

Implementasi Kendali PI pada *Single Axis Solar Tracker* untuk *Smart Lamp* Berbasis IoT

Ghifar Javad H Aziz^{1*}, David Naista²

^{1,2}Sistem Informasi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung, Indonesia

^{1*}ghifarjavad@radenintan.ac.id, ²davidnaista@radenintan.ac.id

Abstrak: Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif terus berkembang karena bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan. Namun, panel surya dengan posisi tetap memiliki keterbatasan dalam menyerap energi matahari secara optimal akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode Proportional-Integral (PI) pada Single Axis Solar Tracker (SAST) serta mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) untuk monitoring sistem secara real-time. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan memanfaatkan sensor LDR sebagai pendeteksi cahaya, Arduino Uno R4 WiFi sebagai pengendali utama, motor servo sebagai aktuator, sensor PZEM sebagai pemantau parameter kelistrikan, dan Firebase sebagai media pertukaran data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol PI mampu menghasilkan rise time sebesar 2,8913 detik, settling time sebesar 3,6686 detik, dan overshoot sebesar 0,4546%. Validasi sensor menunjukkan rata-rata error sebesar 1,96% pada sensor LDR dan 0,55% pada sensor PZEM. Selain itu, penerapan solar tracker menghasilkan total daya sebesar 92,94 W, lebih tinggi dibandingkan panel surya statis sebesar 77,75 W atau meningkat sebesar 19,54%. Sistem IoT juga mampu menampilkan data secara real-time pada aplikasi mobile dengan rata-rata delay komunikasi sebesar 1,33 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan perolehan daya panel surya serta mendukung monitoring parameter kelistrikan secara real-time melalui aplikasi mobile.

Kata Kunci: Kontrol PI; *Solar Tracker*; IoT; *Smart Lamp*; Single Axis Solar Tracker

Abstract: The utilization of solar energy as an alternative energy source continues to grow due to its environmentally friendly and sustainable nature. However, fixed-position solar panels have limitations in capturing solar energy optimally because of the sun's changing position throughout the day. This study aims to implement the Proportional-Integral (PI) method in a Single Axis Solar Tracker (SAST) and integrate Internet of Things (IoT) technology for real-time system monitoring. The research employed an experimental method using LDR sensors as light detectors, an Arduino Uno R4 WiFi as the main controller, a servo motor as the actuator, a PZEM sensor for electrical parameter monitoring, and Firebase as the data exchange platform. The test results showed that the PI controller achieved a rise time of 2.8913 seconds, a settling time of 3.6686 seconds, and an overshoot of 0.4546%. Sensor validation results indicated an average error of 1.96% for the LDR sensor and 0.55% for the PZEM sensor. Furthermore, the solar tracker generated a total power output of 92.94 W,

which was higher than the fixed solar panel output of 77.75 W, representing an increase of 19.54%. The IoT system successfully displayed real-time data on a mobile application with an average communication delay of 1.33 seconds. These results demonstrate that the developed system can improve solar power generation while providing real-time monitoring of electrical parameters through a mobile application.

Keywords: PI Controller; Solar Tracker; IoT; Smart Lamp;

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan energi terbarukan semakin berkembang seiring meningkatnya kebutuhan energi yang efisien dan ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan adalah energi matahari melalui penggunaan panel surya. Panel surya mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, termasuk sebagai sumber daya pada sistem lampu pintar [1][2].

Pada umumnya, panel surya dipasang pada posisi tetap sehingga kemampuan penyerapan energi matahari bergantung pada sudut datang sinar matahari. Perubahan posisi matahari sepanjang hari menyebabkan intensitas cahaya yang diterima panel surya tidak selalu optimal. Kondisi ini dapat mengurangi energi listrik yang dihasilkan dan berdampak pada kinerja sistem yang menggunakan sumber energi tersebut.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan sistem *Single Axis Solar Tracker* (SAST) yang memungkinkan panel surya bergerak mengikuti pergerakan matahari pada satu sumbu [3][4]. Dengan menyesuaikan posisi panel surya terhadap arah datangnya sinar matahari, energi yang diserap dapat ditingkatkan dibandingkan dengan panel surya yang dipasang secara statis. Peningkatan penyerapan energi ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya pada sistem yang digunakan.

Agar pergerakan *solar tracker* dapat mengikuti posisi matahari secara optimal, diperlukan suatu metode pengendalian yang mampu menghasilkan respons yang stabil dan akurat. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam sistem kendali adalah metode *Proportional-Integral* (PI). Metode PI mampu mengurangi kesalahan posisi dan meningkatkan kestabilan gerakan aktuator sehingga panel surya dapat bergerak mengikuti arah matahari dengan lebih tepat [5].

Selain peningkatan efisiensi energi, perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) juga membuka peluang untuk melakukan monitoring dan pengendalian perangkat secara jarak jauh [6][7]. Pada penelitian ini, teknologi IoT diterapkan pada sistem lampu pintar sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem serta mengontrol lampu melalui aplikasi *mobile*. Integrasi teknologi IoT dengan sistem solar tracker diharapkan dapat meningkatkan kemudahan penggunaan, efisiensi operasional, dan kemampuan monitoring secara *real-time*.

Sebagai landasan dalam pengembangan penelitian ini, telah dilakukan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan yaitu oleh Ghifar Javad H Aziz dan Arnando Fajar Shiddiq tahun 2023 melakukan penelitian implementasi metode *proportional-integral* (pi) pada *single axis solar tracker* untuk lampu taman [8]. Meskipun penelitian sebelumnya telah berhasil menerapkan metode PI pada *Single Axis Solar Tracker* untuk meningkatkan penyerapan energi matahari, sistem yang dikembangkan masih memiliki keterbatasan dalam aspek monitoring dan monitoring jarak jauh. Informasi mengenai kondisi sistem hanya dapat diperoleh secara langsung di lokasi, sehingga kurang efisien dalam proses pemantauan dan pemeliharaan. Oleh karena itu, pada penelitian ini ditambahkan teknologi *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem melalui aplikasi *mobile* secara *real-time*.

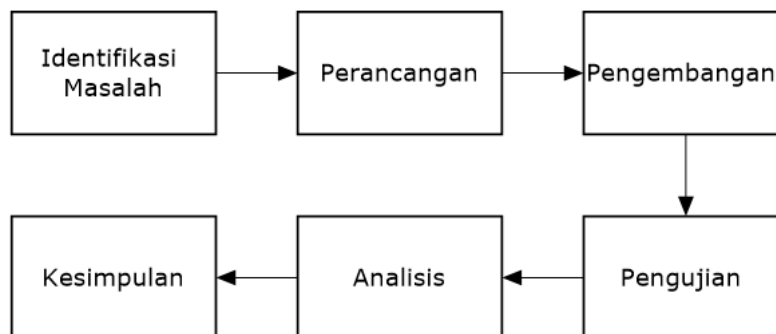
Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, implementasi metode *Proportional-Integral* (PI) pada *Single Axis Solar Tracker* telah dilakukan untuk meningkatkan kemampuan panel

surya dalam mengikuti pergerakan matahari. Namun, penelitian sebelumnya belum dilengkapi dengan fitur monitoring parameter kelistrikan secara *real-time* menggunakan sensor PZEM serta belum terintegrasi dengan aplikasi *mobile* berbasis *Internet of Things* (IoT). Oleh karena itu, *novelty* penelitian ini terletak pada integrasi metode PI, sensor PZEM, *database Firebase*, dan aplikasi *mobile* dalam satu sistem yang memungkinkan monitoring posisi panel surya, daya, dan energi terkumpul secara *real-time* serta pengendalian lampu dari jarak jauh melalui jaringan internet.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode PI pada *Single Axis Solar Tracker* untuk mengoptimalkan pergerakan panel surya serta mengembangkan sistem monitoring dan pengendalian lampu berbasis IoT. Dengan sistem yang dikembangkan, pengguna dapat memantau kondisi panel surya dan parameter kelistrikan secara *real-time* melalui aplikasi *mobile*, sehingga pemanfaatan energi surya dan pengelolaan sistem dapat dilakukan dengan lebih baik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis *Internet of Things* (IoT) pada lampu taman dengan menerapkan metode *Proportional-Integral* (PI) sebagai pengendali pergerakan panel surya. Melalui penelitian ini, diharapkan sistem yang dikembangkan mampu melakukan pelacakan posisi matahari secara optimal serta menyediakan fitur pemantauan data secara *real-time* melalui aplikasi *mobile*. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Tahapan metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Alur Penelitian

Metode ini digunakan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji kinerja sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis *Internet of Things* (IoT) pada lampu taman. Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah untuk mengetahui kebutuhan dan permasalahan yang ada, kemudian dilanjutkan dengan perancangan sistem yang meliputi desain perangkat keras dan perangkat lunak. Selanjutnya dilakukan pengembangan sistem melalui implementasi metode *Proportional-Integral* (PI) serta integrasi komponen yang digunakan. Setelah sistem selesai dikembangkan, dilakukan pengujian untuk memperoleh data kinerja sistem berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui performa sistem, dan hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam penarikan kesimpulan penelitian.

Single Axis Solar Tracker (SAST)

Single Axis Solar Tracker (SAST) merupakan sistem pelacak matahari yang memungkinkan panel surya bergerak mengikuti pergerakan matahari pada satu sumbu tertentu, umumnya dari arah timur ke barat. Sistem ini dirancang untuk menjaga posisi panel surya agar tetap menghadap ke arah datangnya sinar matahari sehingga energi yang

diterima oleh panel surya dapat lebih optimal dibandingkan dengan panel surya yang dipasang secara statis [12].

Prinsip kerja *Single Axis Solar Tracker* adalah mendeteksi perubahan posisi matahari menggunakan sensor, kemudian menggerakkan aktuator seperti motor servo atau motor DC untuk menyesuaikan sudut kemiringan panel surya. Pergerakan panel surya dilakukan secara kontinu atau bertahap mengikuti perpindahan posisi matahari sepanjang hari [12].

Penggunaan *Single Axis Solar Tracker* dapat meningkatkan efisiensi penyerapan energi matahari karena sudut datang sinar matahari terhadap permukaan panel surya dapat dipertahankan mendekati kondisi optimal. Dibandingkan dengan sistem panel surya statis, SAST mampu menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi sehingga banyak diterapkan pada berbagai sistem pembangkit listrik tenaga surya [13].

Pada penelitian ini, *Single Axis Solar Tracker* digunakan untuk mengoptimalkan penyerapan energi matahari pada panel surya yang menjadi sumber daya bagi sistem lampu pintar. Pergerakan panel surya dikendalikan menggunakan metode *Proportional-Integral* (PI) sehingga panel surya dapat mengikuti pergerakan matahari dengan lebih akurat dan stabil.

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik ke jaringan internet sehingga perangkat tersebut dapat saling bertukar data, dipantau, dan dikendalikan secara jarak jauh. Teknologi IoT memungkinkan integrasi antara sensor, aktuator, mikrokontroler, dan aplikasi pengguna dalam satu sistem yang terhubung melalui internet [14][15].

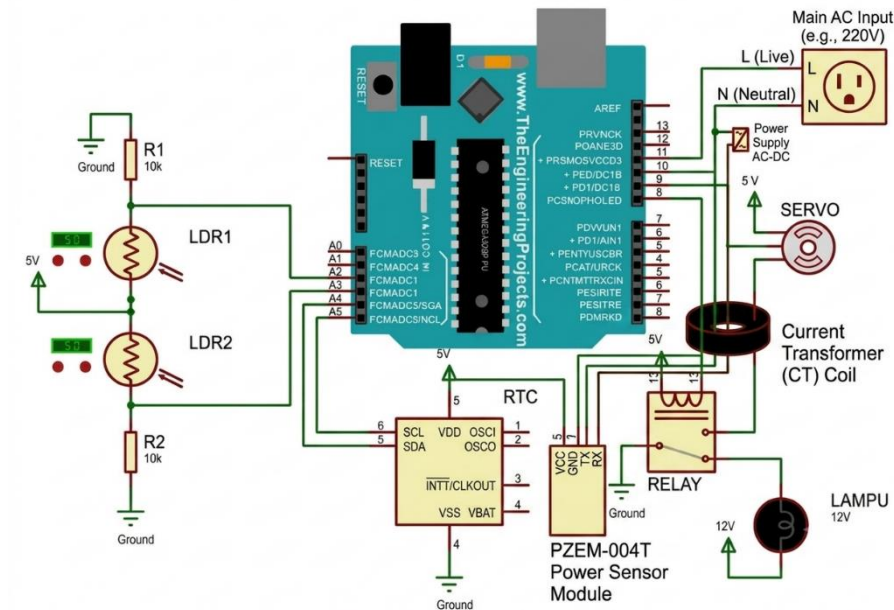
Pada sistem IoT, data yang diperoleh dari sensor akan diproses oleh mikrokontroler kemudian dikirimkan melalui jaringan internet ke platform atau aplikasi yang digunakan pengguna. Selain melakukan monitoring, pengguna juga dapat mengirimkan perintah kepada perangkat untuk melakukan tindakan tertentu secara real-time. Kemampuan ini menjadikan IoT banyak diterapkan pada berbagai bidang, seperti rumah pintar, sistem keamanan, pertanian, kesehatan, dan manajemen energi [16][17].

Penerapan IoT memberikan beberapa keuntungan, antara lain kemudahan monitoring secara real-time, pengendalian perangkat dari jarak jauh, peningkatan efisiensi operasional, serta kemudahan dalam pengumpulan dan penyimpanan data. Dengan adanya konektivitas internet, pengguna tidak perlu berada di lokasi perangkat untuk mengetahui kondisi maupun mengoperasikan sistem.

Pada penelitian ini, teknologi IoT diterapkan pada sistem lampu pintar untuk memungkinkan pengguna melakukan monitoring dan pengendalian lampu melalui aplikasi mobile. Selain itu, IoT juga digunakan untuk menampilkan informasi kondisi sistem secara real-time sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan dan pengelolaan sistem.

Circuit Diagram

Diagram ini menunjukkan hubungan dan konfigurasi antar komponen yang digunakan untuk mendukung proses monitoring dan pengendalian pada sistem. Selain itu, diagram ini juga menggambarkan alur distribusi daya, jalur komunikasi data, serta koneksi antara mikrokontroler dengan sensor, aktuator, dan modul pendukung lainnya sehingga keseluruhan sistem dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan fungsi yang dirancang. berikut adalah *circuit* diagram dari sistem yang dikembangkan pada penelitian ini.



Gambar 3. Circuit Diagram

Adapun fungsi masing-masing komponen yang digunakan pada gambar 3 dapat dilihat pada tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Komponen

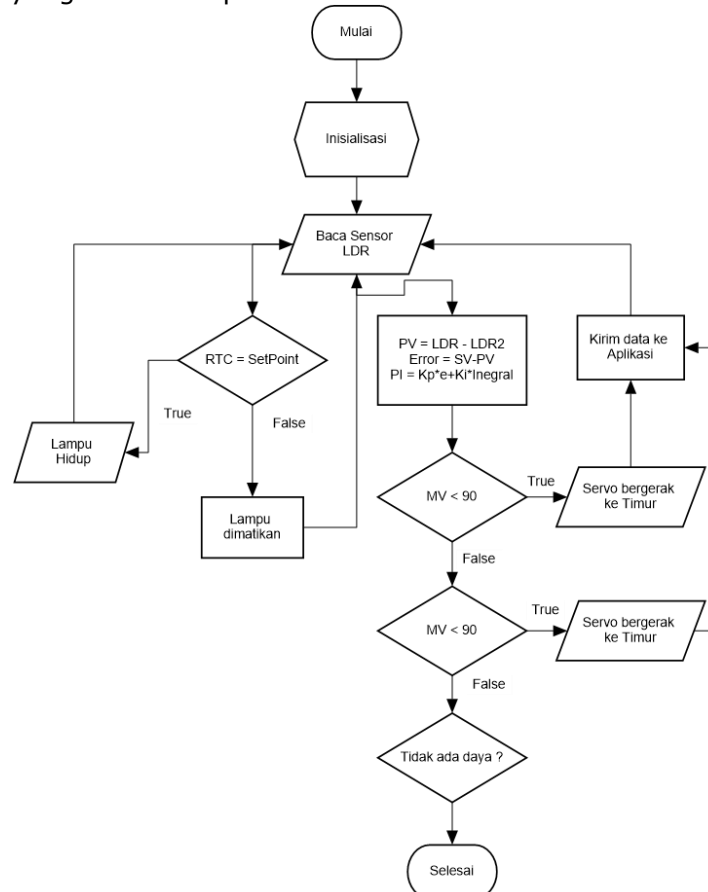
No	Komponen	Fungsi
1	Arduino Uno R4 WiFi	Berfungsi sebagai pengendali utama yang memproses data sensor dan mengontrol aktuator pada sistem.
2	LDR 1	Mendeteksi intensitas cahaya matahari pada sisi pertama panel surya sebagai masukan sistem tracking.
3	LDR 2	Mendeteksi intensitas cahaya matahari pada sisi kedua panel surya untuk menentukan arah pergerakan panel.
4	Resistor (10 kΩ)	Berfungsi sebagai pembagi tegangan (<i>voltage divider</i>) bersama LDR1.
5	Servo Motor	Menggerakkan panel surya pada satu sumbu (<i>single axis</i>) sesuai hasil perhitungan kontrol PI.
6	RTC (Real Time Clock)	Menyimpan dan menyediakan informasi waktu secara <i>real-time</i> untuk kebutuhan penjadwalan atau pencatatan data.
7	Relay Module	Berfungsi sebagai sakelar elektronik untuk mengendalikan aktuator
8	PZEM	Modul elektronik yang digunakan untuk mengukur dan memantau parameter listrik
8	Lampu 12V	Bertindak sebagai beban yang dapat dikontrol secara otomatis maupun melalui aplikasi IoT.
9	Catu Daya 5V	Menyuplai tegangan untuk Arduino, sensor, servo, dan RTC.
10	Catu Daya 12V	Menyuplai tegangan untuk lampu yang dikendalikan melalui relay.

Salah satu perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada penggunaan sensor PZEM. Pada penelitian sebelumnya, sistem belum dilengkapi sensor PZEM sehingga daya listrik yang dihasilkan panel surya tidak dapat dimonitor secara real-

time. Pada penelitian ini, sensor PZEM digunakan untuk mengukur dan memantau daya listrik melalui aplikasi mobile berbasis IoT.

Flowchart

Berikut adalah *flowchart* dari sistem yang dikembangkan pada penelitian ini. *Flowchart* tersebut menggambarkan alur kerja sistem secara keseluruhan, mulai dari proses pembacaan data sensor, pengolahan data oleh mikrokontroler, hingga proses monitoring dan pengendalian yang dilakukan pada sistem.



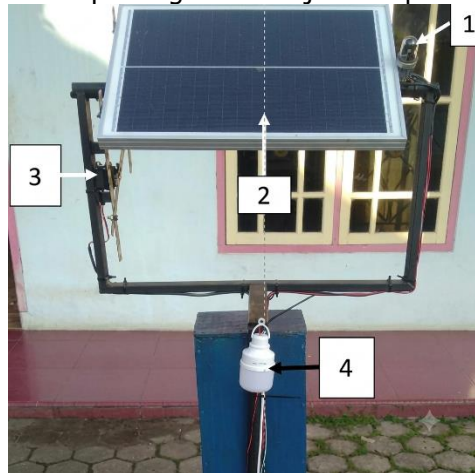
Gambar 4. Flowchart

Gambar 4 menunjukkan *flowchart* sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis IoT yang dikembangkan pada penelitian ini. Proses dimulai dengan inisialisasi sistem, kemudian sensor LDR membaca intensitas cahaya matahari untuk menentukan nilai *error* yang digunakan dalam perhitungan kontrol PI. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk menggerakkan motor servo sehingga panel surya dapat mengikuti arah datangnya cahaya. Selain itu, sistem juga melakukan monitoring lampu dan daya dari panel surya melalui aplikasi *mobile*. Data sistem dikirim dari *firebase* secara *real-time* ke aplikasi untuk proses pemantauan, sedangkan lampu dapat dihidupkan atau dimatikan berdasarkan nilai *setpoint* pada RTC. Proses berlangsung secara berulang hingga sistem tidak mendapatkan suplai daya dan berhenti beroperasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perangkat Solar Tracker

Pada tahap pengembangan sistem, desain yang telah dirancang direalisasikan menjadi sebuah prototipe *Single Axis Solar Tracker* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk *Smart Lamp*. Prototipe ini merupakan hasil integrasi seluruh komponen yang digunakan dalam penelitian. Adapun tampilan fisik perangkat ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perangkat Solar Tracker

Berikut keterangan dari setiap angka di gambar 4 dapat dilihat pada tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Letak Komponen

No	Komponen	Fungsi
1	Sensor LDR	Sensor pendeteksi intensitas cahaya
2	Panel Surya	Perangkat untuk merubah energi matahari menjadi energi listrik
3	Servo	Penggerak posisi panel surya
4	Lampu	Aktuator untuk mengeluarkan cahaya

Validasi Sensor

Validasi sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan sensor yang digunakan pada sistem. Pada penelitian ini, validasi dilakukan terhadap sensor LDR dan sensor PZEM dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur referensi. Hasil validasi digunakan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh sensor dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem solar *tracker* dan monitoring energi. Tingkat kesalahan (*error*) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Error = \frac{Nilai Referensi - Nilai Sensor}{Nilai Referensi} \times 100\%$$

Berikut hasil perbandingan pembacaan nilai sensor LDR dengan lux meter pada tabel 3 dan nilai sensor PZEM dengan multimeter pada tabel 4.

Tabel 3. Validasi sensor LDR

No	Lux Meter	LDR	Error (%)
1	500	490	2,0
2	800	785	1,87
3	1000	980	2,0

Berdasarkan hasil validasi pada Tabel 3, nilai pembacaan sensor LDR memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap alat ukur referensi (lux meter). Dari tiga kali pengujian, diperoleh nilai *error* sebesar 2,0%, 1,87%, dan 2,0% dengan rata-rata *error* sebesar 1,96%. Nilai *error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa sensor LDR mampu mendeteksi intensitas cahaya dengan cukup akurat sehingga layak digunakan sebagai sensor pendeteksi arah cahaya pada sistem *Single Axis Solar Tracker*.

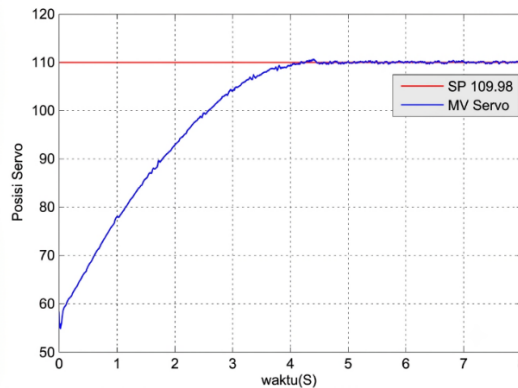
Tabel 4. Validasi sensor PZEM

No	Multimeter (V)	PZEM (V)	Error (%)
1	12.00	11.90	0.83
2	12.10	12.05	0.41
3	11.95	11.90	0.42

Berdasarkan hasil validasi pada Tabel 4, sensor PZEM menunjukkan hasil pengukuran tegangan yang mendekati nilai referensi yang diperoleh dari multimeter. Nilai *error* yang diperoleh pada tiga kali pengujian berturut-turut adalah 0,83%, 0,41%, dan 0,42%, dengan rata-rata *error* sebesar 0,55%. Nilai *error* yang rendah menunjukkan bahwa sensor PZEM memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengukur tegangan. Dengan demikian, sensor PZEM layak digunakan untuk monitoring parameter kelistrikan pada sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis IoT.

Analisis Kontrol PI

Dari setiap pengujian dilakukan berkali-kali dan di uji gangguannya hingga stabil sehingga didapatkan hasil grafik sebagai berikut.



Gambar 6. Grafik Uji Kontrol PI

Dari grafik terlihat bahwa pada awal pengujian posisi servo berada pada sekitar 55°, kemudian servo bergerak secara bertahap menuju nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Kurva berwarna biru (MV Servo) mengalami kenaikan yang relatif halus tanpa fluktuasi yang signifikan hingga mendekati nilai setpoint. Sistem mencapai kondisi tunak (*steady-state*) pada rentang waktu sekitar 4–5 detik dengan posisi servo berada di sekitar 110°. Selain itu, terlihat adanya overshoot yang sangat kecil, yaitu posisi servo sedikit melewati setpoint sebelum kembali stabil pada nilai yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa parameter kontrol PI yang digunakan mampu menghasilkan respon sistem yang stabil, dengan error keadaan tunak (*steady-state error*) yang sangat kecil serta kemampuan mengikuti nilai setpoint dengan baik.

Respon sistem kendali Proportional-Integral (PI) yang diperoleh dari hasil pengujian dapat dilihat pada gambar berikut.

```
ans =

    RiseTime: 2.8913
    SettlingTime: 3.8686
    SettlingMin: 104.7400
    SettlingMax: 110.4800
    Overshoot: 0.4546
    Undershoot: 0
    Peak: 110.4800
    PeakTime: 4.4160
```

Gambar 7. Respon Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, sistem memiliki waktu naik (*rise time*) sebesar 2,8913 detik dan waktu tunak (*settling time*) sebesar 3,6686 detik. Nilai *overshoot* yang diperoleh hanya sebesar 0,4546%, menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai nilai referensi dengan sangat stabil dan tanpa osilasi yang signifikan. Selain itu, tidak ditemukan *undershoot* pada respon sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol PI yang diterapkan mampu memberikan respon yang cepat serta menjaga kestabilan pergerakan sistem solar tracker.

Uji Efisiensi Energi Panel Surya

Setelah diperoleh hasil respon sistem yang menunjukkan kinerja kontrol PI yang stabil, dilakukan pengujian terhadap perubahan sudut panel surya dan daya yang dihasilkan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem *Single Axis Solar Tracker* dalam mengikuti pergerakan matahari serta pengaruhnya terhadap daya keluaran panel surya selama periode pengamatan.

Tabel 5. Posisi dan daya panel surya

Jam	Sudut	Tracker	Fixed
09.00	120°	12.80	8.44
10.00	110°	14.11	12.21
11.00	100°	15.13	14.70
12.00	90°	12.70	12.60
13.00	75°	13.10	12.35
14.00	60°	13.40	10.35
15.00	65°	11.70	7.10

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, panel surya yang menggunakan *Single Axis Solar Tracker* menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan panel surya dengan posisi tetap (*fixed*) pada hampir seluruh waktu pengamatan. Pada pukul 09.00, daya yang dihasilkan *solar tracker* sebesar 12,80 W, lebih tinggi dibandingkan panel *fixed* yang hanya menghasilkan 8,44 W. Perbedaan daya juga terlihat pada pukul 10.00 dan 11.00, yaitu masing-masing sebesar 14,11 W dan 15,13 W untuk *solar tracker*, sedangkan panel *fixed* menghasilkan 12,21 W dan 14,70 W.

Pada pukul 12.00, kedua sistem menghasilkan daya yang hampir sama, yaitu 12,70 W pada *solar tracker* dan 12,60 W pada panel *fixed*. Hal ini terjadi karena posisi matahari berada mendekati tegak lurus terhadap permukaan panel sehingga panel *fixed* masih mampu menerima intensitas cahaya yang optimal. Namun, setelah matahari bergerak ke arah barat, perbedaan daya kembali meningkat. Pada pukul 14.00, *solar tracker* menghasilkan daya sebesar 13,40 W, sedangkan panel *fixed* hanya menghasilkan 10,35 W. Perbedaan terbesar terjadi pada pukul 15.00, yaitu sebesar 11,70 W pada *solar tracker* dan 7,10 W pada panel *fixed*.

Secara keseluruhan, total daya yang dihasilkan panel surya dengan *solar tracker* selama periode pengujian mencapai 92,94 W, sedangkan panel *fixed* menghasilkan 77,75 W. Hasil

Ghifar Javad H Aziz: *Penulis Korespondensi

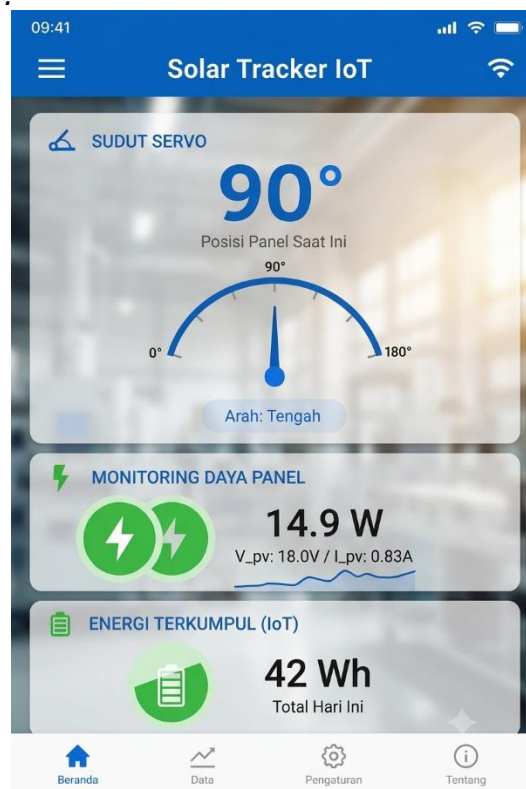


Copyright © 2026, Ghifar Javad H Aziz, David Naista.

tersebut menunjukkan bahwa penerapan *Single Axis Solar Tracker* mampu meningkatkan perolehan daya sekitar 19,54% dibandingkan panel surya dengan posisi tetap. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga orientasi panel agar tetap mendekati arah datangnya sinar matahari sehingga penyerapan energi surya menjadi lebih optimal.

Aplikasi Mobile

Pada penelitian ini, aplikasi *mobile* digunakan sebagai media monitoring dan pengendalian sistem berbasis *Internet of Things* (IoT). Aplikasi dirancang untuk menampilkan data yang diperoleh dari sensor secara *real-time* serta memberikan kemudahan bagi pengguna dalam mengakses informasi sistem dari jarak jauh. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya berfokus pada implementasi kontrol PI pada *Single Axis Solar Tracker*.



Gambar 8. Aplikasi Mobile

Pada aplikasi, data yang diperoleh dari Arduino Uno R4 WiFi dikirim dan disimpan ke dalam database *Firebase* melalui jaringan *internet*. Selanjutnya, aplikasi mobile mengambil data dari *Firebase* untuk ditampilkan kepada pengguna secara *real-time*. Informasi yang ditampilkan meliputi sudut servo yang menunjukkan posisi panel surya saat mengikuti pergerakan matahari, daya panel surya dalam satuan *Watt* (W) yang diperoleh dari sensor PZEM, serta energi terkumpul dalam satuan *Watt-hour* (Wh). Dengan memanfaatkan *Firebase* sebagai basis data *cloud*, proses penyimpanan dan sinkronisasi data dapat dilakukan secara cepat sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem dari jarak jauh melalui aplikasi *mobile*.

Uji performa komunikasi IoT

Uji ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan perangkat dalam mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke database *Firebase* dan menampilkannya pada aplikasi *mobile* secara *real-time*. Parameter yang diamati meliputi waktu pengiriman data (*delay*) antara

perangkat dan aplikasi guna memastikan proses monitoring dapat berjalan dengan baik dan responsif. Uji dilakukan dengan persamaan berikut.

$$Delay_{avg} = \frac{\sum delay}{n}$$

Berikut hasil uji dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Uji peforma komunikasi IoT

Pengujian	Waktu Kirim	Waktu Tampil Aplikasi	Delay
1	10:00:00	10:00:01	1 s
2	10:05:00	10:05:01	1 s
3	10:10:00	10:10:02	2 s

Evaluasi performa komunikasi IoT dilakukan dengan mengukur waktu yang dibutuhkan data untuk dikirim dari Arduino Uno R4 WiFi ke *Firestore* dan ditampilkan pada aplikasi mobile. Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata *delay* pengiriman data sebesar 1,33 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi data berjalan dengan baik dan mampu mendukung proses monitoring sistem secara real-time.

Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh fungsi pada sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis *Internet of Things* (IoT) dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan yang telah ditetapkan. Metode pengujian yang digunakan adalah *Black Box Testing*, yaitu pengujian yang berfokus pada fungsi dan keluaran sistem tanpa memperhatikan struktur kode program yang digunakan. Pengujian dilakukan pada setiap fitur sistem untuk mengetahui kesesuaian antara hasil yang diperoleh dengan hasil yang diharapkan.

Tabel 7. Hasil Pengujian *Black Box Testing*

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	Sistem dinyalakan	Mikrokontroler dan seluruh komponen dapat beroperasi dengan baik	Sistem berhasil menyala dan beroperasi normal	Berhasil
2	Pembacaan sensor LDR	Sensor dapat mendeteksi intensitas cahaya matahari	Nilai intensitas cahaya berhasil terbaca oleh sistem	Berhasil
3	Pergerakan servo	Servo bergerak mengikuti hasil pembacaan sensor dan kontrol PI	Servo bergerak sesuai perintah sistem	Berhasil
4	Monitoring sudut servo	Nilai sudut servo ditampilkan pada aplikasi <i>mobile</i>	Sudut servo berhasil ditampilkan pada aplikasi	Berhasil
5	Monitoring daya panel surya	Nilai daya panel surya ditampilkan pada aplikasi <i>mobile</i>	Data daya panel berhasil ditampilkan	Berhasil
6	Monitoring energi terkumpul	Nilai energi (Wh) ditampilkan pada aplikasi <i>mobile</i>	Data energi berhasil ditampilkan	Berhasil
7	Pengiriman data ke <i>Firestore</i>	Data sensor dan monitoring tersimpan pada <i>Firestore</i>	Data berhasil tersimpan pada <i>Firestore</i>	Berhasil

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
8	Sinkronisasi <i>Firestore</i> dengan aplikasi <i>mobile</i>	Data pada <i>Firestore</i> dapat ditampilkan secara <i>real-time</i> pada aplikasi	Data berhasil ditampilkan secara <i>real-time</i>	Berhasil
9	Koneksi internet terhubung	Sistem dapat mengirimkan data ke server <i>Firestore</i>	Data berhasil dikirim ke <i>Firestore</i>	Berhasil
10	Tampilan aplikasi <i>mobile</i>	Seluruh menu dan informasi dapat ditampilkan dengan baik	Seluruh fitur aplikasi berjalan normal	Berhasil

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, metode *Proportional-Integral* (PI) berhasil diterapkan pada sistem *Single Axis Solar Tracker* (SAST) untuk mengarahkan panel surya mengikuti pergerakan matahari secara otomatis dan stabil. Hasil pengujian respon sistem menunjukkan nilai *rise time* sebesar 2,8913 detik, *settling time* sebesar 3,6686 detik, dan *overshoot* sebesar 0,4546%, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai setpoint dengan cepat dan memiliki kestabilan yang baik.

Hasil validasi sensor menunjukkan bahwa sensor LDR memiliki rata-rata *error* sebesar 1,96%, sedangkan sensor PZEM memiliki rata-rata *error* sebesar 0,55%. Nilai *error* yang rendah menunjukkan bahwa kedua sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dan layak digunakan pada sistem yang dikembangkan.

Pengujian kinerja *solar tracker* menunjukkan bahwa panel surya mampu mengikuti pergerakan matahari dengan perubahan sudut dari 120° pada pukul 09.00 hingga 60° pada pukul 14.00. Hasil pengujian daya menunjukkan bahwa panel surya yang menggunakan *Single Axis Solar Tracker* menghasilkan total daya sebesar 92,94 W, lebih tinggi dibandingkan panel surya dengan posisi tetap yang menghasilkan 77,75 W. Dengan demikian, penerapan *solar tracker* mampu meningkatkan perolehan daya sebesar 19,54% dibandingkan panel surya statis.

Selain itu, integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT), sensor PZEM, *database Firestore*, dan aplikasi *mobile* berhasil diterapkan untuk mendukung monitoring sistem secara *real-time*. Hasil evaluasi performa komunikasi IoT menunjukkan rata-rata delay pengiriman data sebesar 1,33 detik, sehingga informasi posisi panel surya, daya, dan energi dapat ditampilkan pada aplikasi *mobile* dengan respons yang baik. Berdasarkan hasil Black Box Testing, seluruh fungsi sistem berjalan sesuai dengan yang diharapkan dengan tingkat keberhasilan 100%.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem *Single Axis Solar Tracker* berbasis IoT yang dikembangkan mampu melakukan pelacakan posisi matahari secara otomatis, meningkatkan perolehan daya panel surya, menyediakan monitoring parameter kelistrikan secara *real-time*, serta mendukung pengendalian dan pemantauan sistem dari jarak jauh melalui aplikasi *mobile*.

5. REFERENCES

- [1] V. Dwisari, "PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI: MASA DEPAN ENERGI TERBARUKAN," Dec. 2023.
- [2] I. Alhamzani and L. Ibrohim Burhan, "Dharma Bakti: Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Inovasi Teknologi Tepat Guna Pengembangan Energi Terbarukan melalui Panel Surya di Desa Tertinggal," no. 2, May 2025.

- [3] Y. M. D. Eka Saputra, M. T. N. Ramadhan, A. Maulida, B. Santoso, and I. Basri, "Design a Smart Solar Tracker to Increase Energy Output Power Generated in Solar Home System," *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 53–62, Mar. 2024, doi: 10.46574/motivection.v6i1.286.
- [4] F. Marcel Dkk-Perancangan *et al.*, "Perancangan dan Implementasi Sistem Solar Tracker Single Axis Berbasis Metode Scheduling", doi: 10.33503/prosiding.v6i01.2455.
- [5] P. Maharani, A. A. Adam, B. Mukhlis, Y. Arifin, N. Amin, and M. Mardiansyah, "PEMODELAN SOLAR TRACKER DENGAN PENGENDALI PI, PD, DAN PID MENGGUNAKAN MATLAB-SIMULINK DENGAN BEBAN BATERAI," *Foristek*, vol. 14, no. 1, May 2024, doi: 10.54757/fs.v14i1.375.
- [6] P. Dan *et al.*, "PEMANTAUAN DAN PENGENDALIAN JARAK JAUH PADA SISTEM LISTRIK BEBAS UNTUK APLIKASI INTERNET OF THINGS (IOT)," vol. 1, 2023, [Online]. Available: <http://centralpublisher.co.id>
- [7] M. Munir and I. Setiawan Wibisono, "Pemantauan Daya Listrik Real-Time Menggunakan IoT untuk Efisiensi Energi Rumah Tangga," *Jurnal Algoritma*, vol. 22, no. 2, Nov. 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-2.2391.
- [8] G. Javad, H. Aziz, and A. F. Shiddiq, "IMPLEMENTASI METODE PROPORTIONAL-INTEGRAL (PI) PADA SINGLE AXIS SOLAR TRACKER UNTUK LAMPU TAMAN," Mar. 2023.
- [9] M. Waruwu, "Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D): Konsep, Jenis, Tahapan dan Kelebihan," *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan*, vol. 9, no. 2, pp. 1220–1230, May 2024, doi: 10.29303/jipp.v9i2.2141.
- [10] A. A. Wahid, "Jurnal Ilmu-ilmu Informatika dan Manajemen STMIK Oktober (2020) Analisis Metode Waterfall Untuk Pengembangan Sistem Informasi," Oct. 2020.
- [11] S. Supiyandi, M. Zen, C. Rizal, and M. Eka, "Perancangan Sistem Informasi Desa Tomuan Holbung Menggunakan Metode Waterfall," *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer)*, vol. 9, no. 2, p. 274, Apr. 2022, doi: 10.30865/jurikom.v9i2.3986.
- [12] D. Yulia Ratnadewati, R. Vera Oktarina, Santikasari, and Pramono, "Rancang Bangun Solar Tracker Otomatis Berbasis Arduino Uno Untuk Meningkatkan Efisiensi Penyerapan Energi Surya," 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.sinesia.id/index.php/tech/index>
- [13] A. Alfayid, R. D. Jayanti, Y. S. A. Gumilang, and S. Wiyanto, "Prototype Kontrol Penggerak Single Axis Solar Tracker pada Panel Surya Berbasis Arduino Uno dan Sensor LDR," Augs, 2025.
- [14] A. Selay *et al.*, "INTERNET OF THINGS," 2022.
- [15] D. Hidayat and I. Sari, "MONITORING SUHU DAN KELEMBABAN BERBASIS INTERNET of THINGS (IoT)," Apr. 2021. [Online]. Available: www.Blynk.cc
- [16] K. H. Abdullah, N. Gazali, R. Muzawi, E. Syam, M. F. Roslan, and D. Sofyan, "Internet of Things (IoT) in Education: A Bibliometric Review," *International Journal of Information Science and Management*, vol. 22, no. 1, pp. 183–202, 2024, doi: 10.22034/IJISM.2023.1977600.0.
- [17] Z. Aripin, V. Paramarta, and Kosasih, "Utilizing Internet of Things (IOT)-based Design for Consumer Loyalty: A Digital System Integration," *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol. 9, no. 10, pp. 8650–8655, Oct. 2023, doi: 10.29303/jppipa.v9i10.4490.