

Perancangan Dan Simulasi Sistem Lampu Otomatis Berbasis Esp32 Menggunakan Sensor LDR dan PIR untuk Analisis Potensi Penghematan Energi Pada Simulator Wokwi

Yoga Aimar Rosyid^{1*}, Dandi Sunardi², Khairullah³, Dedy Abdullah⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu
Jl. Bali, Kp. Bali, Kec. Tlk. Segara, Kota Bengkulu, Indonesia

e-mail korespondensi: ygaaimar28@gmail.com

Submit: 20-08-2026 | Revisi: 05-09-2026 | Terima: 06-10-2026 | Terbit online: 07-10-2026

Abstrak - Penggunaan lampu yang tidak disesuaikan dengan kondisi pencahayaan lingkungan dan aktivitas pengguna dapat menyebabkan konsumsi energi yang kurang efisien. Penelitian ini bertujuan merancang dan mensimulasikan sistem lampu otomatis berbasis ESP32 menggunakan sensor Light Dependent Resistor (LDR) dan Passive Infrared (PIR), mengevaluasi kinerja sistem dalam merespons kondisi pencahayaan dan gerakan, serta menganalisis potensi penghematan energi menggunakan simulator Wokwi. Penelitian menggunakan metode eksperimen berbasis simulasi dengan pendekatan deskriptif kuantitatif dan model pengembangan Prototype. Sensor LDR digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi terang atau gelap, sedangkan PIR digunakan untuk mendeteksi gerakan. Pengujian black-box dilakukan pada 16 kasus uji yang masing-masing diulang tiga kali sehingga diperoleh 48 pelaksanaan pengujian. Seluruh pengujian menghasilkan keluaran sesuai harapan dengan tingkat keberhasilan 100%. Pada skenario dinamis EN-04, rata-rata durasi nyala lampu sebesar 20,155 detik dari pengamatan 60 detik. Dengan asumsi daya lampu 10 watt, sistem otomatis menghasilkan estimasi konsumsi energi 0,05599 Wh dibandingkan 0,16667 Wh pada sistem konvensional, sehingga diperoleh potensi penghematan sebesar 66,41%. Hasil tersebut merupakan estimasi berbasis simulasi dan bukan pengukuran konsumsi energi aktual pada perangkat fisik.

Kata Kunci: ESP32, Lampu otomatis, LDR, PIR, Penghematan energi

Abstract – The use of lighting that is not adjusted to ambient lighting conditions and user activity may result in inefficient energy consumption. This study aims to design and simulate an ESP32-based automatic lighting system using a Light Dependent Resistor (LDR) sensor and a Passive Infrared (PIR) sensor, evaluate the system's performance in responding to lighting conditions and motion detection, and analyze its potential energy savings using the Wokwi simulator. The study employed a simulation-based experimental method with a descriptive quantitative approach and the Prototype development model. The LDR sensor was used to classify lighting conditions as bright or dark, while the PIR sensor was used to detect motion as a representation of user activity. The system applied an LDR threshold value of 2000 and a 10-second delay mechanism using the `millis()` function. Functional testing was conducted using the black-box testing method on 16 test cases, each repeated three times, resulting in a total of 48 test executions. All 48 test executions produced outputs consistent with the expected responses, resulting in a system success rate of 100%. Verification of the duration-recording mechanism showed a difference of 0 ms between the program results and manual calculations. In the dynamic EN-04 scenario, the lamp operated for an average of 20.155 seconds during a 60-second observation period. Assuming a lamp power of 10 watts, the conventional system required an estimated energy consumption of 0.16667 Wh, whereas the automatic system required 0.05599 Wh, corresponding to an estimated energy reduction of 0.11068 Wh or a potential saving of 66.41%. These findings indicate that the integration of ESP32, LDR, PIR, and a delay mechanism can control lighting according to ambient conditions and detected motion while potentially reducing operating duration and energy consumption. The energy results are simulation-based estimates and do not represent actual energy consumption in a physical implementation.

Keywords: ESP32, Automatic lighting, LDR, PIR, Energy saving

1. Pendahuluan

Energi merupakan sumber daya penting bagi aktivitas rumah tangga, pendidikan, perkantoran, industri, dan fasilitas umum, sehingga peningkatan penggunaan perangkat listrik menuntut pengelolaan energi yang semakin



efisien. International Energy Agency mencatat bahwa sektor bangunan menyumbang sekitar 30 persen permintaan energi global. Kondisi tersebut menegaskan bahwa efisiensi pencahayaan perlu mendapat perhatian, terutama karena efisiensi tidak hanya ditentukan oleh jenis atau daya lampu, tetapi juga oleh durasi pengoperasiannya [1].

Pada sistem konvensional yang mengandalkan sakelar manual, kesesuaian durasi nyala lampu dengan kebutuhan sangat bergantung pada kedisiplinan pengguna. Lampu dapat tetap menyala setelah pengguna meninggalkan ruangan atau ketika cahaya alami sudah mencukupi. Permasalahan ini menunjukkan perlunya pengendalian pencahayaan yang memperhatikan kondisi penggunaan dan efisiensi energi [2]. Lampu pada sistem yang dirancang hanya menyala apabila kondisi diklasifikasikan gelap dan gerakan terdeteksi; pada kondisi terang lampu tetap mati meskipun terdapat gerakan, dan pada kondisi gelap tanpa gerakan lampu juga tetap mati. Setelah gerakan tidak lagi terdeteksi, lampu dipertahankan menyala selama waktu tunda tertentu agar sistem tidak segera mematikan lampu akibat hilangnya deteksi sesaat [3]. Penggunaan Wokwi turut menentukan batas klaim penelitian ini. Simulasi digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara masukan sensor, logika program, respons lampu, dan durasi operasional, bukan untuk mengukur arus, tegangan, daya, atau energi listrik aktual. Oleh karena itu, analisis energi dilakukan menggunakan daya lampu yang diasumsikan dan durasi nyala hasil simulasi, sehingga hasil penelitian dinyatakan sebagai estimasi konsumsi energi dan potensi penghematan energi, bukan sebagai penghematan aktual pada bangunan nyata [4].

Permasalahan tersebut menjadi lebih relevan pada ruang yang penggunaannya tidak berlangsung terus-menerus, karena durasi lampu menyala tidak selalu sebanding dengan kebutuhan pencahayaan. Sistem yang hanya bergantung pada sakelar manual sulit memastikan lampu mati ketika cahaya alami telah mencukupi atau ketika tidak terdapat aktivitas di dalam ruangan. Oleh sebab itu, diperlukan mekanisme pengendalian yang dapat menggabungkan kondisi pencahayaan dan keberadaan aktivitas pengguna sebagai dasar keputusan menyalakan atau mematikan lampu. Kombinasi sensor LDR dan PIR pada mikrokontroler ESP32 memberikan pendekatan yang sesuai untuk kebutuhan tersebut, sedangkan simulasi Wokwi dapat digunakan untuk memverifikasi logika kendali dan durasi operasi sebelum dilakukan implementasi perangkat fisik.

Penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pencahayaan otomatis melalui berbagai pendekatan. Putri dan Habibullah mengombinasikan LDR dan PIR dengan logika AND untuk mengendalikan lampu berdasarkan kondisi cahaya dan gerakan [5]. Penelitian lain mengenai sistem pencahayaan otomatis menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler dan sensor cahaya dapat digunakan untuk mengatur kondisi lampu secara otomatis sesuai masukan lingkungan [6]. Penelitian berbasis sensor pencahayaan dan okupansi juga menunjukkan bahwa kombinasi masukan lingkungan dapat digunakan sebagai dasar pengendalian pencahayaan otomatis [7]. Akrasakis dan Tsikalakis menunjukkan bahwa pengendalian berbasis okupansi dan cahaya alami dapat menghasilkan penghematan energi pada bangunan pendidikan [8].

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat ruang penelitian untuk mengintegrasikan pengujian fungsional berbasis simulasi dengan evaluasi energi yang bertumpu pada durasi nyala, sekaligus membedakan secara tegas hasil simulasi dari pengukuran fisik. Kebaruan penelitian ini tidak terletak pada penciptaan sensor atau mikrokontroler baru, melainkan pada penerapan dan metode evaluasinya: sistem ESP32–LDR–PIR diuji melalui skenario black-box pada Wokwi, dan keluaran dinilai tidak hanya dari keberhasilan lampu menyala atau mati, tetapi juga dari durasi operasional yang digunakan sebagai dasar estimasi potensi penghematan energi [9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dirumuskan untuk menjawab tiga pertanyaan, yaitu bagaimana merancang dan menyimulasikan sistem lampu otomatis berbasis ESP32 menggunakan sensor LDR dan PIR pada simulator Wokwi; bagaimana kinerja sistem dalam merespons kombinasi kondisi pencahayaan dan deteksi gerakan pada berbagai skenario pengujian; dan berapa besar potensi penghematan energi sistem otomatis dibandingkan dengan sistem konvensional berdasarkan perbandingan durasi nyala lampu. Penelitian dibatasi pada satu unit ESP32, satu sensor LDR, satu sensor PIR, dan satu lampu virtual yang seluruhnya disimulasikan pada Wokwi tanpa perakitan maupun pengujian perangkat fisik, tanpa membahas kendali melalui aplikasi seluler, internet, cloud, pengaturan intensitas lampu, maupun analisis biaya dan keandalan komponen [10].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen berbasis simulasi dengan pendekatan deskriptif kuantitatif. Metode eksperimen digunakan karena penelitian memberikan perlakuan berupa perubahan kondisi pencahayaan dan status deteksi gerakan, kemudian mengamati respons sistem lampu otomatis, sedangkan pendekatan deskriptif kuantitatif digunakan untuk menyajikan hasil pengujian dalam bentuk angka, tabel, persentase, dan uraian sistematis tanpa statistik inferensial, karena tujuan penelitian bukan generalisasi terhadap populasi melainkan mendeskripsikan kinerja sistem pada skenario simulasi yang ditetapkan.[11]

Tahapan penelitian dilaksanakan secara berurutan mulai dari memperoleh data dan bahan sampai penyelesaian analisis. Tahap pertama adalah identifikasi kebutuhan dan pengumpulan data/bahan, yaitu menentukan ESP32, sensor LDR, sensor PIR, LED virtual, resistor, parameter ambang pencahayaan, serta data hasil simulasi yang diperlukan. Tahap kedua adalah perancangan awal dan konfigurasi rangkaian pada Wokwi, termasuk penentuan koneksi GPIO dan logika kendali. Tahap ketiga adalah pembangunan prototipe dan implementasi program menggunakan Arduino Framework dengan fungsi millis() untuk mekanisme waktu tunda. Tahap keempat adalah

pengujian fungsional menggunakan 16 kasus uji yang masing-masing diulang tiga kali. Tahap kelima adalah pencatatan durasi nyala lampu pada skenario EN-01 sampai EN-04, masing-masing dengan tiga pengulangan selama 60 detik. Tahap keenam adalah pengolahan data, meliputi perhitungan tingkat keberhasilan, verifikasi durasi, estimasi konsumsi energi, dan potensi penghematan energi. Tahap terakhir adalah analisis hasil, pembahasan keterbatasan simulasi, penarikan kesimpulan, dan penyusunan rekomendasi penelitian selanjutnya.

Objek penelitian adalah sistem lampu otomatis berbasis ESP32 yang disimulasikan pada Wokwi, terdiri atas ESP32 sebagai pengendali, LDR sebagai masukan kondisi pencahayaan, PIR sebagai masukan deteksi gerakan, LED virtual sebagai keluaran, kode program berbasis Arduino Framework, serta Serial Monitor sebagai media pengamatan data. Data primer diperoleh dari simulasi, meliputi nilai LDR, klasifikasi terang atau gelap, status PIR, status lampu, waktu perubahan status, durasi setiap periode nyala, total durasi, keluaran yang diharapkan, keluaran aktual, dan status keberhasilan. Data sekunder berasal dari buku, jurnal, dokumentasi resmi ESP32 dan Wokwi, regulasi konservasi energi, serta referensi mengenai sensor dan efisiensi pencahayaan.[12]

Model pengembangan sistem yang digunakan adalah Prototype jenis evolutionary prototyping, karena beberapa parameter teknis seperti konfigurasi pin, nilai ambang LDR, waktu tunda, logika perubahan status, format Serial Monitor, dan mekanisme pencatatan durasi perlu dievaluasi setelah prototipe awal dijalankan. Tahapan pengembangan meliputi identifikasi kebutuhan, perencanaan cepat, pemodelan/perancangan awal, pembangunan prototipe, pengujian/evaluasi, perbaikan/iterasi, hingga penetapan prototipe akhir yang siap untuk pengujian utama [13].

Pengujian fungsional dilakukan dengan metode black-box testing, yaitu membandingkan keluaran aktual dengan keluaran yang diharapkan tanpa menjadikan struktur baris kode sebagai fokus utama. Terdapat 16 kasus uji (UJ-01 sampai UJ-16) yang mencakup fungsi dasar, nilai batas LDR, mekanisme waktu tunda, perubahan kondisi pencahayaan, dan pencatatan durasi. Setiap kasus diulang tiga kali sehingga diperoleh 48 pelaksanaan pengujian ($J_t = 16 \times 3 = 48$). Selain itu, digunakan empat skenario operasional (EN-01 sampai EN-04) untuk mencatat data durasi nyala lampu, masing-masing diulang tiga kali dengan kondisi awal yang sama[14].

Tingkat keberhasilan sistem dihitung dari proporsi pengujian yang menghasilkan keluaran sesuai harapan, $K = (J_b / J_t) \times 100\%$, dengan J_b sebagai jumlah pengujian berhasil dan J_t sebagai jumlah seluruh pengujian. Durasi setiap periode nyala dihitung dari selisih waktu lampu mati dan waktu lampu mulai menyala ($\Delta t_i = \text{toff},i - \text{ton},i$), dan total durasi diperoleh dengan menjumlahkan seluruh periode nyala ($t_{\text{total}} = \sum \Delta t_i$). Estimasi energi dihitung menggunakan rumus $E = P \times t$, dengan P sebagai daya lampu yang diasumsikan sebesar 10 watt, sedangkan potensi penghematan energi dihitung dengan $PE = ((E_k - E_o) / E_k) \times 100\%$, dengan E_k sebagai energi sistem konvensional dan E_o sebagai energi sistem otomatis pada periode pengamatan yang sama[15].

Sistem diimplementasikan menggunakan ESP32 DevKit v1, dengan LDR terhubung pada GPIO34 sebagai masukan analog, PIR terhubung pada GPIO27 sebagai masukan digital, dan LED terhubung pada GPIO25 melalui resistor 220 Ω sebagai keluaran digital yang merepresentasikan status lampu. Program menggunakan Arduino Framework dengan mekanisme millis() untuk menjalankan waktu tunda secara nonblok, sehingga sensor tetap dapat dibaca selama masa tunda berlangsung. Parameter utama yang dikunci sebelum pengujian utama meliputi ambang LDR sebesar 2000 ($ADC \geq 2000$ diklasifikasikan gelap, $ADC < 2000$ diklasifikasikan terang), waktu tunda 10 detik, durasi satu pengujian 60 detik, dan jumlah pengulangan tiga kali untuk setiap kasus maupun skenario.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Fungsional

Pengujian fungsional dilaksanakan terhadap 16 kasus uji yang masing-masing diulang tiga kali, sehingga diperoleh 48 pelaksanaan pengujian. Seluruh 48 pelaksanaan menghasilkan keluaran yang sesuai dengan respons yang diharapkan, sehingga tingkat keberhasilan sistem $K = (48/48) \times 100\% = 100\%$, dengan konsistensi 100% pada seluruh kasus uji UJ-01 sampai UJ-16. Ringkasan hasil pengujian fungsional disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan hasil pengujian fungsional

Indikator	Hasil
Jumlah pelaksanaan pengujian	48
Jumlah berhasil	48
Jumlah gagal	0
Tingkat keberhasilan (K)	100%

Indikator	Hasil
Konsistensi tiap kasus (UJ-01–UJ-16)	100%
Klasifikasi LDR (ambang 2000)	Sesuai
Respons PIR dan logika lampu	Sesuai
Waktu tunda (10.000 ms)	Sesuai/terverifikasi
Pencatatan durasi vs. hitung manual	Sesuai; selisih 0 ms

Hasil fungsi dasar menunjukkan bahwa lampu hanya menyala ketika kondisi gelap dan gerakan terdeteksi, sedangkan kondisi terang tetap memprioritaskan lampu mati meskipun PIR bernilai HIGH. Pengujian nilai batas LDR sesuai dengan aturan ambang 2000: nilai ADC di bawah 2000 diklasifikasikan terang, sedangkan nilai sama dengan atau di atas 2000 diklasifikasikan gelap. Mekanisme waktu tunda 10.000 ms juga terverifikasi, yaitu lampu tetap menyala ketika PIR kembali LOW selama waktu tunda belum selesai dan mati setelah waktu tunda tercapai, sementara gerakan baru sebelum waktu tunda selesai memperbarui riwayat gerakan tanpa membentuk periode nyala baru.

Pemeriksaan ketepatan pencatatan durasi pada kasus UJ-14 sampai UJ-16 menunjukkan bahwa durasi yang dicatat program identik dengan hasil perhitungan manual pada seluruh pengulangan, dengan selisih 0 ms. UJ-14 mencatat satu periode nyala 15.000 ms pada setiap pengulangan, UJ-15 mengakumulasi beberapa periode nyala menjadi sekitar 30.000 ms, sedangkan UJ-16 menutup periode terakhir pada batas 60.000 ms dengan durasi bervariasi antara 9.717 ms hingga 14.584 ms. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme pencatatan dan akumulasi durasi bekerja sesuai rancangan.

3.2. Hasil Pencatatan Durasi Nyala Lampu

Pencatatan durasi dilakukan berdasarkan transisi status lampu pada empat skenario operasional (EN-01 sampai EN-04), masing-masing diulang tiga kali dengan durasi pengamatan 60 detik. Rekapitulasi durasi nyala lampu disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi rata-rata durasi nyala lampu per skenario

Skenario	Rata-rata Durasi Nyala	Persentase Menyala
EN-01 (terang, gerakan diabaikan)	0 ms	0,00%
EN-02 (gelap, tanpa gerakan)	0 ms	0,00%
EN-03 (gelap, gerakan berselang)	29.999 ms	50,00%
EN-04 (kondisi dinamis)	20.155 ms	33,59%

EN-01 dan EN-02 tidak menghasilkan waktu nyala lampu karena kondisi terang (EN-01) dan tidak adanya gerakan pada kondisi gelap (EN-02) sama-sama membuat lampu tetap mati. EN-03, yang mensimulasikan kondisi gelap dengan gerakan berselang, menghasilkan rata-rata durasi nyala 29.999 ms atau sekitar separuh waktu pengamatan. EN-04, sebagai skenario dinamis yang menggabungkan perubahan terang–gelap–terang beserta gerakan pada beberapa fase, menghasilkan rata-rata durasi nyala 20.155 ms atau sekitar 33,59% dari total waktu pengamatan, dan digunakan sebagai gambaran utama karena paling mendekati pola penggunaan yang bervariasi.

3.3. Estimasi Potensi Penghematan Energi

Estimasi energi dihitung menggunakan durasi nyala hasil simulasi dan daya lampu asumsi sebesar 10 watt, dengan sistem konvensional dimodelkan sebagai lampu manual yang menyala sepanjang periode pengamatan 60 detik ($E_k = 10 \times (60/3600) = 0,16667$ Wh). Hasil estimasi energi dan potensi penghematan pada tiap skenario disajikan pada Tabel 3.

Hasil estimasi menunjukkan bahwa potensi penghematan energi bervariasi sesuai skenario operasional. EN-01 dan EN-02 menghasilkan potensi penghematan 100,00% karena lampu tidak menyala sama sekali selama pengamatan, sedangkan EN-03 menghasilkan potensi penghematan 50,00%. Skenario dinamis EN-04, yang paling mewakili variasi kondisi terang, gelap, gerakan, dan waktu tunda secara bersamaan, menghasilkan estimasi energi otomatis sebesar 0,05599 Wh dibandingkan energi sistem konvensional 0,16667 Wh, sehingga diperoleh pengurangan energi sebesar 0,11068 Wh atau potensi penghematan sebesar 66,41%. Perbedaan potensi penghematan antarskenario terutama berasal dari perbedaan durasi nyala, karena daya lampu pembanding dibuat sama pada seluruh skenario.

Tabel 3. Rekapitulasi estimasi energi dan potensi penghematan energi

Skenario	Ek (Wh)	Eo (Wh)	ΔE (Wh)	PE (%)
EN-01	0,16667	0,00000	0,16667	100,00
EN-02	0,16667	0,00000	0,16667	100,00
EN-03	0,16667	0,08333	0,08334	50,00
EN-04	0,16667	0,05599	0,11068	66,41

Nilai penghematan tersebut perlu ditafsirkan sebagai estimasi berbasis perbedaan durasi nyala dalam simulasi. Penelitian ini tidak mengukur konsumsi energi perangkat fisik secara langsung dan tidak memasukkan daya ESP32, LDR, PIR, maupun komponen pendukung lainnya, sehingga hasil tidak dapat langsung digeneralisasikan menjadi besaran penghematan aktual pada bangunan nyata. Hasil penelitian berlaku pada konfigurasi dan skenario simulasi yang digunakan, yaitu ambang LDR 2000, waktu tunda 10 detik, durasi pengamatan 60 detik, dan tiga kali pengulangan, sehingga diposisikan sebagai bukti fungsional dan estimasi potensi penghematan energi berbasis durasi nyala lampu, bukan sebagai pengukuran energi aktual pada instalasi fisik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan tiga hal utama. Pertama, sistem lampu otomatis berbasis ESP32 menggunakan sensor LDR dan PIR berhasil dirancang dan disimulasikan pada simulator Wokwi, dengan logika kendali yang menetapkan lampu menyala hanya ketika kondisi gelap dan gerakan terdeteksi, ambang LDR sebesar 2000, serta waktu tunda 10 detik yang diterapkan menggunakan fungsi millis() agar pembacaan sensor tetap berjalan secara nonblokir. Kedua, kinerja sistem pada pengujian fungsional menunjukkan hasil yang sesuai dengan rancangan. Dari 48 pelaksanaan pengujian pada 16 kasus uji, seluruhnya menghasilkan keluaran yang sesuai dengan hasil yang diharapkan, sehingga tingkat keberhasilan sistem mencapai 100% dengan konsistensi 100% pada seluruh kasus uji, dan pemeriksaan pencatatan durasi menghasilkan selisih 0 ms terhadap perhitungan manual. Ketiga, potensi penghematan energi berbeda sesuai skenario operasional yang diuji. Dengan asumsi daya lampu 10 watt, diperoleh potensi penghematan sebesar 100,00% pada EN-01 dan EN-02, 50,00% pada EN-03, serta 66,41% pada skenario dinamis EN-04, dengan rata-rata durasi nyala 20,155 detik, estimasi energi otomatis 0,05599 Wh, dan pengurangan energi 0,11068 Wh dibandingkan sistem konvensional. Nilai tersebut merupakan estimasi berdasarkan durasi nyala pada simulasi Wokwi dan daya lampu asumsi, bukan hasil pengukuran konsumsi energi listrik aktual pada perangkat fisik.

Penelitian selanjutnya disarankan mengimplementasikan sistem pada perangkat fisik menggunakan ESP32, LDR, PIR, rangkaian pengendali atau relai, dan lampu nyata untuk mengevaluasi kinerja sistem di luar lingkungan simulasi; melakukan kalibrasi sensor pada kondisi pencahayaan, jarak, dan pola gerakan yang lebih beragam; menggunakan pengukuran arus, tegangan, daya, dan energi secara langsung termasuk konsumsi daya ESP32 dan sensor pendukung; memperluas periode pengujian pada lingkungan penggunaan nyata; serta mempertimbangkan pengembangan lanjutan berupa pengaturan intensitas lampu (dimming), pengendalian beberapa zona pencahayaan, atau pemantauan berbasis jaringan.

Referensi

- [1] International Energy Agency, "Energy Efficiency 2025," Paris, France: IEA, 2025.
- [2] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi," Jakarta, Indonesia, 2023.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 6197:2020 Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan," Jakarta, Indonesia, 2020.
- [4] Wokwi, "ESP32 Simulation," Wokwi Documentation, 2026.
- [5] A. Y. Putri and Habibullah, "Automated building lighting control by using R3 Arduino Uno," *Journal of Industrial Automation and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 152–158, 2025, doi: 10.24036/jiaee.v2.i2.pp152-158.
- [6] T. Muankhaw, S. Ngaemngam, N. Thangpreecharparnich, N. Phankong, P. Tang-On, A. Phromdang, and M. Srikaewsai, "An Automatic Lighting Control System in Building Using Daylight and Artificial Lighting Integration for Energy Savings," *Frontiers in Engineering Innovation Research*, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 2023.

- [7] K. R. Wagiman, M. N. Abdullah, M. Y. Hassan, and N. H. M. Radzi, "A review on sensing-based strategies of interior lighting control system and their performance in commercial buildings," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 16, no. 1, pp. 208–215, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v16.i1.pp208-215.
- [8] S. Akraakis and A. G. Tsikalakis, "Corridor lighting retrofit based on occupancy and daylight sensors: implementation and energy savings compared to LED lighting," *Advances in Building Energy Research*, vol. 12, no. 2, pp. 274–288, 2018, doi: 10.1080/17512549.2017.1325399.
- [9] V. R. M. Lo Verso and A. Pellegrino, "Energy Saving Generated Through Automatic Lighting Control Systems According to the Estimation Method of the Standard EN 15193-1," *Journal of Daylighting*, vol. 6, no. 2, pp. 131–147, 2019, doi: 10.15627/jd.2019.13.
- [10] M. Papinutto, R. Boggetti, M. Colombo, C. Basurto, K. Reutter, D. Lalanne, J. H. Kämpf, and J. Nembrini, "Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: An automatic lighting system approach," *Energy and Buildings*, vol. 268, Art. no. 112176, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112176.
- [11] R. S. Pressman and B. R. Maxim, *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [12] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," Version 5.2, Espressif Systems, 2025.
- [13] J. R. K. Setiabudi, "Simulasi Numerik dan Implementasi Prototipe Sistem Pemantauan Suhu Tubuh Real-Time Berbasis ESP32-MQTT pada Simulator Wokwi," *JISEM*, vol. 1, no. 2, 2026, doi: 10.33508/jisem.v1i02.7381.
- [14] A. Harahap, H. Hamdani, and A. Dani, "Automatic Power Transfer Control System Using ESP 32 Based on Wokwi Simulation," *Jurnal Info Sains: Informatika dan Sains*, 2026.
- [15] R. Dzaky, M. A. Syari, and H. Khair, "Design and Development of IoT-Based Smart Street Lighting with Lighting Level Adjustment Based on Environmental Sensors," *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications*, vol. 5, no. 3, 2026, doi: 10.59934/jaiea.v5i3.2430