

Analisis Kinerja Sistem Otomasi Panel Surya Berbasis LDR dan Servo Motor untuk Meningkatkan Efisiensi Penyerapan Cahaya

Performance Analysis of Solar Panel Automation System Based on LDR and Servo Motor to Increase Light Absorption Efficiency

Yogi Febriano Damanik*, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Agus Purwanto, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*e-mail: yogifebriano.2021@student.uny.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis kinerja sistem otomasi panel surya berbasis sensor *Light Dependent Resistor (LDR)* dan *servo motor* untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya matahari. Latar belakangnya adalah rendahnya efisiensi panel surya statis dalam mengikuti perubahan posisi matahari, sehingga sistem pelacak dua sumbu diharapkan mengoptimalkan produksi energi terbarukan di Indonesia. Penelitian dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Universitas Negeri Yogyakarta pada Februari–Mei 2025, meliputi tahap perancangan, implementasi, pengujian, dan evaluasi. Komponen utama adalah empat sensor *LDR* sebagai detektor cahaya, dua *servo motor* sebagai aktuator, dan mikrokontroler ESP-32 sebagai pengendali. Data sensor dikonversi via *ADC*, diolah oleh mikrokontroler, dan mengatur sudut servo secara presisi. Validitas instrumen diuji melalui pengukuran berulang dengan variasi arah cahaya, reliabilitas melalui kestabilan respon servo, serta analisis data kuantitatif menggunakan Excel. Hasil menunjukkan sistem mendeteksi intensitas cahaya dengan akurasi deviasi sudut 2° – 6° , waktu respon servo sekitar 200 ms, dan stabilitas posisi $\pm 1^{\circ}$. Temuan ini membuktikan efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Disarankan penggunaan sensor presisi tinggi dan algoritma kontrol lanjutan seperti *PID* untuk akurasi dan kehalusan gerakan yang lebih baik.

Kata Kunci: *ESP-32, LDR, servo motor, otomasi, Solar tracker*

Abstract. This research aims to design, implement, and analyze the performance of an automated solar panel system based on *Light Dependent Resistor (LDR)* sensors and *servo motors* to enhance the efficiency of sunlight absorption. The background is rooted in the low efficiency of static solar panels in tracking the changing position of the sun, with the dual-axis solar tracker system expected to optimize energy production and support renewable energy development in Indonesia. The research was conducted at the Electronics and Instrumentation Laboratory of Yogyakarta State University from February to May 2025, encompassing design, implementation, testing, and evaluation stages. The main components include four *LDR* sensors as light detectors, two *servo motors* as actuators, and an ESP-32 microcontroller as the primary controller. Sensor data are converted using *ADC*, processed by the microcontroller, and used to precisely

adjust the servo motor angles. Instrument validity was tested through repeated measurements with varying light directions, while system reliability was assessed via servo response stability. Data analysis was performed quantitatively using Excel. The results indicate that the system detects light intensity with an average angular deviation accuracy of 2°–6°, servo response time of approximately 200 ms, and position stability with minimal jitter of ±1°. These findings prove that the LDR- and servo-based automation system effectively improves solar panel sunlight absorption efficiency. It is recommended to use higher-precision sensors and advanced control algorithms such as PID to enhance accuracy and movement smoothness.

Keywords: ESP-32, LDR, servo motor, automation, Solar tracker

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak di kawasan tropis dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi sepanjang tahun. Potensi energi surya di Indonesia sangat besar, dengan rata-rata intensitas radiasi matahari mencapai 4,8 kWh/m² per hari (Widayana, 2012). Namun, pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik masih rendah dibandingkan potensinya, terutama karena efisiensi konversi energi yang belum optimal pada panel surya statis yang tidak mengikuti pergerakan matahari. Dibandingkan dengan negara maju seperti Tiongkok, Jepang, dan Amerika Serikat, Indonesia tertinggal dalam pemanfaatan energi terbarukan, dipengaruhi oleh faktor kebijakan, investasi, teknologi, dan kesadaran masyarakat.

Kemajuan teknologi memungkinkan pengembangan sistem otomasi seperti *solar tracker* untuk memaksimalkan penyerapan cahaya matahari. Panel surya statis mengalami penurunan efisiensi karena sudut datang sinar matahari yang tidak optimal sepanjang hari. Solusi inovatif adalah sistem pelacak matahari, terutama pelacak dua sumbu yang menyesuaikan posisi panel secara horizontal dan vertikal, menggunakan sensor *Light Dependent Resistor (LDR)* untuk mendeteksi intensitas cahaya dan *servo motor* sebagai penggerak presisi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja sistem otomasi panel surya berbasis *LDR* dan *servo motor* dalam meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Manfaatnya meliputi peningkatan efisiensi pemanfaatan energi surya, akses energi listrik bagi daerah terpencil, dan pengembangan industri energi surya nasional. Penelitian ini diharapkan memberikan solusi efektif untuk mendukung energi terbarukan di Indonesia, baik skala rumah tangga maupun industri kecil, serta menjadi referensi bagi pengembangan teknologi *solar tracker* yang lebih cerdas dan hemat energi di masa depan.

METODE

Jenis atau Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental, bertujuan untuk mengimplementasikan dan menguji efektivitas *solar tracker* menggunakan sensor *LDR* dan ESP-32.

Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan melalui pengujian *prototype* di kamar kos penulis, Padukuhan Karanggayam, Sleman, Yogyakarta. Sistem dirakit menggunakan sensor *LDR*, *ESP-32*, dan *Servo Motor*. Pengujian dilakukan menggunakan lilin sebagai sumber cahaya. Sumber digerakan di sekitar sensor untuk menguji pergerakan *servo motor*.

Proses pengujian dimulai dengan pengukuran intensitas cahaya pada sensor *LDR*. Sensor *LDR* mengukur intensitas cahaya secara kontinu dan mengubah data tersebut menjadi sinyal listrik. Sinyal dari sensor dikirim ke *microcontroller* untuk diproses. *Microcontroller* mengolah sinyal digital yang masuk untuk mengendalikan sistem gerak sesuai program. Jika sinyal digital dari *LDR* dikirim menuju *microcontroller*, maka *microcontroller* akan merespon dan memberikan sinyal kepada *servo motor* untuk mengikuti arah cahaya sesuai sudut yang diperintah. *Servo motor* akan bergerak sesuai dengan sinyal yang diberikan oleh sensor ke *microcontroller* agar bergerak mengikuti pergerakan sumber cahaya.

Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dibagi ke dalam beberapa fokus yang berhubungan dengan kinerja dari setiap komponen alat. Dilakukan pengujian terhadap nilai sensor, pergerakan *servo*, stabilitas sistem dan akurasi *servo*. Tujuan dilakukan pengujian alat ini untuk mengetahui bagaimana sistem bekerja dan efektivitas alat.

Pengujian Terhadap Nilai Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan bahwa setiap *LDR* dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya dengan baik sesuai posisinya. Metode pengujian dilakukan dengan mengarahkan cahaya dari empat arah utama, yaitu atas, bawah, kiri, dan kanan. Dalam kondisi awal, sensor diletakkan pada ruangan gelap agar tidak ada gangguan cahaya luar. Selanjutnya, cahaya diarahkan secara bergantian dari setiap sisi, kemudian nilai sensor direkam menggunakan *data streamer* secara *real-time*.

Pengujian Gerak Servo

Pengujian respon *servo motor* diambil berdasarkan perhitungan dari data penerimaan sumber cahaya dari data sebelumnya. Dilakukan perhitungan dengan:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_t &= \frac{LT + RT}{2} \text{ (Rata - rata nilai tegangan atas)} \\ \tilde{V}_d &= \frac{LD + RD}{2} \text{ (Rata - rata nilai tegangan bawah)} \\ \tilde{V}_l &= \frac{LT + LD}{2} \text{ (Rata - rata nilai tegangan kiri)} \\ \tilde{V}_r &= \frac{RT + RD}{2} \text{ (Rata - rata nilai tegangan kanan)}\end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan pergerakan vertikal atau horizontal dengan cara:

$$dvert = \tilde{V}_t - \tilde{V}_d (\text{Selisih nilai tegangan gerakan vertikal})$$
$$dhorz = \tilde{V}_l - \tilde{V}_r (\text{Selisih nilai tegangan gerakan horizontal})$$

Penentuan arah dapat ditentukan berdasarkan perhitungan di atas. Pada pergerakan vertikal, bila didapatkan $dvert (+)$ maka $\tilde{V}_t > \tilde{V}_d$ berarti cahaya lebih terang di atas panel. Servo vertikal akan bergerak miring ke atas dengan tujuan menangkap lebih banyak cahaya dari sumber atas hingga stabil ($dvert=0$). Jika $dvert (-)$ maka $\tilde{V}_t < \tilde{V}_d$ berarti cahaya lebih terang di bawah panel. Servo vertikal akan bergerak miring ke bawah dengan tujuan menangkap lebih banyak cahaya dari sumber bawah hingga stabil ($dvert=0$). Pada pergerakan horizontal, bila mendapatkan $dhoriz (+)$ maka $\tilde{V}_l > \tilde{V}_r$ berarti cahaya lebih terang di kiri panel. Servo horizontal akan bergerak miring ke kiri dengan tujuan menangkap lebih banyak cahaya dari sumber kiri hingga stabil ($dhorz=0$). Jika $dhorz (-)$ maka $\tilde{V}_l < \tilde{V}_r$ berarti cahaya lebih terang di kanan panel. Servo horizontal akan bergerak miring ke kanan dengan tujuan menangkap lebih banyak cahaya dari sumber kanan hingga stabil ($dhorz=0$).

Pengujian Stabilitas Sistem

Pengujian stabilitas bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan posisi *servo* saat kondisi pencahayaan tetap, serta menghindari gerakan *servo* yang tidak perlu, seperti *jitter* (getaran kecil bolak-balik) atau *overshoot* (gerakan berlebihan melebihi titik seharusnya). Pengujian dilakukan dalam ruangan dengan sumber cahaya yang tetap. Pengujian dilakukan dalam waktu lima menit pengamatan.

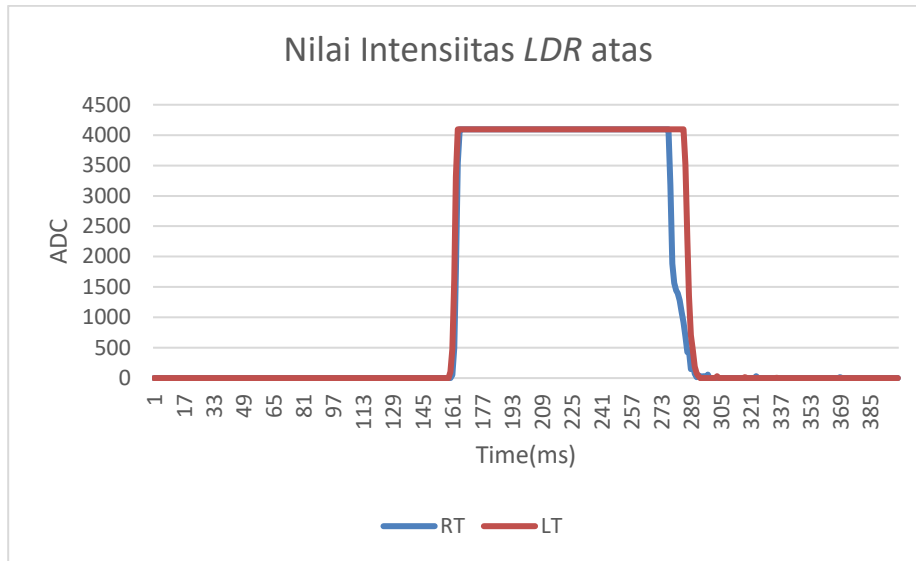
Akurasi Deteksi Cahaya

Pengujian akurasi deteksi arah cahaya bertujuan untuk mengetahui seberapa tepat sistem dalam mengidentifikasi sumber cahaya utama dan menggerakkan panel (*servo*) menuju arah yang paling terang. Hal ini penting untuk memastikan efektivitas sistem dalam mengoptimalkan penyerapan cahaya. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan sumber cahaya yang diarahkan dari sudut tertentu. Kemudian mencatat arah aktual *servo* secara manual pada posisi akhir *servo*.

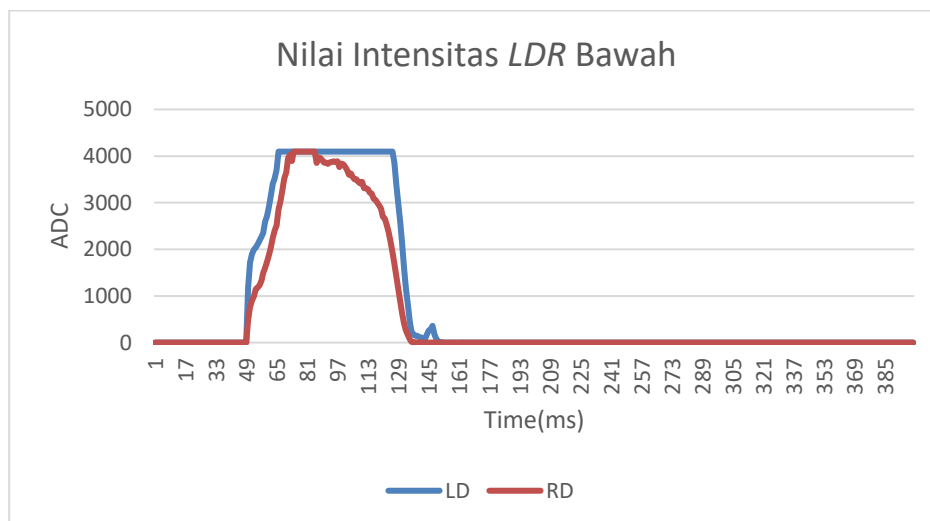
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Terhadap Nilai Sensor

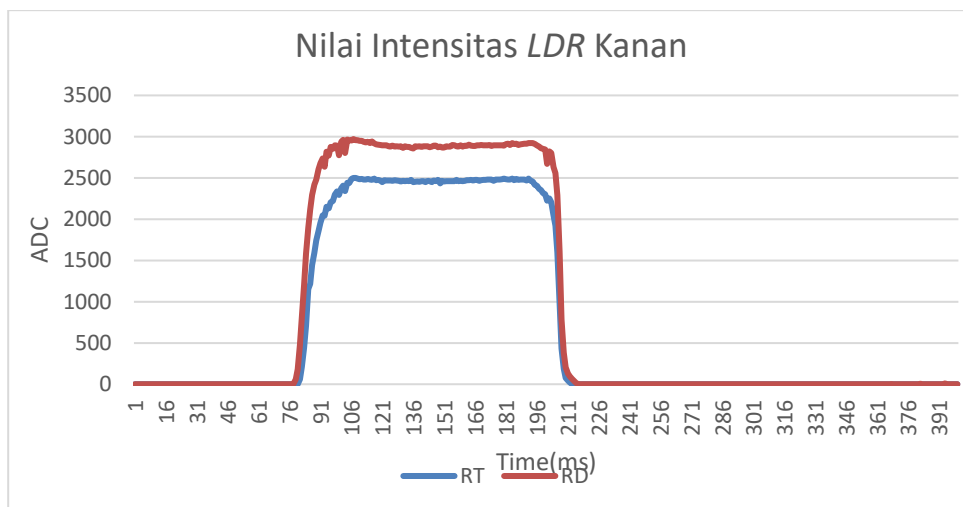
Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan bahwa setiap *LDR* dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya dengan baik sesuai posisinya. Hasil pengujian disajikan dalam Gambar 1 sampai Gambar 4.



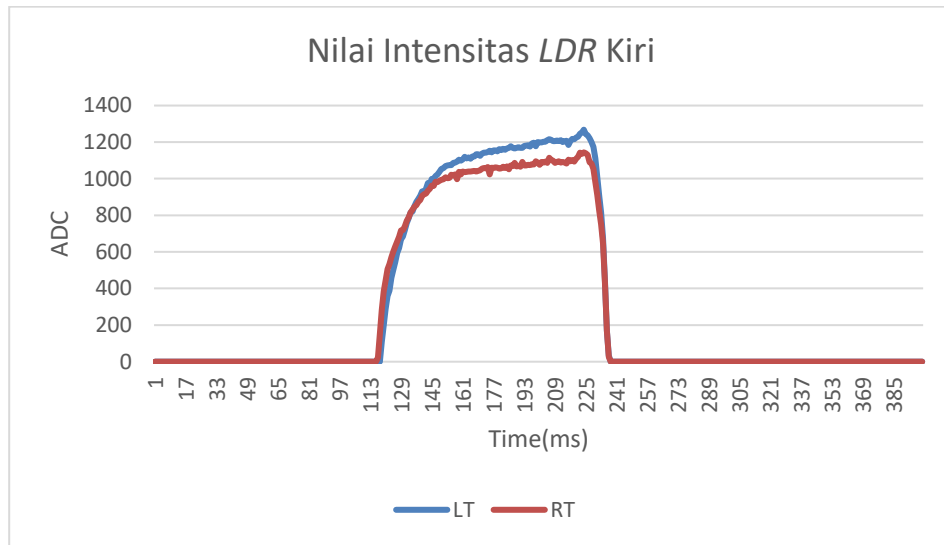
Gambar 1. Nilai Intensiitas *LDR* Atas



Gambar 2. Nilai Intensiitas *LDR* Bawah



Gambar 3. Nilai Intensiitas *LDR* Kanan

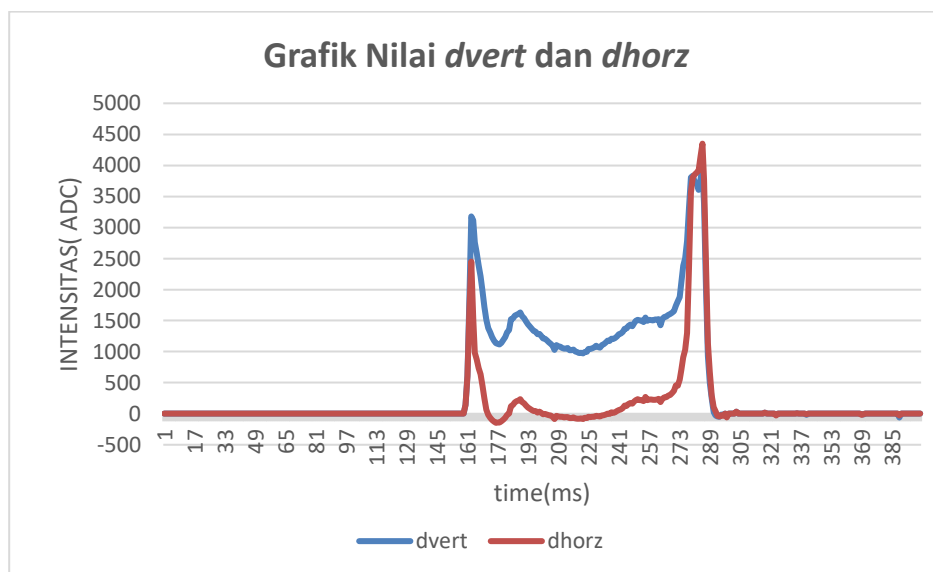


Gambar 4. Nilai Intensitas *LDR* Kiri

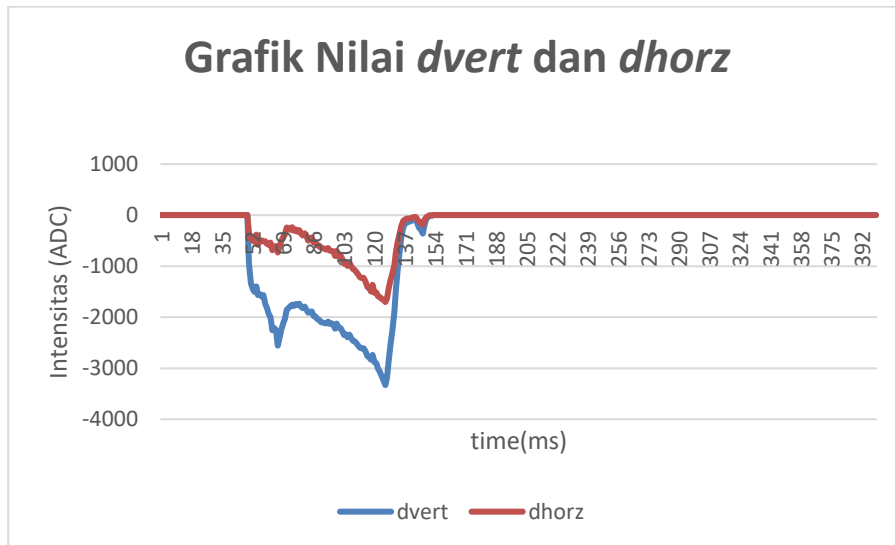
Berdasarkan data dari Gambar 1 sampai Gambar 4 sensor bekerja dengan baik. Nilai sinyal digital dari *LDR* menunjukkan pola yang konsisten: semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, semakin besar pula nilai *ADC* yang terbaca. Hal ini menegaskan prinsip dasar *LDR* sebagai sensor cahaya yang resistansinya menurun seiring bertambahnya intensitas cahaya.

Pengujian Gerak Servo

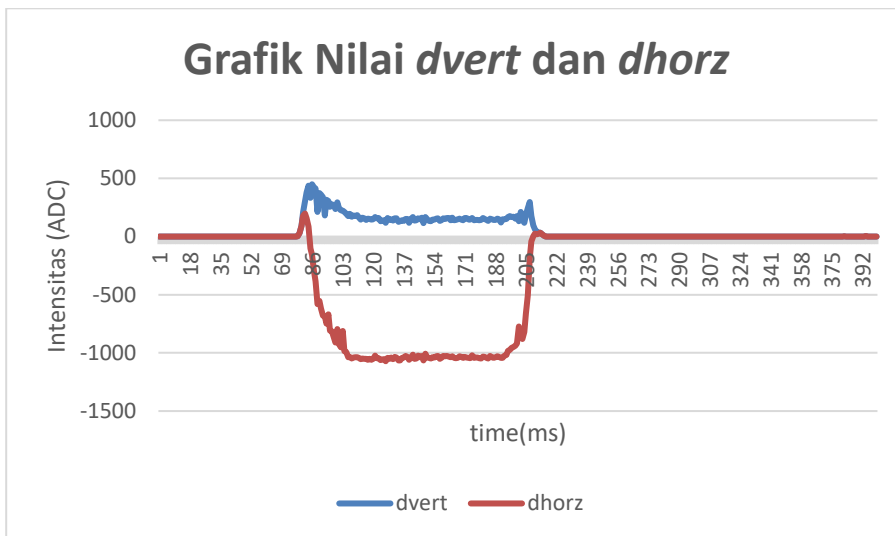
Pada pengujian respon *servo motor*, pergerakan ditentukan berdasarkan perhitungan selisih nilai tegangan dari data penerimaan sumber cahaya oleh sensor, yaitu *dvert* untuk arah vertikal dan *dhorz* untuk arah horizontal. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 5 sampai Gambar 8



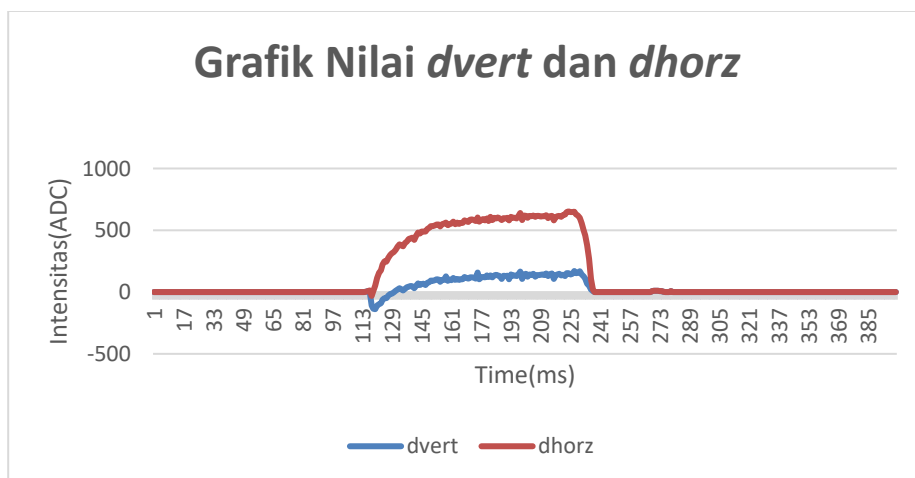
Gambar 5. Pergerakan atas



Gambar 6. Pergerakan Bawah



Gambar 7. Pergerakan Kanan

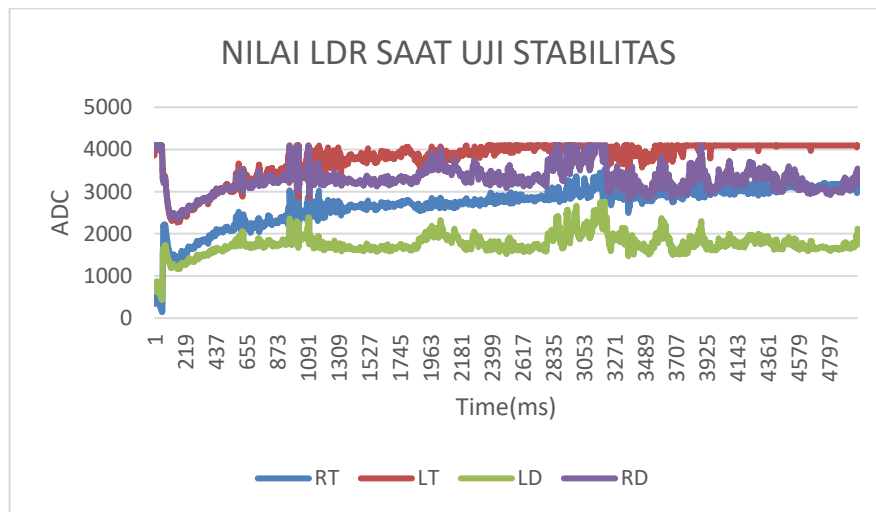


Gambar 8. Pergerakan Kiri

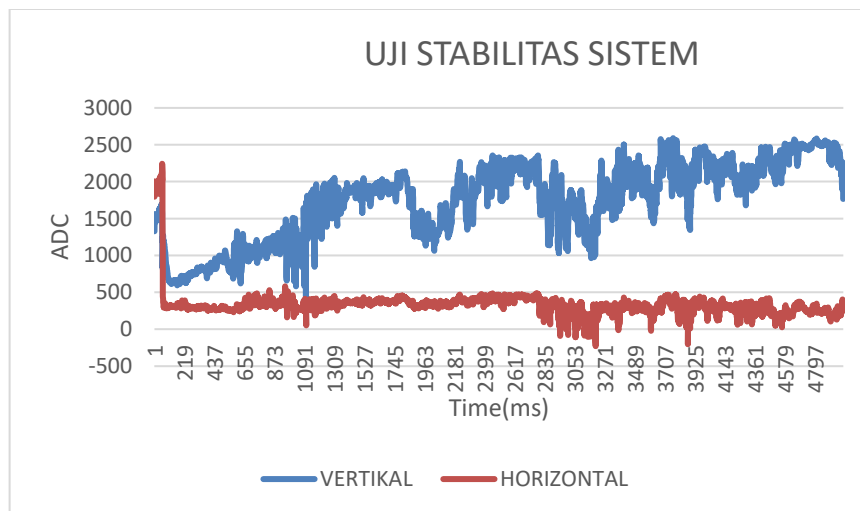
Pada Gambar 5 sampai Gambar 8, *servo* bergerak dengan baik sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Hasil pengujian respon *servo* menunjukkan bahwa *servo* horizontal bergerak berdasarkan selisih nilai antara sensor kiri (\tilde{V}_l) dan kanan (\tilde{V}_r). Secara spesifik, jika $dhorz$ (+) yang berarti $\tilde{V}_l > \tilde{V}_r$ (cahaya lebih terang di kiri panel), *servo* horizontal akan bergerak miring ke kiri untuk menangkap lebih banyak cahaya dari sumber kiri hingga mencapai kondisi stabil ($dhorz = 0$). Sebaliknya, jika $dhorz$ (-) yang berarti $\tilde{V}_l < \tilde{V}_r$ (cahaya lebih terang di kanan panel), *servo* horizontal akan bergerak miring ke kanan hingga stabil ($dhorz = 0$).

Pengujian Stabilitas Sistem

Pengujian stabilitas bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan posisi servo saat kondisi pencahayaan tetap, serta menghindari gerakan servo yang tidak perlu. Hasil pengujian akan disajikan pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Uji Stabilitas Berdasarkan Nilai LDR



Gambar 10. Uji Stabilitas Berdasarkan Pengujian Arah

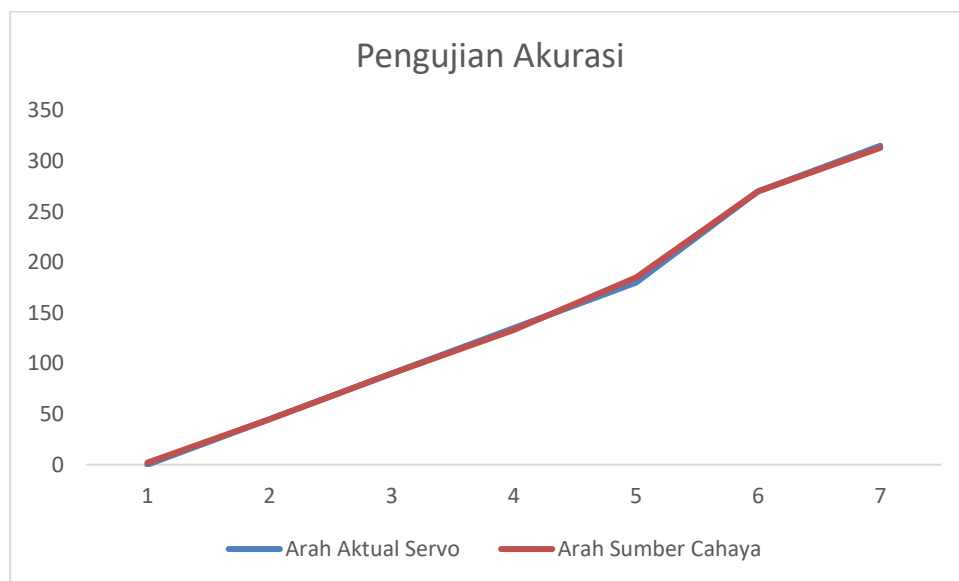
Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa servo mampu mempertahankan posisinya ketika cahaya tetap. Adanya *jitter* kecil kemungkinan disebabkan oleh *noise* pembacaan *ADC LDR* atau fluktuasi cahaya sekitar. Namun, penggunaan *threshold* dalam logika program sudah cukup efektif untuk mengurangi respon tidak perlu.

Akurasi Deteksi Cahaya

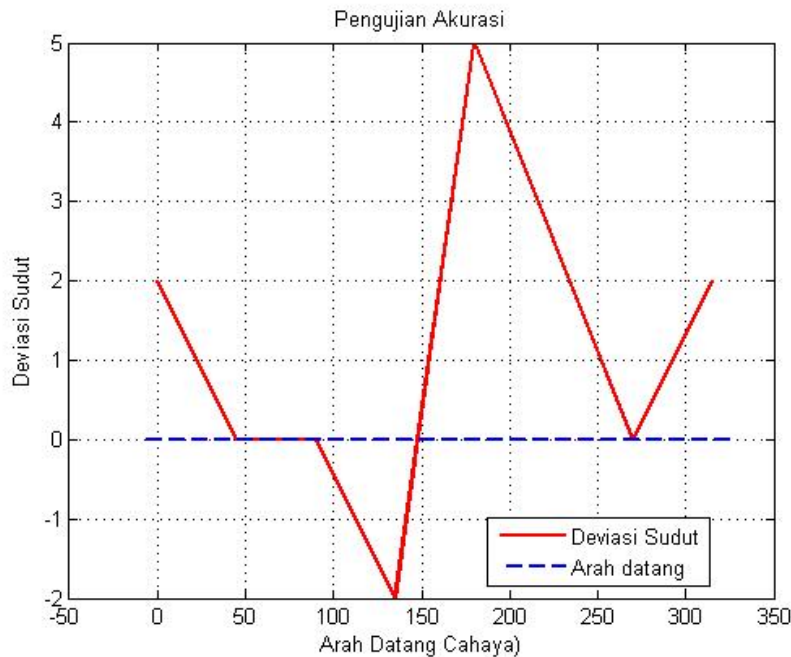
Pengujian akurasi deteksi arah cahaya bertujuan untuk mengetahui seberapa tepat sistem dalam mengidentifikasi sumber cahaya utama dan menggerakkan panel (*servo*) menuju arah yang paling terang. Hal ini penting untuk memastikan efektivitas sistem dalam mengoptimalkan penyerapan cahaya. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 1, Gambar 11, dan Gambar 12.

Tabel 1. Uji akurasi deteksi arah cahaya

UJI KE	ARAH DATANG CAHAYA	SUDUT <i>SERVO</i>	DEVIASI SUDUT
1	0	2	2
2	45	45	0
3	90	90	0
4	135	133	2
5	180	185	5
6	270	270	0
7	315	313	2



Gambar 11. Perbandingan Arah Aktual Servo dan Sumber Cahaya



Gambar 12. Perbandingan Arah Datang Cahaya dan Deviasi Sudut

Hasil pengujian akurasi menunjukkan bahwa rata-rata deviasi sudut antara arah datangnya cahaya dengan posisi servo hanya sekitar 2° . Nilai ini masih cukup baik untuk memastikan panel menghadap ke arah cahaya utama. Deviasi yang lebih besar ditemukan pada arah diagonal belakang, yang kemungkinan dipengaruhi oleh keterbatasan sudut pandang sensor.

PEMBAHASAN

Pembahasan ini menganalisis kinerja sistem pelacak cahaya berdasarkan pengujian sensor *LDR*, gerak servo, stabilitas sistem, dan akurasi deteksi arah. Data menunjukkan sistem berfungsi efektif dalam mengoptimalkan penyerapan cahaya, dengan kekuatan pada respons *real-time* dan stabilitas, namun ada keterbatasan seperti *jitter* kecil dan deviasi pada arah tertentu.

Pengujian sensor dilakukan dengan melakukan pengambilan data pada empat sensor. Empat sampel ini ditentukan dengan mengambil data *LDR* berdasarkan arah geraknya. Sampelnya berupa arah yang ditentukan yaitu dari atas, bawah, kiri, dan kanan. Pengambilan data dilakukan dalam keadaan gelap dan sensor dalam keadaan diam. Kemudian cahaya diarahkan dari arah sampel yang ditentukan dan dilakukan *data streamer* secara *real time*. Berdasarkan data dari Gambar 1 sampai 4 sensor bekerja dengan baik. Nilai sinyal digital dari *LDR* menunjukkan pola yang konsisten: semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, semakin besar pula nilai *ADC* yang terbaca. Hal ini menegaskan prinsip dasar *LDR* sebagai sensor cahaya yang resistansinya menurun seiring bertambahnya intensitas cahaya.

Pada pengujian respon *servo motor*, pergerakan ditentukan berdasarkan perhitungan selisih nilai tegangan dari data penerimaan sumber cahaya oleh sensor, yaitu *dvert* untuk arah vertikal dan *dhorz* untuk arah horizontal. Pada Gambar 5 sampai 8, servo

bergerak dengan baik sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Hasil pengujian respon servo menunjukkan bahwa servo horizontal bergerak berdasarkan selisih nilai antara sensor kiri ($\tilde{V}l$) dan kanan ($\tilde{V}r$). Secara spesifik, jika $dhorz$ (+) yang berarti $\tilde{V}l > \tilde{V}r$ (cahaya lebih terang di kiri panel), servo horizontal akan bergerak miring ke kiri untuk menangkap lebih banyak cahaya dari sumber kiri hingga mencapai kondisi stabil ($dhorz = 0$). Sebaliknya, jika $dhorz$ (-) yang berarti $\tilde{V}l < \tilde{V}r$ (cahaya lebih terang di kanan panel), servo horizontal akan bergerak miring ke kanan hingga stabil ($dhorz = 0$). Untuk servo vertikal, pergerakan mengikuti selisih nilai antara sensor atas ($\tilde{V}t$) dan bawah ($\tilde{V}d$). Jika $dvert$ (+) yang berarti $\tilde{V}t > \tilde{V}d$ (cahaya lebih terang di atas panel), servo vertikal akan bergerak miring ke atas untuk menangkap lebih banyak cahaya dari sumber atas hingga mencapai kondisi stabil ($dvert = 0$). Jika $dvert$ (-) yang berarti $\tilde{V}t < \tilde{V}d$ (cahaya lebih terang di bawah panel), servo vertikal akan bergerak miring ke bawah hingga stabil ($dvert = 0$). Grafik pergerakan servo menunjukkan kecenderungan bahwa panel selalu mengarah ke posisi dengan cahaya paling kuat, yang membuktikan bahwa servo bergerak secara efektif menuju sumber cahaya yang lebih terang untuk memaksimalkan penerimaan cahaya.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa servo mampu mempertahankan posisinya ketika cahaya tetap. Adanya *jitter* kecil kemungkinan disebabkan oleh *noise* pembacaan *ADC LDR* atau fluktuasi cahaya sekitar. Namun, penggunaan *threshold* dalam logika program sudah cukup efektif untuk mengurangi respon tidak perlu.

Hasil pengujian akurasi menunjukkan bahwa rata-rata deviasi sudut antara arahnya cahaya dengan posisi servo hanya sekitar 2° . Nilai ini masih cukup baik untuk memastikan panel menghadap ke arah cahaya utama. Deviasi yang lebih besar ditemukan pada arah diagonal belakang, yang kemungkinan dipengaruhi oleh keterbatasan sudut pandang sensor.

SIMPULAN

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pelacak cahaya berbasis *LDR* dan *servo motor* berfungsi efektif dalam mendeteksi, merespons, dan mengoptimalkan penyerapan cahaya. Sensor *LDR* responsif dan konsisten, gerakan servo akurat berdasarkan perhitungan selisih tegangan, sistem stabil dalam kondisi cahaya konstan, dan akurasi deteksi arah mencapai rata-rata deviasi 2° . Kekuatan utama adalah kemampuan *real-time* dan efisiensi energi, yang cocok untuk aplikasi seperti panel surya. Namun, keterbatasan seperti *jitter* kecil, deviasi pada arah belakang, dan sensitivitas terhadap *noise* eksternal perlu diatasi melalui pengembangan lebih lanjut, seperti penambahan filter atau kalibrasi. Dengan demikian, sistem ini memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan menjadi solusi praktis dalam bidang energi terbarukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan ini. Penghargaan khusus disampaikan kepada Bapak Agus Purwanto, M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas ilmu, arahan, dan motivasi yang diberikan selama proses ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada berbagai pihak lainnya yang turut berkontribusi namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Hayubi, R., Aulia, S., Gunawan, D. A., Hidayatullah, S., & Aribowo, D. (2024). Implementasi sistem penggerak servo SG 90 berbasis Arduino Uno dengan kontrol sudut dinamis. *Mars J. Tek. Mesin, Ind. Elektro dan Ilmu Komput*, 2(6), 130–140.
- Bindu, R., & Namboothiripad, M. K. (2012). Tuning of PID controller for DC *servo motor* using genetic algorithm. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(3), 310–314.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2011). *Electronic devices and circuit theory*. Pearson.
- Dadi, V., & Peravali, S. (2020). Optimization of light-dependent resistor sensor for the application of solar energy tracking system. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1499.
- Desmira, D. A., Priyogi, G., & Islam, S. (2022). Aplikasi sensor *LDR (light dependent resistor)* untuk efisiensi energi pada lampu penerangan jalan umum. *Jurnal PROSISKO*. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Rinaldy, R., Christianti, R. F., & Supriyadi, D. (2013). Pengendalian motor servo yang terintegrasi dengan webcam berbasis internet dan Arduino. *Jurnal Infotel*, 5(2), 17–23.
- Sasmoko, D. (2021). *Arduino dan sensor pada project Arduino DIY* (pp. 1–123). Penerbit Yayasan Prima Agus Teknik.
- Utama, D. W. (2007). Sistem kontrol pada modul aliran distribusi bahan baku dengan menggunakan programmable logic controller. In *Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI3)* (pp. 1–12).
- Widayana, G. (2012). Pemanfaatan energi surya. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 9(1).