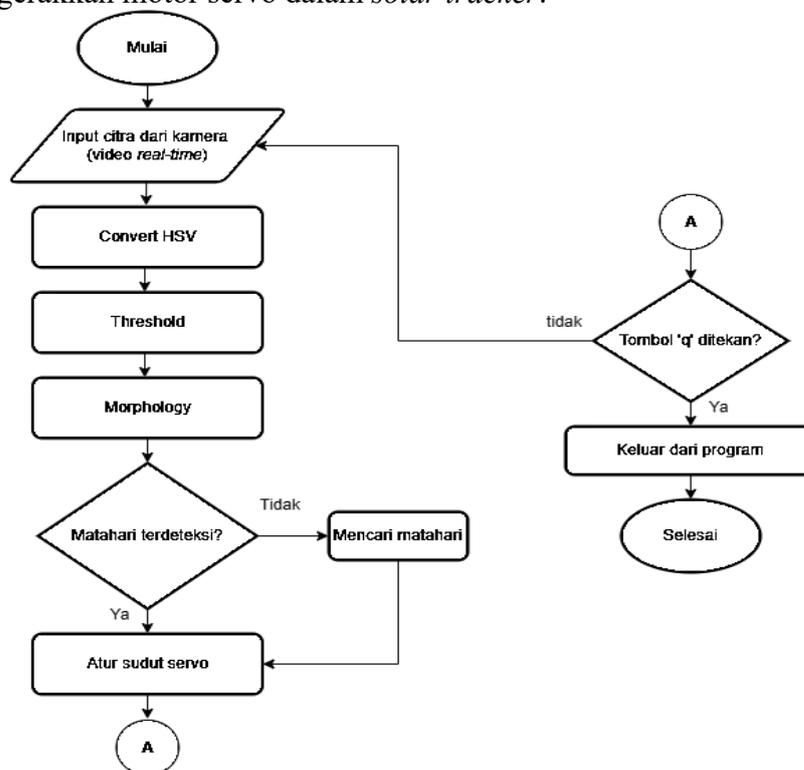
METODE PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem *solar tracker* yang menggambarkan secara sederhana prinsip kerja dari *solar tracker*. *Webcam* yang bertindak sebagai sensor utama, mengirimkan data citra mentah pada Raspberry Pi. Hasil tangkapan gambar secara *real time* oleh *webcam* kemudian diolah menggunakan teknik pengolahan citra untuk mengidentifikasi posisi matahari. Dengan menggunakan teknik pengolahan citra, maka objek matahari dapat diidentifikasi dan digunakan sebagai masukan untuk menggerakkan motor servo. Raspberry Pi kemudian dapat memerintahkan motor servo menyesuaikan dengan posisi objek. Selain itu, Raspberry Pi juga dapat menyimpan data ke penyimpanan lokal untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 1. Diagram blok sistem.

Dalam penelitian ini, digunakan metode HSV, *thresholding*, dan *morphology* sebagai teknik pengolahan citra matahari. Fungsi dari *thresholding* adalah untuk mengisolasi area yang sesuai dengan karakteristik warna matahari. Fungsi dari morfologi adalah untuk menghilangkan derau (*noise*) dan meningkatkan kualitas mask dengan menghapus piksel yang tidak diinginkan pada video. Gambar 2 menunjukkan diagram alir dari proses pengenalan objek matahari dan penggerakkan motor servo dalam *solar tracker*.



Gambar 2. Diagram alir sistem *solar tracker*.

Pengambilan data dilakukan selama dua jam mulai pukul 09:16 WITA hingga 11:16 WITA. Data yang diambil berupa sudut pengukuran dari sensor MPU6050, nilai intensitas dari sensor GY302, sudut azimuth dan elevasi matahari dari aplikasi SunCalc Org. Data sudut dan nilai intensitas disimpan dalam penyimpanan lokal Raspberry Pi dengan format database (.db). Data tersebut kemudian dibaca melalui perangkat lunak SQLite.

Posisi matahari setiap waktu biasanya ditunjukkan dalam variabel azimuth dan elevasi yang merupakan variabel dari koordinat bola. Untuk mendapatkan posisi matahari pada koordinat kartesian dapat dilakukan transformasi koordinat bola ke koordinat kartesian. Posisi matahari pada koordinat kartesian dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$x = r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$y = r \cos(\theta) \cos(\phi) \dots\dots\dots(2)$$

$$z = r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \dots\dots\dots(3)$$

Dengan θ adalah sudut azimuth matahari, ϕ adalah sudut elevasi matahari, dan r adalah jarak matahari ke bumi.

Apabila panel surya akan diarahkan tepat pada arah azimuth matahari terbit, maka dapat dilakukan transformasi pada bidang kartesian terhadap sudut azimuth terbit. Persamaan untuk melakukan transformasi tersebut adalah sebagai berikut:

$$x' = x \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) + y \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \dots\dots\dots(4)$$

$$y' = y \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) - x \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \dots\dots\dots(5)$$

$$z' = z \dots\dots\dots(6)$$

Dengan θ_0 adalah azimuth matahari terbit. Untuk menghitung sudut kemiringan *single axis solar tracker* agar sudut kedatangan sinar tegak lurus, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{x'}{z'}\right) \dots\dots\dots(7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendeteksi posisi matahari dilangit dan mengurangi derau yang ada, maka digunakan metode HSV dan metode morfologi. Pada metode HSV, dilakukan pembatasan nilai HSV dari matahari. Hal ini dilakukan dengan mengambil sampel gambar matahari kemudian memanfaatkan perangkat lunak Paint untuk mendapatkan nilai HSV yang dihasilkan. Untuk memudahkan deteksi matahari, program diberi batasan radius dalam piksel dengan rentang 100 hingga 200 piksel. Jika dalam rentang tersebut terdapat objek yang sesuai dengan nilai HSV yang telah ditentukan, maka akan muncul lingkaran hijau yang menandakan matahari terdeteksi. Percobaan dilakukan di Balikpapan, Kalimantan Timur dengan suhu permukaan rata-rata 32°C.

Program telah berhasil mendeteksi matahari bahkan pada kondisi berawan. Tabel 1 menunjukkan hasil pendeteksian matahari pada kondisi cerah dan berawan. Pada gambar pertama, terlihat bahwa di sekitar matahari terdapat awan altokumulus, namun awan tersebut tidak menutupi matahari. Pada gambar kedua, pendeteksian tetap berhasil meskipun terdapat tutupan awan jenis kumulus. Sementara pada gambar ketiga, pendeteksian matahari tidak terjadi karena tutupan awan jenis kumulus yang cukup tebal [17].

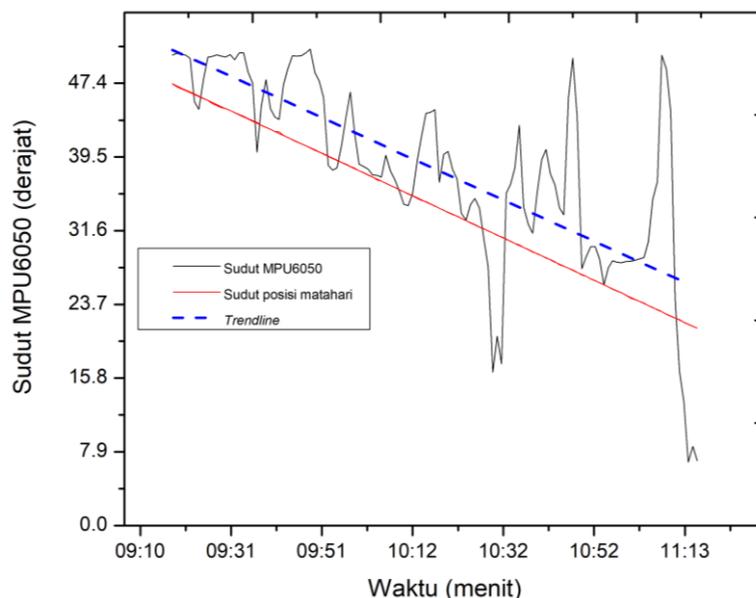
Tabel 1. Hasil pengujian kondisi pendeteksian matahari

| Keadaan matahari | Keterangan |
|--|---|
|  | <p>Hasil pendeteksian matahari pada kondisi tanpa tutupan awan. Total HSV pada <i>frame</i> tersebut adalah 218°, 36.6%, 52.5%.</p> |
|  | <p>Hasil pendeteksian matahari pada kondisi tutupan awan ringan. Total HSV pada <i>frame</i> tersebut adalah 210°, 58.9%, 59.2%.</p> |
|  | <p>Pada kondisi tutupan awan tebal, matahari tidak berhasil dideteksi. Total HSV pada <i>frame</i> tersebut adalah 200°, 4.0%, 88.6%.</p> |

Akurasi *solar tracker* dapat ditentukan dengan membandingkan hasil pengukuran sudut *solar tracker* yang terbaca oleh sensor MPU-6050 dengan sudut kemiringan berdasarkan perhitungan dari Pers (1) hingga Pers. (7) terhadap posisi matahari. Grafik hitam pada Gambar 3 menunjukkan perubahan sudut dari MPU-6050 yang tidak beraturan disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah kondisi tutupan awan yang menghalangi sinar matahari serta kemampuan *solar tracker* untuk kembali pada posisi seharusnya mengikuti posisi matahari hingga pada posisi stabil. Akan tetapi dilihat dari linearitas dari sudut yang dibentuk oleh MPU-6050 pada *trendline* berwarna biru, pola yang dibentuk masih terlihat mirip dengan hasil perhitungan.

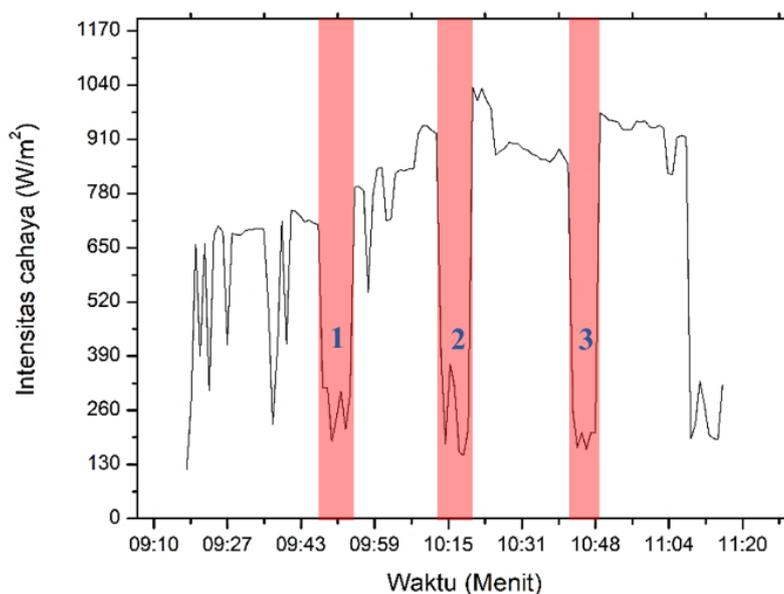
Tabel 2. Perbandingan *trendline* hasil pengukuran sensor kemiringan MPU-6050 dengan sudut posisi matahari.

| Trendline grafik sudut | Parameter | Nilai |
|---|------------------|--------------|
| Pengukuran MPU-6050 | <i>Intercept</i> | 171.5816 |
| | <i>Slope</i> | -311.24108 |
| | <i>R-square</i> | 0.53826 |
| Perhitungan berdasarkan posisi matahari | <i>Intercept</i> | 171.3029 |
| | <i>Slope</i> | -319.89455 |
| | <i>R-square</i> | 0.99997 |



Gambar 3. Hasil pengukuran tingkat akurasi *solar tracker* menggunakan sensor kemiringan MPU-6050 terhadap sudut posisi matahari.

Tabel 2 menunjukkan parameter *trendline* linier yang didapatkan dari grafik sudut pengukuran MPU-6050 dan sudut hasil perhitungan posisi matahari. Parameter intercept dan slope antara pengukuran dan perhitungan tidak jauh berbeda, mengartikan bahwa selama percobaan *solar tracker* dapat mengikuti arah matahari selama waktu percobaan dengan baik. Sedikit perbedaan antara slope menunjukkan kemungkinan adanya deviasi dari peletakan *solar tracker* pada arah azimut terbit serta jalur pergerakan matahari. Nilai R-square yang tinggi menunjukkan tingkat fluktuasi pada *solar tracker* yang cukup besar selama percobaan. Terdapat perbedaan rata-rata sekitar 3.99° selama percobaan antara *trendline* yang dibentuk oleh MPU-6050 dengan hasil perhitungan.

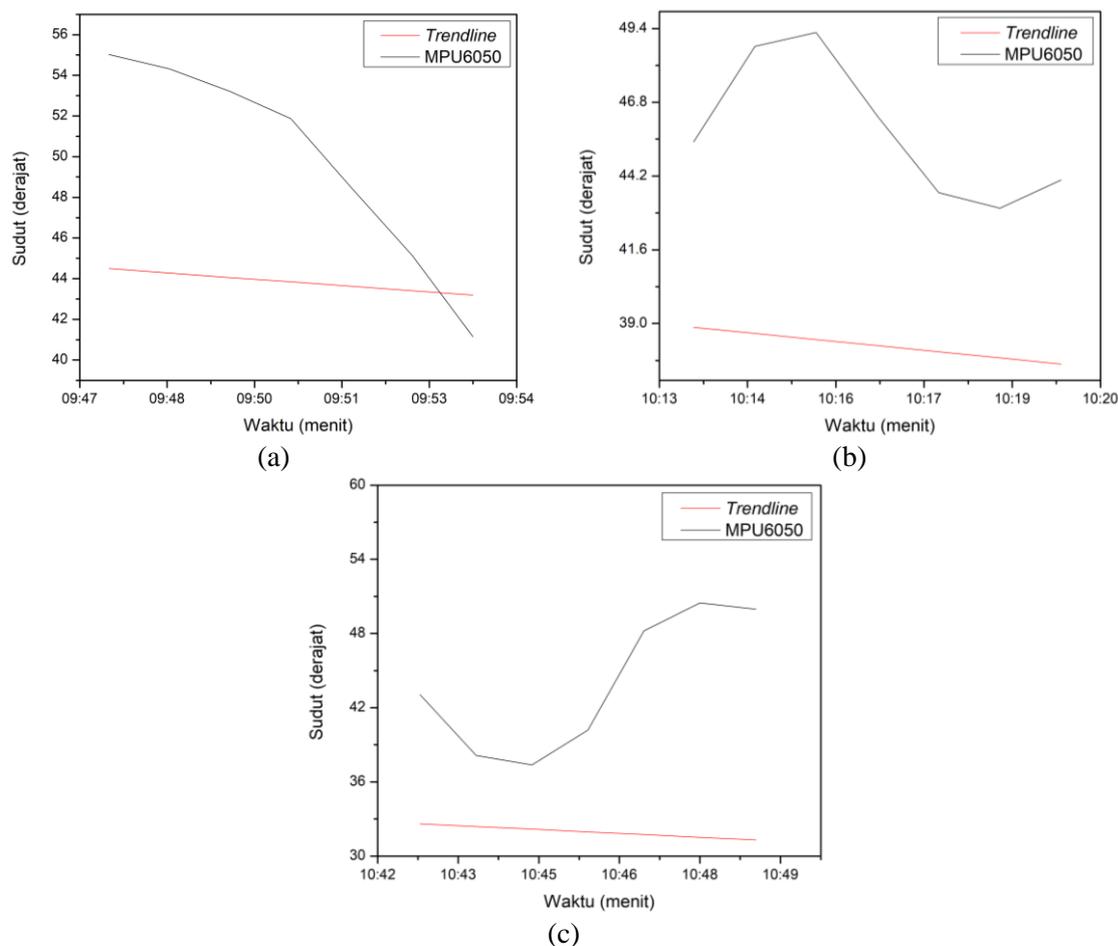


Gambar 4. Grafik perubahan intensitas cahaya (W/m^2) terhadap waktu (menit)

Nilai intensitas cahaya matahari (W/m^2) selama percobaan dibaca oleh sensor cahaya GY-302 guna mengetahui kondisi saat terjadinya tutupan awan. Terdapat tiga kondisi tutupan awan tebal dengan rentang waktu tertentu seperti terlihat pada Gambar 4 yang ditandai dengan

warna merah. Tutupan awan dapat mempengaruhi pengukuran sudut sensor kemiringan MPU-6050. Kamera akan berusaha mencari radius terbesar cahaya matahari dengan batasan yang diberikan sekitar 100 hingga 200 piksel. Selain itu, kondisi terjadinya efek penumbra atau bayangan parsial juga menyebabkan kesalahan dalam pembacaan pada kamera untuk pengenalan objek. Efek penumbra dapat menyebabkan daerah di bawah awan menerima cahaya yang lebih redup tetapi tidak sepenuhnya gelap, karena sebagian cahaya masih menerobos tepi dan celah awan tersebut [18]. Pengaruh faktor eksternal lain seperti fluktuasi temperatur akibat intensitas matahari yang berubah-ubah dapat berpengaruh pada sensitivitas GY-302.

Tutupan awan dapat membatasi kemampuan *solar tracker* berbasis proses pengolahan citra digital. Kemampuan *solar tracker* untuk menyesuaikan posisi matahari sebenarnya pada saat terjadi tutupan awan merupakan hal krusial. Dari tiga kondisi tutupan awan yang ditunjukkan pada Gambar 4, kondisi perubahan sudut dari *solar tracker* terhadap *trendline* dari hasil regresi dapat dilihat pada Gambar 5. Diantara ketiga momen tutupan awan, hanya momen pertama pada Gambar 5(a) yang secara gradual menurunkan sudut pembacaan MPU-6050. Hal ini disebabkan adanya pendeteksian objek matahari akibat terjadinya tutupan parsial awan kumulus, sehingga lokasi matahari tidak sesuai dengan posisi sebenarnya. Sementara pada momen tutupan lainnya, terdapat ketidakstabilan pembacaan sudut akibat pendeteksian secara acak yang disebabkan tutupan awan kumulus lebih besar. Hal ini selaras dengan nilai galat sudut hasil pengukuran MPU-6050 terhadap sudut hasil perhitungan posisi matahari yang dirangkum pada Tabel 4, dimana pada momen pertama galat yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan yang lain.



Gambar 5. Grafik sudut pengukuran MPU-6050 terhadap *trendline*.

Pada percobaan yang dilakukan, lama tutupan awan selama 6 menit masih dapat membalikkan kondisi *solar tracker* pada posisi yang baik terhadap matahari. Apabila terjadi tutupan awan yang lebih panjang, kemungkinan matahari tidak berada pada *frame* sehingga tidak dapat mendeteksi kembali. Perlu adanya lanjutan proses pengenalan objek awan dan matahari agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Tabel 3. Galat kemiringan *solar tracker* terhadap perhitungan pada momen tiga tutupan awan

| | Kondisi | | |
|---------------------------|---------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Lama tutupan awan (menit) | 6 | 6 | 6 |
| Galat maksimum (%) | 36,08 | 42,01 | 97,59 |
| Galat minimum (%) | 7,00 | 20,10 | 34,27 |
| Rata-rata (%) | 24,32 | 33,44 | 59,31 |

KESIMPULAN

Sistem *single-axis solar tracker* menggunakan Raspberry Pi dan kamera telah berhasil diimplementasikan. Pengujian dilakukan selama 2 jam dengan suhu rata-rata 32°C dan kondisi berawan dengan metode HSV. Akurasi kemiringan sistem *solar tracker* memiliki galat rata-rata sebesar 3.99° terhadap sudut posisi matahari. Hasil regresi linier dari grafik sudut kemiringan *solar tracker* menunjukkan nilai *intercept* dan *slope* yang hampir mirip dengan grafik posisi matahari, sehingga *solar tracker* dapat mengikuti posisi matahari sesuai dengan arah perubahannya. Dari tiga momen tutupan awan yang terjadi saat percobaan, momen tutupan awan pertama masih dapat mendeteksi matahari meskipun adanya efek penumbra sehingga objek matahari masih dapat dideteksi meskipun tidak berada pada posisi yang seharusnya. Momen tutupan awan yang disebabkan oleh awan kumululus selama 6 menit rata-rata masih dapat membuat *solar tracker* mendeteksi matahari pada posisi matahari yang seharusnya. Untuk pengembangan selanjutnya perlu dilakukan observasi lebih lanjut pada momen tutupan awan yang lebih lama terkait dengan kemampuan pendeteksian sistem *solar tracker*. Selain itu, perlu dilakukan pengujian jika cuaca gerimis atau hujan untuk dapat melihat rentang HSV kemudian dibandingkan dengan cuaca cerah agar mendapatkan komposisi HSV yang optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Institut Teknologi Kalimantan yang telah memberikan pendanaan untuk melakukan penelitian ini. Terima kasih juga kepada seluruh pihak yang telah membantu selama penelitian ini dilakukan serta pada saat penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. R. Al Hakim, Y. Z. Arief, A. Pangestu, dan A. Jaenul, "Perancangan Media Interaktif Energi Baru Terbarukan Berbasis Android," *Semin. Nas. Has. Ris. dan Pengabd. Ke-III (SNHRP-III 2021)*, hal. 144–150, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://snhrp.unipasby.ac.id/prosiding/index.php/snhrp/article/view/182>
- [2] IEA, "Renewables 2022, Analysis and forecast to 2027," *Int. Energy Agency*, hal. 158, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>; License: CC BY 4.0
- [3] S. Refly, H. Arief Kusuma, J. Teknik Elektro, F. Teknik, U. Maritim Raja Ali Haji, dan J. Politeknik Senggarang, "Jurnal Sustainable: Jurnal Hasil Penelitian dan Industri Terapan Analisis Konsumsi dan Fluktuasi Arus dan Daya pada Mikrokontroler

- Menggunakan Sensor INA219,” vol. 11, no. 01, hal. 44–48, 2022, doi: 10.31629/sustainable.v11i1.4610.
- [4] J. Rezkyanzah, L. P. Purba, dan C. A. Putra, “Perancangan *Solar tracker* Berbasis Arduino Sebagai Penunjang Sistem Kerja Solar Cell Dalam Penyerapan Energi Matahari,” *SCAN-Jurnal Teknol. Inf. dan Komun.*, vol. 11, no. 2, hal. 55–60, 2016.
- [5] Agus Suryanto, Noor Hudallah, Tatyantoro Andrasto, Cahyo Fajar Adhiningtyas, dan Seftriana Anifa Khusniasari, “Optimalisasi Keluaran Panel Surya Menggunakan *Solar tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 10, no. 3, hal. 282–290, 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i3.1142.
- [6] R. Fernandes dan M. Yuhendri, “Implementasi *Solar tracker* Tanpa Sensor pada Panel Surya,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, hal. 337–343, 2020.
- [7] M. Usman, “Analisis Intensitas Cahaya Terhadap Energi Listrik Yang Dihasilkan Panel Surya,” *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 9, no. 2, hal. 52–57, 2020, doi: 10.30591/polektr.v9i2.2047.
- [8] - Suwarti, “Analisis Pengaruh Intensitas Matahari, Suhu Permukaan & Sudut Pengarah Terhadap Kinerja Panel Surya,” *Eksergi*, vol. 14, no. 3, hal. 78, 2019, doi: 10.32497/eksergi.v14i3.1373.
- [9] S. A. Kurniawan dan M. Taufik, “Rancang Bangun *Solar tracker* Sumbu Tunggal Berbasis Motor Stepper Dan Real Time Clock,” *J. Ilm. Teknol. dan Rekayasa*, vol. 26, no. 1, hal. 1–12, 2021, doi: 10.35760/tr.2021.v26i1.3685.
- [10] R. Syafrialdi, “Rancang Bangun *Solar tracker* Berbasis Mikrokontroler ATmega8535 dengan Sensor LDR dan Penampil LCD,” *J. Fis. Unand*, vol. 4, no. 2, hal. 113–122, 2015.
- [11] F. Wahab, “Rancang bangun penjejak posisi matahari menggunakan kamera dan single board computer,” *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 1, no. 1, hal. 43–50, 2021, doi: 10.35313/jitel.v1.i1.2021.43-50.
- [12] R. P. Saputra, “Desain dan Implementasi Algoritma Pelacakan Posisi Matahari Berdasarkan Pengolahan Citra Kamera,” no. August 2016, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.researchgate.net/publication/353840242>
- [13] D. Christian, D. Budhi Santoso, dan R. Rahmadewi, “Implementasi Digital Image Processing Sebagai Pendeteksi Posisi Matahari Pada Perancangan Dual Axis *Solar tracker*,” *Teknokom*, vol. 6, no. 2, hal. 116–122, 2023, doi: 10.31943/teknokom.v6i2.150.
- [14] A. Suryanto, N. Hudallah, T. Andrasto, C. F. Adhiningtyas, dan S. A. Khusniasari, “Dual-axis solar tracking system based on Raspberry Pi imaging,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 700, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/700/1/012016.
- [15] G. A. Pradipta dan P. D. Wulaning Ayu, “Perbandingan Segmentasi Citra Telur Ayam Menggunakan Metode Otsu Berdasarkan Perbedaan Ruang Warna Rgb Dan Hsv,” *JST (Jurnal Sains dan Teknol.)*, vol. 6, no. 1, hal. 136–147, 2017, doi: 10.23887/jst-undiksha.v6i1.9329.
- [16] C. A. A. K. d. R. P. S. Relin Pramudiya, "Analisis Gambar Menggunakan Metode Grayscale dan HSV (Hue, Saturation, Value)," *Just IT : Jurnal Sistem Informasi, Teknologi Informasi dan Komputer* , vol. 14, no. 3, pp. 160-233, 2024
- [17] R. A. Houze, “Types of clouds in earth’s atmosphere,” *Int. Geophys.*, vol. 104, hal. 3–23, 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-374266-7.00001-9.
- [18] Iswanudin, “Gerhana Bulan Penumbra 25 Maret 2024,” 2024. <https://www.bmkg.go.id/hilal-gerhana/?p=gerhana-bulan-penumbra-25-maret-2024&lang=ID> (diakses 15 Juni 2024).