



Sistem SOLART Berbasis ESP32 untuk Kendali Otomatis Lampu dan Tirai Berdasarkan Intensitas Cahaya

Muhammad Ihsan Wafiudin¹, Achmad Solichan^{2*}, Aris Kiswanto³

¹⁻³Program Studi S1 Rekayasa Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Semarang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: solichan@unimus.ac.id

Abstract. Residential lighting and curtains are commonly controlled independently, limiting daylight utilization and increasing reliance on electric lighting. This study developed SOLART, an ESP32-based local embedded system that integrates automatic lamp switching and curtain actuation using ambient light intensity as the control variable. The prototype employed an LDR-LM393 module, a one-channel relay for a 5 W AC lamp, and a BTS7960 motor driver connected to a DC motor. A rule-based threshold of 100 lx was implemented in Arduino IDE with a two-second sampling interval. Functional and electrical tests were conducted on the controller, sensor, relay, motor driver, motor, and lamp. At 70 lx, the system switched the lamp on and closed the curtain; at 220 lx, it switched the lamp off and opened the curtain. The sensor estimates differed from lux-meter readings by 1.43% and 0.45%, respectively. Relay and motor measurements generally showed deviations below 6%. A 19.39% deviation in the BTS7960 control-voltage reading was attributed to the limitation of measuring a switching or PWM signal with a handheld multimeter and therefore requires oscilloscope verification. The results demonstrate functionally consistent dual-actuator local control without internet dependence, although broader calibration, response-time measurement, and long-term energy testing remain necessary.

Keywords: Ambient Light Intensity; Automatic Curtain; Automatic Lighting; Embedded System; ESP32.

Abstrak. Pengendalian lampu dan tirai hunian yang dilakukan secara terpisah membatasi pemanfaatan cahaya alami dan dapat meningkatkan ketergantungan pada pencahayaan listrik. Penelitian ini mengembangkan SOLART, yaitu sistem tertanam lokal berbasis ESP32 yang mengintegrasikan penyalaan lampu dan penggerakan tirai secara otomatis dengan intensitas cahaya lingkungan sebagai variabel kendali. Prototipe menggunakan modul LDR-LM393, relay satu kanal untuk lampu AC 5 W, serta driver motor BTS7960 yang terhubung dengan motor DC. Logika berbasis aturan menggunakan ambang 100 lx dan interval pembacaan dua detik diimplementasikan melalui Arduino IDE. Pengujian fungsional dan pengukuran listrik dilakukan pada pengendali, sensor, relay, driver motor, motor, dan lampu. Pada 70 lx, sistem menyalakan lampu dan menutup tirai; pada 220 lx, sistem mematikan lampu dan membuka tirai. Deviasi estimasi sensor terhadap lux meter masing-masing sebesar 1,43% dan 0,45%. Pengukuran relay dan motor umumnya menunjukkan deviasi di bawah 6%. Deviasi 19,39% pada pembacaan tegangan kendali BTS7960 diperlakukan sebagai keterbatasan pengukuran sinyal switching atau PWM menggunakan multimeter dan perlu diverifikasi dengan osiloskop. Hasil menunjukkan kendali lokal dua aktuator bekerja konsisten tanpa ketergantungan internet, tetapi kalibrasi lebih luas, pengukuran waktu respons, dan uji energi jangka panjang masih diperlukan.

Kata kunci: Embedded System; ESP32; Intensitas Cahaya Lingkungan; Lampu Otomatis; Tirai Otomatis.

1. LATAR BELAKANG

Pencahayaan ruang berpengaruh langsung terhadap kenyamanan visual, keterbacaan objek, dan pola konsumsi energi bangunan. Pada ruang hunian, kebutuhan pencahayaan tidak hanya dipenuhi oleh lampu, tetapi juga oleh cahaya alami yang masuk melalui bukaan. Ketika lampu tetap menyala pada saat cahaya alami mencukupi atau tirai tidak disesuaikan dengan kondisi lingkungan, potensi pemanfaatan daylight menjadi rendah. Karena itu, sistem pencahayaan modern berkembang dari saklar manual menuju kendali yang mampu merespons intensitas cahaya, pola penggunaan ruang, dan preferensi pengguna (Putrada et al., 2022; Widartha et al., 2024).

Sistem kendali pencahayaan otomatis dapat berbentuk switching biner, dimming bertingkat, atau kendali adaptif berbasis data. Sistem dengan kalibrasi otomatis dan pengaturan kecerahan telah menunjukkan bahwa respons terhadap cahaya lingkungan dapat mengurangi keluaran lampu yang tidak diperlukan tanpa mengabaikan kebutuhan iluminasi (Aussat et al., 2022; Petkovic et al., 2022). Meskipun demikian, kompleksitas algoritma, kebutuhan jaringan, dan biaya sensor sering kali menjadi hambatan bagi penerapan pada prototipe hunian berbiaya rendah. Untuk konteks tersebut, kendali berbasis aturan lokal masih relevan karena mudah diuji, dapat beroperasi tanpa internet, dan memiliki jalur keputusan yang transparan.

Tirai merupakan bagian dari sistem pencahayaan ruang karena posisinya menentukan banyaknya cahaya alami yang masuk dan potensi silau. Integrasi pengendalian tirai dan lampu dapat menghindari dua keputusan yang saling bertentangan, misalnya lampu dinyalakan ketika tirai sebenarnya dapat dibuka untuk memanfaatkan cahaya alami. Penelitian tentang integrasi daylight, pencahayaan umum, dan pencahayaan tugas menunjukkan bahwa koordinasi antarkomponen lebih penting daripada mengoptimalkan salah satu perangkat secara terpisah (Basurto et al., 2022; Papinutto et al., 2022).

Penelitian berbasis sensor Light Dependent Resistor (LDR) di Indonesia umumnya berfokus pada penyalaan lampu otomatis. Al Ghifari et al. (2022), Rahmansyah et al. (2023), dan Hadikusuma et al. (2025) menunjukkan kelayakan LDR sebagai masukan untuk membedakan kondisi terang dan gelap pada aplikasi pencahayaan sederhana. Pada sisi lain, Fitriyah et al. (2024) serta Siregar dan Pangaribuan (2025) mengembangkan prototipe buka-tutup gorden menggunakan sensor cahaya dan motor. Kedua kelompok penelitian tersebut menegaskan kegunaan kendali otomatis, tetapi perangkat pencahayaan dan tirai masih dominan diperlakukan sebagai sistem yang berdiri sendiri.

Penelitian yang mengintegrasikan blind dan lampu umumnya menggunakan dimming, beberapa sensor, model optimasi, atau infrastruktur jaringan yang lebih kompleks. Kim et al. (2020) mengevaluasi illuminance pada integrasi blind otomatis dan LED dimming, sedangkan Lee et al. (2022), Chiradeja dan Yoomak (2023), serta Zhang et al. (2023) menempatkan kendali pencahayaan dalam arsitektur IoT atau sistem cerdas yang lebih luas. Pendekatan tersebut menawarkan fungsi yang kaya, tetapi belum secara langsung menjawab kebutuhan prototipe lokal yang murah, mudah direplikasi, dan tetap mampu mengoordinasikan dua aktuator dengan satu variabel lingkungan.

Berdasarkan telaah tersebut, gap penelitian terletak pada terbatasnya kajian prototipe yang mengintegrasikan switching lampu AC dan gerak tirai dalam satu pengendali lokal berbasis ESP32, sekaligus menyajikan validasi fungsional serta pengukuran listrik pada

subsistem pengendali dan aktuator. Kebaruan penelitian ini bukan berupa algoritma kendali baru, melainkan kontribusi rekayasa berupa integrasi dua aktuator dalam satu sistem tertanam lokal, penggunaan aturan keputusan yang dapat ditelusuri, dan evaluasi deviasi pengukuran secara kritis. Penegasan ini penting agar kontribusi tidak dilebih-lebihkan dan tetap sesuai dengan data eksperimen yang tersedia.

Penelitian ini bertujuan merancang, membangun, dan menguji sistem SOLART berbasis ESP32 untuk mengendalikan lampu dan tirai secara otomatis berdasarkan intensitas cahaya lingkungan. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada prototipe switching dua kondisi dengan ambang 100 lx, interval pembacaan dua detik, relay satu kanal untuk lampu AC 5 W, serta motor DC yang dikendalikan melalui driver BTS7960. Penelitian tidak mengevaluasi pembangkitan energi surya, penghematan energi aktual, konektivitas internet, atau kenyamanan penghuni secara longitudinal.

2. KAJIAN TEORITIS

Kendali Pencahayaan Berdasarkan Intensitas Cahaya

Kendali pencahayaan berbasis intensitas cahaya menggunakan nilai iluminansi sebagai indikator ketersediaan cahaya pada bidang atau area tertentu. Pada sistem sederhana, nilai sensor dibandingkan dengan ambang yang telah ditentukan. Apabila nilai berada di bawah ambang, lampu diaktifkan; apabila nilai berada di atas ambang, lampu dinonaktifkan. Pendekatan switching ini mudah diterapkan dan dijelaskan, tetapi tidak menghasilkan transisi kecerahan yang halus sebagaimana dimming. Sistem dimmable dan sistem pencahayaan personal bahkan dapat menyesuaikan keluaran berdasarkan beberapa zona, preferensi, atau konteks aktivitas (Petkovic et al., 2022; Zhang et al., 2023).

LDR bekerja berdasarkan perubahan resistansi akibat paparan cahaya: resistansi cenderung tinggi pada kondisi gelap dan menurun ketika cahaya meningkat. Modul LDR-LM393 menambahkan rangkaian komparator dan trimpot sehingga ambang respons dapat disetel. Dalam aplikasi kuantitatif, keluaran LDR tidak seharusnya langsung diperlakukan sebagai lux tanpa kalibrasi terhadap alat referensi karena responsnya nonlinier dan dipengaruhi spektrum cahaya, posisi sensor, serta toleransi komponen. Pengujian sensor LDR untuk kendali lampu memperlihatkan pentingnya penetapan batas dan verifikasi pembacaan terhadap kondisi aktual (Al Ghifari et al., 2022).

Selain iluminansi, kualitas sistem pencahayaan juga berkaitan dengan silau, ritme sirkadian, dan preferensi pengguna. Mathew et al. (2022) menunjukkan bahwa optimasi pencahayaan alami dan buatan perlu mempertimbangkan glare dan circadian entrainment,

bukan hanya nilai lux tunggal. Oleh sebab itu, ambang 100 lx pada penelitian ini diposisikan sebagai parameter prototipe untuk membuktikan fungsi kendali, bukan sebagai rekomendasi universal bagi seluruh ruang hunian.

Otomasi Tirai dan Pemanfaatan Cahaya Alami

Tirai atau blind berfungsi mengatur transmisi cahaya, pandangan keluar, privasi, dan potensi panas matahari. Kendali otomatis dapat membuka tirai ketika cahaya alami diperlukan dan menutupnya ketika kondisi tertentu menuntut privasi atau pengurangan cahaya. Koo et al. (2010) menunjukkan bahwa strategi blind otomatis dapat memaksimalkan manfaat daylight, tetapi performanya sangat bergantung pada tujuan kendali, posisi sensor, dan kondisi fasad.

Integrasi blind dengan lampu memberikan kesempatan untuk membagi peran antara cahaya alami dan cahaya buatan. Pengujian skala penuh oleh Kim et al. (2020) menunjukkan bahwa blind otomatis dan LED dimming dapat dievaluasi sebagai satu sistem berdasarkan data iluminansi. Studi longitudinal Basurto et al. (2022) dan pendekatan otomatis Papinutto et al. (2022) juga menekankan bahwa efisiensi tidak boleh dicapai dengan mengabaikan kenyamanan penghuni. Dibandingkan pendekatan tersebut, SOLART menggunakan aturan biner yang lebih sederhana; keunggulannya adalah implementasi murah dan lokal, sedangkan keterbatasannya adalah belum adanya pengukuran silau, posisi tirai bertingkat, dan preferensi pengguna.

Sistem Tertanam Lokal Berbasis ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler 32-bit dengan antarmuka input-output, PWM, dan komunikasi nirkabel terintegrasi. Pada berbagai penelitian smart home, ESP32 digunakan sebagai pusat pembacaan sensor dan pengendalian aktuator karena sumber daya komputasinya memadai untuk logika real-time sederhana. Fakhrudin et al. (2024) menggunakan ESP32 pada sistem keamanan pintu berbasis IoT, sedangkan Munoz et al. (2022) dan Sureshkumar et al. (2024) memanfaatkannya dalam konteks manajemen energi dan fusi multisensor.

Ketersediaan Wi-Fi tidak mengharuskan sistem selalu bergantung pada jaringan. Arsitektur lokal menjalankan pembacaan sensor, keputusan, dan pengendalian aktuator pada perangkat yang sama sehingga latensi jaringan dan risiko kegagalan koneksi dapat dihindari. Pendekatan edge pada smart lighting juga dikembangkan untuk mempercepat pemrosesan dan mengurangi ketergantungan cloud (Putrada et al., 2023). Sistem lain menggabungkan pencahayaan dengan komunikasi VLC, Bluetooth, atau arsitektur master-slave untuk menambah layanan lokalisasi dan koordinasi antarlampu (Lee et al., 2022; Xu et al., 2022). SOLART sengaja tidak menggunakan fungsi tersebut agar kontribusi terfokus pada kendali lokal dua aktuator.

Dalam implementasi perangkat keras, ESP32 tidak dapat langsung mengendalikan beban AC atau motor berarus lebih besar. Relay digunakan sebagai saklar beban lampu, sedangkan BTS7960 berfungsi sebagai driver H-bridge untuk mengatur arah motor DC dan menerima sinyal kendali dari ESP32. Pemisahan fungsi ini menjaga agar jalur logika tegangan rendah tidak menanggung arus beban secara langsung.

Posisi dan Kontribusi Penelitian

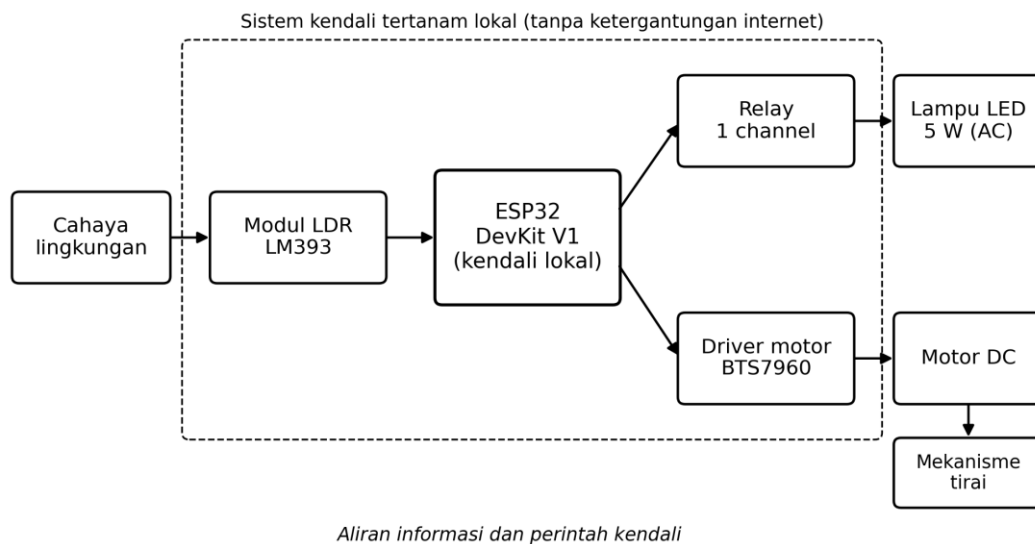
Posisi penelitian dapat diringkas dalam tiga kelompok. Pertama, penelitian lampu otomatis berbasis LDR membuktikan fungsi switching tetapi umumnya hanya mengendalikan lampu (Al Ghifari et al., 2022; Rahmansyah et al., 2023; Hadikusuma et al., 2025). Kedua, penelitian gorden otomatis mengendalikan motor sebagai sistem terpisah (Fitriyah et al., 2024; Siregar & Pangaribuan, 2025). Ketiga, penelitian integrasi blind dan pencahayaan menawarkan optimasi lebih maju tetapi memerlukan dimming, multisensor, atau infrastruktur komputasi yang lebih kompleks (Kim et al., 2020; Papinutto et al., 2022; Chiradeja & Yoomak, 2023). SOLART mengisi ruang di antara ketiga kelompok tersebut melalui integrasi sederhana, lokal, dan dapat direplikasi. Kontribusinya adalah validasi bahwa satu pengendali ESP32 dapat mengoordinasikan lampu AC dan motor tirai berdasarkan satu variabel cahaya, disertai evaluasi kuantitatif yang membedakan deviasi sensor, deviasi catu, dan keterbatasan instrumen pengukuran.

3. METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan perancangan rekayasa dan pengujian eksperimental pada prototipe. Tahapan kerja meliputi identifikasi kebutuhan, studi literatur, perancangan arsitektur perangkat keras, integrasi komponen, penyusunan logika kendali pada Arduino IDE, pengujian fungsi, pengukuran parameter listrik, dan analisis hasil. Objek uji adalah satu prototipe SOLART yang mengendalikan lampu AC dan mekanisme tirai.

Arsitektur sistem pada Gambar 1 menempatkan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali lokal. Modul LDR-LM393 menerima perubahan cahaya lingkungan dan mengirimkan sinyal sensor ke ESP32. Keputusan pengendalian diteruskan melalui dua jalur: relay satu kanal untuk memutuskan atau menghubungkan lampu AC 5 W dan driver BTS7960 untuk mengatur arah putaran motor DC yang menggerakkan tirai. Tidak terdapat komunikasi cloud atau aplikasi bergerak pada konfigurasi yang diuji.



Gambar 1. Arsitektur perangkat keras dan aliran kendali sistem SOLART.

Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Komponen dipilih berdasarkan fungsi masukan, pemrosesan, pengalihan beban, dan aktuasi mekanis. Perangkat lunak utama adalah Arduino IDE untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke ESP32. Fritzing digunakan pada tahap dokumentasi rangkaian. Daftar komponen esensial dan perannya disajikan pada Tabel 1; peralatan perakitan umum yang tidak berpengaruh langsung terhadap analisis tidak dimasukkan agar metode tetap fokus.

Tabel 1. Komponen utama dan fungsi dalam prototipe SOLART.

No.	Komponen	Fungsi	Antarmuka/ranah listrik
1	ESP32 DevKit V1	Membaca sensor, menjalankan logika ambang, dan mengirim perintah ke aktuator	GPIO logika 3,3 V
2	Modul LDR-LM393	Mendeteksi perubahan cahaya dan menyediakan sinyal masukan	Sinyal sensor ke ESP32
3	Relay satu kanal	Menghubungkan atau memutus lampu AC	Kendali tegangan rendah; kontak beban AC
4	Driver motor BTS7960	Mengatur arah dan daya motor DC	Sinyal arah/PWM dan jalur daya motor
5	Motor DC	Menggerakkan mekanisme buka-tutup tirai	Aktuator elektromekanis
6	Lampu LED 5 W	Beban pencahayaan yang dikendalikan	Jaringan AC nominal 220 V
7	Lux meter dan multimeter digital	Memberikan nilai referensi cahaya dan pengukuran listrik	Instrumen pengujian

Logika Kendali

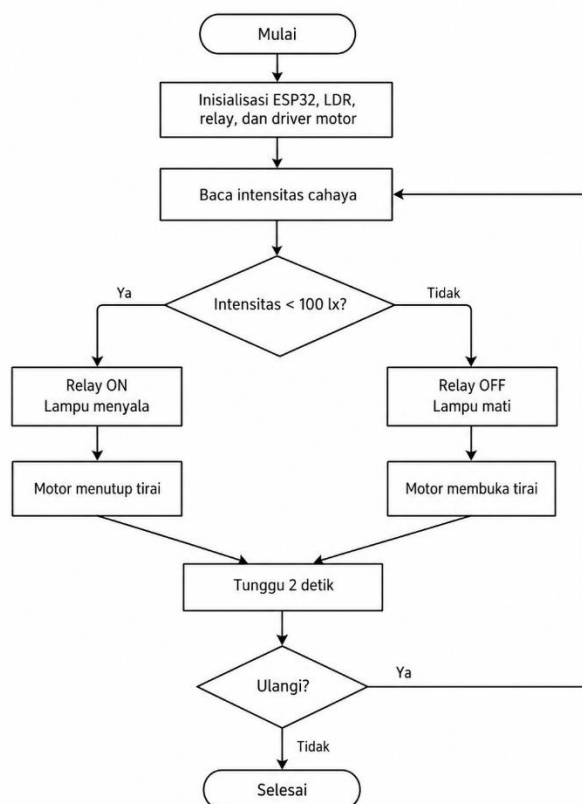
Program membaca kondisi cahaya setiap dua detik. Nilai ambang 100 lx digunakan sebagai titik keputusan pada pengujian. Ketika intensitas berada di bawah 100 lx, sistem

mengaktifkan relay agar lampu menyala dan memerintahkan motor menutup tirai. Ketika intensitas sama dengan atau lebih tinggi dari 100 lx, relay dinonaktifkan dan motor membuka tirai. Alur tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.

Logika ini bersifat deterministic dan biner. Prototipe belum menerapkan hysteresis di sekitar ambang, limit switch untuk memastikan posisi ujung tirai, ataupun manual override. Ketiadaan tiga fungsi tersebut tidak menghambat pengujian konsep, tetapi perlu diperhitungkan sebelum sistem digunakan terus-menerus pada lingkungan hunian.

Prosedur Pengujian dan Analisis Data

Pengujian dibagi menjadi dua kelompok. Pengujian fungsional memeriksa apakah ESP32 dapat membaca masukan sensor, mengendalikan driver BTS7960, dan mengaktifkan atau menonaktifkan relay sesuai program. Pengujian respons cahaya menggunakan dua kondisi yang tersedia dalam data penelitian, yaitu sekitar 70 lx dan 220 lx. Nilai estimasi yang ditampilkan pada Serial Monitor dibandingkan dengan lux meter, kemudian status lampu, posisi tirai, dan resistansi LDR dicatat.



Gambar 2. Diagram alir logika kendali lampu dan tirai.

Pengukuran listrik dilakukan menggunakan multimeter digital pada jalur kendali BTS7960, relay, motor DC untuk dua arah putaran, serta lampu pada kondisi mati dan menyala. Nilai yang diharapkan pada data awal diperlakukan sebagai nilai nominal atau referensi

rancangan, bukan sebagai standar kalibrasi laboratorium. Deviasi relatif dihitung menggunakan Persamaan (1), dengan x_m sebagai nilai terukur dan x_r sebagai nilai referensi.

$$\delta = \frac{\sqrt{((x_m - x_r)^2)}}{x_r} \times 100\% \quad (1)$$

Apabila nilai referensi sama dengan nol, deviasi relatif tidak dihitung karena menghasilkan pembagian dengan nol; kesesuaian dilaporkan secara kategoris. Interpretasi hasil tidak hanya didasarkan pada besarnya deviasi, tetapi juga pada karakter sinyal. Secara khusus, tegangan keluaran driver yang berupa switching atau PWM tidak dapat dinilai sepenuhnya melalui nilai rata-rata multimeter; verifikasi bentuk gelombang memerlukan osiloskop. Jumlah titik uji cahaya yang hanya dua juga membatasi analisis kalibrasi, sehingga penelitian ini tidak menghitung linearitas, repeatability, confidence interval, atau penghematan energi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Fungsional Pengendali

Hasil pengujian fungsional pada Tabel 2 menunjukkan bahwa ketiga jalur utama sistem dapat dijalankan oleh ESP32. Pembacaan sensor berubah mengikuti kondisi cahaya, perintah arah dan penggerakan motor diteruskan melalui BTS7960, dan relay merespons perintah ON/OFF. Dengan demikian, integrasi input-proses-output telah memenuhi fungsi dasar yang dirancang.

Tabel 2. Hasil pengujian fungsional ESP32 dan aktuator.

No.	Aspek uji	Prosedur	Hasil observasi	Status
1	Pembacaan LDR-LM393	Membaca sensor setiap 2 detik dan membandingkan perubahan dengan kondisi terang/gelap	Nilai sensor berubah sesuai perubahan kondisi cahaya	Lulus
2	Kendali BTS7960 dan motor DC	Memberikan perintah putar kanan dan kiri dari ESP32	Motor bergerak pada dua arah sesuai perintah	Lulus
3	Kendali relay satu kanal	Mengirim perintah ON/OFF dari ESP32	Relay beralih dan lampu mengikuti perintah	Lulus

Hasil lulus pada pengujian fungsional membuktikan interoperabilitas komponen, tetapi belum menunjukkan keandalan jangka panjang. Istilah "respons cepat" pada data awal tidak dipertahankan sebagai klaim kuantitatif karena waktu respons belum diukur dengan stopwatch, data logger, atau osiloskop. Demikian pula, kestabilan baru dapat dinilai secara terbatas selama sesi pengujian, bukan sebagai reliability pada operasi berjam-jam atau berhari-hari.

Respons Sensor dan Koordinasi Lampu-Tirai

Tabel 3 memperlihatkan respons sistem pada dua kondisi iluminansi. Pada referensi 70 lx, estimasi Serial Monitor sebesar 71 dan resistansi LDR 11 k Ω . Kondisi tersebut berada di

bawah ambang 100 lx sehingga lampu menyala dan tirai menutup. Pada referensi 220 lx, estimasi sebesar 219 dengan resistansi 3 k Ω ; sistem mematikan lampu dan membuka tirai. Arah perubahan resistansi konsisten dengan karakteristik LDR, yaitu resistansi menurun ketika paparan cahaya meningkat.

Tabel 3. Respons Sensor, Lampu, Dan Tirai Terhadap Intensitas Cahaya.

No.	Lux meter (lx)	Serial Monitor	Deviasi (%)	Resistansi LDR	Lampu	Tirai
1	70	71	1,43	11 k Ω	Menyala	Tertutup
2	220	219	0,45	3 k Ω	Mati	Terbuka

Deviasi relatif sebesar 1,43% dan 0,45% menghasilkan rerata 0,94% pada dua titik uji. Selisih absolut keduanya sama-sama 1 lx. Nilai ini menunjukkan kesesuaian pada kondisi yang diuji, tetapi tidak cukup untuk menyatakan akurasi sensor di seluruh rentang iluminansi. Kalibrasi yang valid memerlukan lebih banyak titik, pengulangan, kontrol posisi dan sudut sensor, serta analisis hubungan antara keluaran LDR dan lux meter.

Koordinasi lampu-tirai merupakan hasil yang lebih penting daripada kedekatan dua angka sensor. Satu keputusan ambang menghasilkan dua aksi yang konsisten: kondisi lebih gelap meningkatkan pencahayaan buatan sekaligus menutup tirai, sedangkan kondisi lebih terang mematikan lampu dan membuka tirai. Pola ini membedakan SOLART dari studi lampu-only (Al Ghifari et al., 2022; Rahmansyah et al., 2023; Hadikusuma et al., 2025) dan gorden-only (Fitriyah et al., 2024; Siregar & Pangaribuan, 2025).

Namun, aturan menutup tirai pada kondisi gelap merepresentasikan asumsi desain tertentu, misalnya kebutuhan privasi pada malam hari. Pada siang hari dengan cuaca mendung, kebijakan tersebut belum tentu optimal karena membuka tirai justru dapat menambah daylight. Artinya, satu sensor lingkungan tanpa informasi waktu, okupansi, atau posisi matahari belum mampu membedakan gelap malam dan gelap akibat cuaca. Implikasi ini menunjukkan bahwa logika biner yang sederhana perlu dikembangkan menjadi aturan kontekstual untuk penerapan nyata.

Hasil Pengukuran Listrik

Data pengukuran listrik digabungkan dalam Tabel 4 agar perbandingan antarsubsystem lebih mudah dibaca. Perhitungan deviasi pada naskah awal diperiksa ulang. Koreksi paling signifikan terdapat pada tegangan kendali BTS7960: selisih antara 3,3 V dan 2,66 V adalah 19,39%, bukan 0,24%. Koreksi ini tidak otomatis berarti driver gagal karena sifat sinyal dan metode pengukuran harus dipertimbangkan.

Tabel 4. Perbandingan Nilai Referensi Dan Hasil Pengukuran Listrik.

Subsistem/kondisi	Parameter	Referensi	Terukur	Deviasi	Interpretasi ringkas
BTS7960	Tegangan kendali	3,3 V	2,66 V	19,39%	Perlu verifikasi osiloskop; multimeter membaca nilai rata-rata sinyal switching/PWM
BTS7960	Arus kendali	0,003 A	0,003 A	0,00%	Sesuai pada resolusi alat
Relay satu kanal	Tegangan catu	5,0 V	5,008 V	0,16%	Dekat dengan nilai nominal
Relay satu kanal	Arus	0,080 A	0,078 A	2,50%	Deviasi kecil terhadap nilai referensi
Motor - arah kanan	Tegangan	1,18 V	1,118 V	5,25%	Dapat dipengaruhi drop tegangan dan beban mekanis
Motor - arah kanan	Arus	0,220 A	0,222 A	0,91%	Dekat dengan nilai referensi
Motor - arah kiri	Tegangan	1,88 V	1,888 V	0,43%	Dekat dengan nilai referensi
Motor - arah kiri	Arus	0,350 A	0,330 A	5,71%	Perbedaan dapat terkait gesekan dan beban arah
Lampu - mati	Tegangan/arus	0 V / 0 A	0 V / 0 A	Sesuai	Kontak relay memutus beban pada pengujian
Lampu - menyala	Tegangan	220 V	234 V	6,36%	Mencerminkan tegangan sumber AC saat uji, bukan kesalahan relay
Lampu - menyala	Arus	0,022 A	0,022 A	0,00%	Sesuai pada resolusi alat

Pembacaan 2,66 V pada jalur kendali BTS7960 dapat terjadi ketika multimeter mengukur nilai rata-rata sinyal PWM, terdapat drop pada jalur, atau duty cycle tidak 100%. Tanpa informasi titik ukur dan bentuk gelombang, nilai tersebut tidak layak dipakai sebagai satu-satunya indikator akurasi driver. Pengujian lanjutan harus merekam level HIGH, frekuensi, duty cycle, dan tegangan keluaran ke motor menggunakan osiloskop. Dengan demikian, penyebab deviasi dapat dibedakan antara karakter sinyal, rugi penghantar, pembebanan, dan kesalahan rangkaian.

Relay menunjukkan tegangan catu 5,008 V dan arus 0,078 A, masing-masing berbeda 0,16% dan 2,50% dari referensi. Selisih tersebut kecil pada konteks prototipe dan tidak mengubah fungsi switching. Walaupun relay berhasil memutus dan menghubungkan lampu, aspek keselamatan beban AC tidak dapat dinilai hanya dari hasil ini. Implementasi permanen memerlukan enclosure, terminal yang terlindungi, jarak isolasi yang memadai, sekering atau proteksi arus lebih, dan pemisahan fisik antara jalur AC dan logika.

Motor memiliki profil tegangan dan arus yang berbeda pada dua arah. Deviasi tegangan 5,25% pada arah kanan dan deviasi arus 5,71% pada arah kiri masih memungkinkan motor bekerja, tetapi perbedaan arah mengindikasikan pengaruh beban mekanis, gesekan mekanisme tirai, sikat motor, atau jalur H-bridge. Karena data torsi, kecepatan, waktu tempuh, dan arus start belum tersedia, penelitian belum dapat menilai efisiensi atau kemampuan motor menghadapi beban tirai yang berbeda.

Tegangan lampu 234 V dibandingkan nominal 220 V menghasilkan deviasi 6,36%. Nilai ini lebih tepat ditafsirkan sebagai kondisi sumber listrik pada saat pengujian daripada error sistem kendali, karena relay hanya bertindak sebagai saklar. Arus 0,022 A sama dengan nilai referensi pada resolusi multimeter. Daya nyata lampu tidak dihitung karena faktor daya dan bentuk gelombang arus tidak diukur; mengalikan tegangan dan arus saja hanya menghasilkan daya semu pada asumsi tertentu.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya dan Implikasi

Dibandingkan sistem LDR untuk penyalaaan lampu, kontribusi SOLART terletak pada koordinasi dua keluaran dengan satu keputusan lokal. Dibandingkan prototipe gorden otomatis, sistem ini menambahkan beban pencahayaan AC dan jalur relay. Dibandingkan sistem smart lighting berbasis IoT, arsitektur SOLART lebih sederhana dan tidak menyediakan monitoring jarak jauh, tetapi tetap dapat bekerja ketika jaringan tidak tersedia. Trade-off tersebut konsisten dengan prinsip edge atau local control yang menempatkan keputusan dekat dengan perangkat (Putrada et al., 2023).

Penelitian smart lighting yang lebih maju menggunakan dimming, banyak sensor, dan optimasi kenyamanan untuk menyesuaikan kecerahan secara lebih halus (Aussat et al., 2022; Mathew et al., 2022; Widartha et al., 2024). Sistem kota cerdas dan master-slave juga dapat mengoordinasikan banyak titik lampu serta layanan jaringan (Lee et al., 2022; Chiradeja & Yoomak, 2023). SOLART tidak menyaingi fungsi tersebut; nilai praktisnya berada pada kesederhanaan arsitektur, biaya implementasi yang berpotensi rendah, dan kemudahan reproduksi untuk pembelajaran atau otomasi ruang skala kecil.

Implikasi terapan hasil penelitian adalah terbentuknya fondasi sistem kendali lampu-tirai yang dapat dikembangkan secara modular. Sensor okupansi dapat mencegah lampu menyala pada ruang kosong; real-time clock dapat membedakan kondisi malam dan mendung; sensor lux terkalibrasi dapat meningkatkan ketertelusuran pengukuran; dan limit switch dapat menghentikan motor pada posisi ujung. Data energi dari smart meter, sebagaimana pendekatan pengukuran pada home energy management system (Munoz et al., 2022), diperlukan untuk membuktikan penghematan yang selama ini baru menjadi potensi.

Penelitian ini memiliki lima keterbatasan utama. Pertama, pengujian cahaya hanya mencakup dua titik tanpa pengulangan. Kedua, waktu respons dan kestabilan jangka panjang tidak dikuantifikasi. Ketiga, posisi akhir tirai tidak diverifikasi dengan sensor batas. Keempat, pengukuran PWM dilakukan menggunakan multimeter, bukan osiloskop. Kelima, konsumsi energi, penghematan, kenyamanan visual, dan penerimaan pengguna tidak diukur.

Keterbatasan tersebut membatasi generalisasi hasil pada proof-of-concept dan harus menjadi prioritas penelitian lanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem SOLART berhasil direalisasikan sebagai prototipe kendali lokal berbasis ESP32 yang mengintegrasikan lampu AC dan tirai otomatis berdasarkan intensitas cahaya lingkungan. Pada 70 lx, lampu menyala dan tirai menutup; pada 220 lx, lampu mati dan tirai membuka. Deviasi estimasi sensor terhadap lux meter sebesar 1,43% dan 0,45% pada dua titik uji. Relay dan motor berfungsi sesuai perintah, dengan sebagian besar deviasi pengukuran di bawah 6%. Deviasi 19,39% pada tegangan kendali BTS7960 tidak boleh diperlakukan langsung sebagai error driver karena pengukuran sinyal switching atau PWM menggunakan multimeter memiliki keterbatasan. Dengan demikian, kontribusi penelitian adalah integrasi fungsional dua aktuator dalam satu sistem tertanam lokal, bukan pembuktian penghematan energi atau akurasi sensor pada rentang luas. Penelitian selanjutnya perlu menambah jumlah titik dan pengulangan kalibrasi, menerapkan hysteresis, manual override, real-time clock, serta limit switch, mengukur waktu respons dan durabilitas, memverifikasi PWM dengan osiloskop, dan menghitung konsumsi energi menggunakan power analyzer atau smart meter. Pengujian pada ruang nyata dengan variasi cuaca, orientasi jendela, beban tirai, dan preferensi pengguna juga diperlukan sebelum penerapan pada hunian.

DAFTAR REFERENSI

- Al Ghifari, F., Anjalni, A., Lestari, D., & Al Faruq, U. (2022). Perancangan dan pengujian sensor LDR untuk kendali lampu rumah. *Jurnal Kumparan Fisika*, 5(2), 85-90. <https://doi.org/10.33369/jkf.5.2.85-90>
- Aussat, Y., Rosmanis, A., & Keshav, S. (2022). A power-efficient self-calibrating smart lighting system. *Energy and Buildings*, 259, 111874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111874>
- Basurto, C., Papinutto, M., Colombo, M., Boghetti, R., Reutter, K., Nembrini, J., & Kämpf, J. H. (2022). Integrating daylight with general and task lighting: A longitudinal in-the-wild study in individual and open space working areas. *Solar Energy Advances*, 2, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100027>
- Chiradeja, P., & Yoomak, S. (2023). Development of public lighting system with smart lighting control systems and Internet of Things (IoT) technologies for smart city. *Energy Reports*, 10, 3355-3372. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.027>
- Fakhrudin, A., Irawan, D., & Agustin, S. (2024). Rancang bangun sistem keamanan pintu rumah berbasis Internet of Things dengan ESP32 dan aplikasi Blynk. *E-Link: Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 19(1), 53-59. <https://doi.org/10.30587/e-link.v19i1.10770>

- Fitriyah, L., Ghofur, A., & Lazim, F. (2024). Rancang bangun prototype sistem buka tutup gorden berbasis mikrokontroller Arduino Uno. *Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, 3, 309-317.
- Hadikusuma, A. W., Firmansyah, I. M., Ailsa, A. S. Y., Hakim, H. R., Faiq, M. A. M., & Hasanah, H. (2025). Sistem lampu otomatis dengan sensor cahaya. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB)*, 572-579. <https://doi.org/10.47701/54xgzz35>
- Kim, C. H., Lee, K. H., & Kim, K. S. (2020). Evaluation of illuminance measurement data through integrated automated blinds and LED dimming controls in a full-scale mock-up. *Energies*, 13(12), 3238. <https://doi.org/10.3390/en13123238>
- Koo, S. Y., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2010). Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings. *Building and Environment*, 45(6), 1508-1520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.12.014>
- Lee, C.-T., Chen, L.-B., Chu, H.-M., Hsieh, C.-J., & Liang, W.-C. (2022). An Internet of Things (IoT)-based master-slave regionalized intelligent LED-light-controlling system. *Applied Sciences*, 12(1), 420. <https://doi.org/10.3390/app12010420>
- Mathew, V., Kurian, C. P., & Augustine, N. (2022). Optimizing daylight glare and circadian entrainment in a daylight-artificial light integrated scheme. *IEEE Access*, 10, 38174-38188. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165023>
- Munoz, O., Ruelas, A., Rosales, P., Acuña, A., Suastegui, A., & Lara, F. (2022). Design and development of an IoT smart meter with load control for home energy management systems. *Sensors*, 22(19), 7536. <https://doi.org/10.3390/s22197536>
- Papinutto, M., Boghetti, R., Colombo, M., Basurto, C., Reutter, K., Lalanne, D., Kämpf, J. H., & Nembrini, J. (2022). Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: An automatic lighting system approach. *Energy and Buildings*, 268, 112176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112176>
- Petkovic, M., Bajovic, D., Vukobratovic, D., Machaj, J., Brida, P., McCutcheon, G., Stankovic, L., & Stankovic, V. (2022). Smart dimmable LED lighting systems. *Sensors*, 22(21), 8523. <https://doi.org/10.3390/s22218523>
- Putrada, A. G., Abdurohman, M., Perdana, D., & Nuha, H. H. (2022). Machine learning methods in smart lighting toward achieving user comfort: A survey. *IEEE Access*, 10, 45137-45178. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169765>
- Putrada, A. G., Abdurohman, M., Perdana, D., & Nuha, H. H. (2023). EdgeSL: Edge-computing architecture on smart lighting control with distilled KNN for optimum processing time. *IEEE Access*, 11, 64697-64712. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288425>
- Rahmansyah, A. I., Masluha, S., Haris, A., & Mauliddiansari, A. T. (2023). Implementation of energy-saving lamp with automatic system using LDR sensor (Light Dependent Resistor) combination at village guard posts and mosques in Probolinggo. *Empowerment Society*, 6(2), 85-92. <https://doi.org/10.30741/eps.v6i2.1082>
- Siregar, K. Y., & Pangaribuan, H. (2025). Desain dan implementasi sistem pengendalian gorden otomatis berbasis Arduino menggunakan sensor Light Dependent Resistor. *Computer and Science Industrial Engineering (COMASIE)*, 12(3), 78-87. <https://doi.org/10.33884/comasiejournal.v12i3.9742>

- Sureshkumar, M. S., Rahul, R., Joshika, S., & Suraj, S. (2024). Internet-of-Things-based smart home energy management system with multi-sensor data fusion. *Engineering Proceedings*, 66(1), 10. <https://doi.org/10.3390/engproc2024066010>
- Widarth, V. P., Ra, I., Lee, S.-Y., & Kim, C.-S. (2024). Advancing smart lighting: A developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 14(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jlpea14010006>
- Xu, B., Hussain, B., Wang, Y., Cheng, H. C., & Yue, C. P. (2022). Smart home control system using VLC and Bluetooth enabled AC light bulb for 3D indoor localization with centimeter-level precision. *Sensors*, 22(21), 8181. <https://doi.org/10.3390/s22218181>
- Zhang, J., Chen, Z., Wang, A., Li, Z., & Wan, W. (2023). Intelligent personalized lighting control system for residents. *Sustainability*, 15(21), 15355. <https://doi.org/10.3390/su152115355>