

Monitoring dan Kendali Penerangan Jalan Umum (PJU) Berbasis Long Range (LORA)

Nur Ana Fitriah¹, Widi Aribowo², Ayusta Lukita Wardani³, Alfariid Hendro Yuwono⁴

¹ Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

² Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

³ Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

⁴ Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Article Info

Article history:

Diterima 24 Juni 2026

Direvisi 26 Juni 2026

Diterbitkan 30 Juni 2026

Keywords:

PJU

IoT

ESP32

Monitoring

LoRa

ABSTRAK

Penerangan Jalan Umum (PJU) memerlukan sistem monitoring dan kendali yang mampu beroperasi secara efisien serta dapat dipantau dari jarak jauh. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kendali PJU berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan teknologi Long Range (LoRa). Sistem dikembangkan menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama, modul LoRa SX1278 sebagai media komunikasi, sensor LDR sebagai pendeteksi intensitas cahaya, RTC sebagai pengatur jadwal operasi lampu, dan relay sebagai aktuator. Data monitoring ditampilkan melalui Node-RED, disimpan pada Google Sheet, serta diintegrasikan dengan WhatsApp Bot untuk memudahkan pemantauan sistem. Pengujian dilakukan terhadap fungsi kendali manual, kendali berbasis RTC, kendali berbasis sensor LDR, serta performa komunikasi LoRa berdasarkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI). Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh metode kendali memperoleh tingkat keberhasilan sebesar 100%. Pengujian komunikasi LoRa menghasilkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 97,14%, dengan performa komunikasi yang stabil hingga jarak 200 meter. Nilai RSSI mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak, dari -31 dBm pada jarak 50 meter menjadi -91 dBm pada jarak 300 meter, sedangkan pada jarak 350 meter komunikasi tidak berhasil dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring dan kendali PJU secara andal serta mendukung pengoperasian lampu secara otomatis maupun manual.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Nur Ana Fitriah

Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: nur.19026@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan salah satu fasilitas infrastruktur yang berfungsi untuk meningkatkan keselamatan dan keamanan pengguna jalan pada malam hari [1]. Keberadaan PJU juga mendukung aktivitas masyarakat serta meningkatkan kualitas lingkungan pada kawasan permukiman maupun perkotaan [2]. Oleh karena itu, keandalan sistem penerangan jalan menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan agar lampu dapat beroperasi sesuai kebutuhan pengguna. Meningkatnya konsumsi energi listrik mendorong perlunya pengelolaan PJU yang lebih efisien [3]. Salah satu upaya yang dilakukan adalah penerapan sistem penerangan cerdas yang mampu mengatur waktu operasi lampu secara otomatis dan meminimalkan penggunaan energi yang tidak diperlukan [4]. Namun, pada praktiknya masih banyak sistem PJU yang mengandalkan kendali berbasis photocell atau timer secara terpisah [5]. Pendekatan tersebut relatif sederhana, tetapi kurang fleksibel ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan atau kebutuhan pengoperasian

tertentu. Penggunaan kendali berbasis waktu saja juga belum mampu menyesuaikan kondisi pencahayaan aktual yang dipengaruhi oleh cuaca maupun faktor lingkungan lainnya [6].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali otomatis berbasis sensor cahaya dapat membantu proses penyalan dan pemadaman lampu secara mandiri [8]. Akan tetapi, ketergantungan terhadap satu metode kendali berpotensi menyebabkan sistem tidak bekerja optimal ketika sensor mengalami gangguan atau kondisi lingkungan berubah secara signifikan [7]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu mengombinasikan beberapa metode kendali sehingga keputusan operasi lampu menjadi lebih adaptif dan andal.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan proses monitoring dan pengendalian perangkat dilakukan secara jarak jauh melalui jaringan komunikasi data [9]. Penerapan IoT pada sistem penerangan jalan memberikan kemudahan bagi operator dalam memantau kondisi lampu secara real-time tanpa harus melakukan pemeriksaan langsung di lapangan [10]. Untuk mendukung komunikasi data pada area yang luas, teknologi Long Range (LoRa) menjadi salah satu alternatif yang banyak digunakan karena memiliki jangkauan komunikasi yang panjang dengan konsumsi daya yang relatif rendah [11]. Karakteristik tersebut menjadikan LoRa sesuai diterapkan pada sistem PJU yang umumnya tersebar pada berbagai lokasi dengan jarak yang berjauhan [12]. Implementasi LoRa pada sistem monitoring dan kendali telah banyak dikembangkan pada berbagai aplikasi berbasis IoT, termasuk sistem penerangan jalan [13]. LoRa merupakan salah satu teknologi Low Power Wide Area Network (LPWAN) yang dirancang untuk mendukung komunikasi perangkat IoT dengan konsumsi daya rendah dan cakupan komunikasi yang luas [16]. Teknologi LPWAN memungkinkan perangkat IoT beroperasi dalam waktu yang lama menggunakan sumber daya yang terbatas sehingga sesuai untuk aplikasi monitoring infrastruktur [17]. Berbagai penelitian internasional menunjukkan bahwa LoRa telah berhasil diterapkan pada berbagai aplikasi smart city, seperti monitoring lingkungan, pertanian cerdas, dan sistem penerangan jalan [18]. Kinerja komunikasi LoRa dipengaruhi oleh faktor seperti jarak transmisi, hambatan propagasi sinyal, serta interferensi lingkungan yang dapat memengaruhi keberhasilan pengiriman data [19]. Oleh karena itu, parameter Received Signal Strength Indicator (RSSI) banyak digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kualitas sinyal dan keandalan komunikasi pada jaringan LoRa [20]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa pengujian RSSI mampu menggambarkan kualitas komunikasi LoRa pada berbagai variasi jarak dan kondisi lingkungan sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan transmisi data pada implementasi sistem monitoring [15]. Berdasarkan kajian tersebut, masih ditemukan keterbatasan pada penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menerapkan satu metode kendali atau berfokus pada fungsi monitoring saja.

Penelitian ini mengusulkan sistem monitoring dan kendali Penerangan Jalan Umum berbasis LoRa yang mengintegrasikan kendali manual, kendali berbasis Real Time Clock (RTC), dan kendali berbasis sensor Light Dependent Resistor (LDR) dalam satu arsitektur sistem. Selain menyediakan fasilitas monitoring melalui Node-RED, Google Sheet, dan WhatsApp Bot, penelitian ini juga menerapkan mekanisme prioritas kendali untuk menentukan operasi lampu ketika beberapa kondisi aktif secara bersamaan. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan keberhasilan kendali, keberhasilan pencatatan data, dan kualitas komunikasi LoRa berdasarkan nilai RSSI sehingga dapat diketahui tingkat keandalan sistem yang dikembangkan.

2. METODA

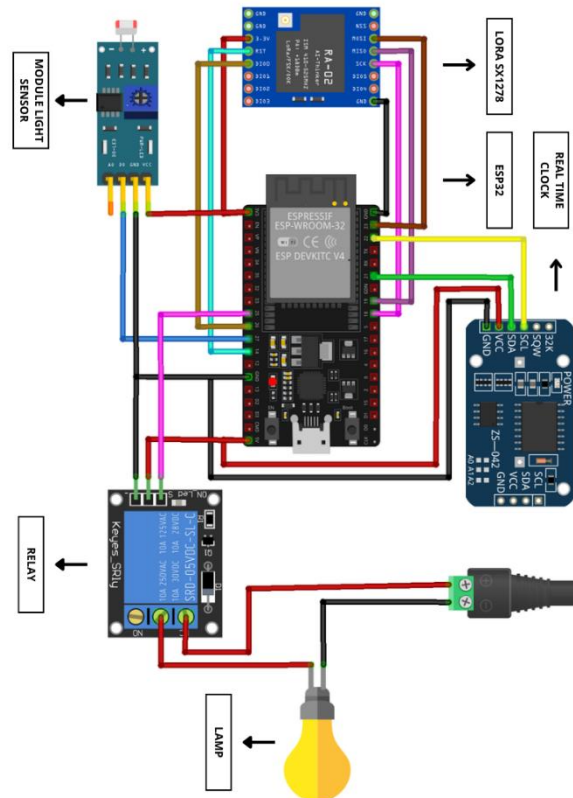
2.1 Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini merupakan sistem monitoring dan kendali Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan komunikasi Long Range (LoRa). Sistem menerapkan tiga metode kendali, yaitu kendali manual jarak jauh, kendali berbasis waktu menggunakan Real Time Clock (RTC), dan kendali berbasis intensitas cahaya menggunakan sensor LDR dengan mekanisme prioritas kendali. Mikrokontroler berfungsi sebagai pusat pengolah data dan pengendali logika sistem, sedangkan modul LoRa digunakan untuk komunikasi data antara perangkat pemancar dan penerima. Data operasional berupa status lampu dan informasi monitoring dikirimkan melalui LoRa dan ditampilkan pada dashboard Node-RED serta disimpan pada Google Sheet sebagai basis data. Selain itu, sistem terintegrasi dengan WhatsApp Bot untuk memudahkan proses monitoring jarak jauh.

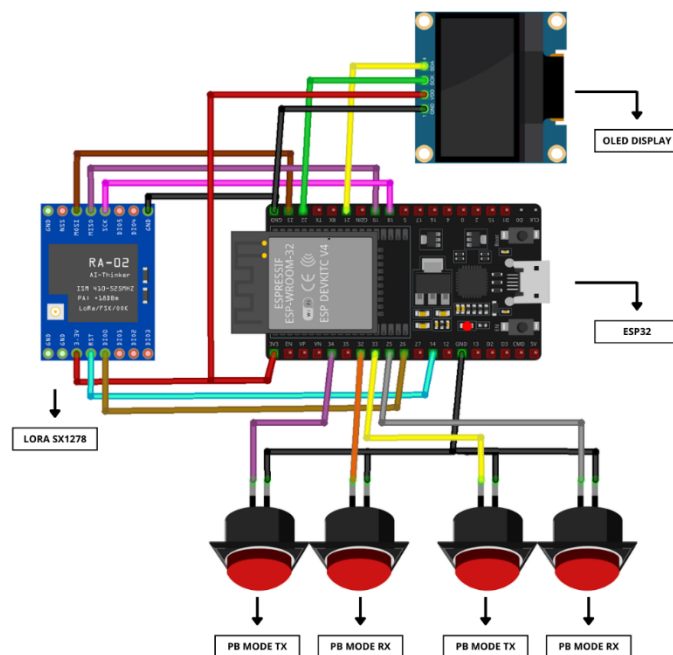
2.1.1 Skema Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan skema perangkat transmitter yang berfungsi sebagai node pengendali Penerangan Jalan Umum (PJU). Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat pengolah data yang terhubung dengan modul LoRa SX1278, modul Real Time Clock (RTC) DS3231, sensor cahaya LDR, dan relay sebagai aktuator. Modul LoRa digunakan untuk mengirimkan informasi status sistem serta menerima perintah kendali melalui komunikasi nirkabel jarak jauh, sedangkan RTC berfungsi sebagai sumber referensi waktu untuk mendukung pengoperasian lampu berdasarkan jadwal yang telah ditentukan. Sensor LDR digunakan untuk

mendeteksi intensitas cahaya lingkungan sehingga sistem dapat membedakan kondisi siang dan malam secara otomatis. Data dari sensor dan RTC diproses oleh ESP32 untuk menentukan status operasi lampu berdasarkan mekanisme prioritas kendali yang diterapkan. Selanjutnya, relay digunakan untuk menghubungkan atau memutus suplai daya ke lampu sesuai keputusan yang dihasilkan oleh sistem. Melalui konfigurasi tersebut, node transmitter mampu melakukan kendali lampu secara otomatis maupun manual sekaligus mengirimkan data monitoring ke perangkat receiver berbasis LoRa.



Gambar 2 Skema Perancangan Transmitter

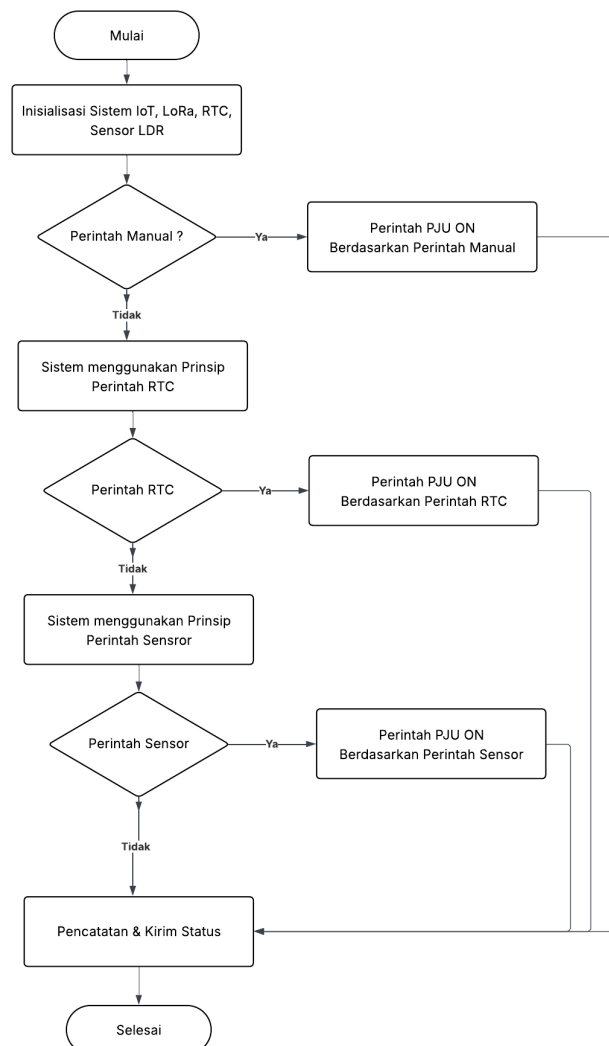


Gambar 1 Skema Perancangan Receiver

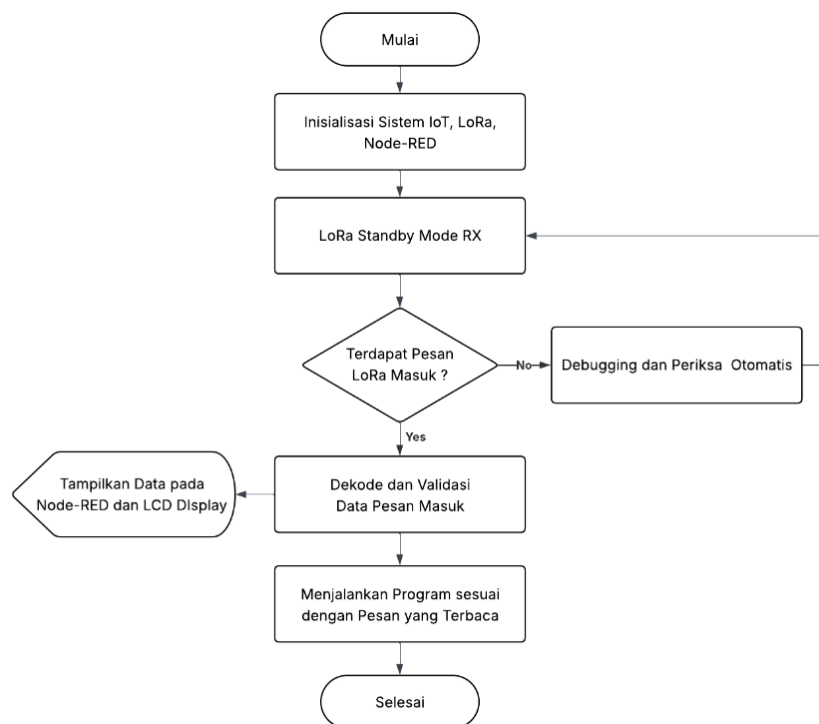
Gambar 2 menunjukkan rangkaian perangkat receiver yang digunakan sebagai pusat monitoring dan kendali sistem PJU. Perangkat ini terdiri dari ESP32, modul LoRa SX1278, OLED display, dan beberapa push button sebagai input pengguna. ESP32 berfungsi menerima data dari node transmitter melalui komunikasi LoRa, kemudian mengolah dan menampilkan informasi kondisi sistem pada OLED display. Informasi yang ditampilkan meliputi status lampu dan mode operasi yang sedang digunakan. Selain untuk monitoring, perangkat receiver juga digunakan sebagai media kendali manual. Push button yang tersedia digunakan untuk memilih mode operasi serta mengirimkan perintah kendali ke node transmitter. Perintah yang diberikan pengguna akan diteruskan melalui LoRa dan dieksekusi pada sisi transmitter untuk mengatur kondisi lampu sesuai kebutuhan. Dengan adanya perangkat receiver, proses pemantauan dan pengendalian sistem dapat dilakukan secara lebih mudah tanpa harus berinteraksi langsung dengan unit lampu. Data yang diterima dari transmitter dapat ditampilkan secara real-time sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem dan memastikan proses kendali berjalan dengan baik

2.1.2 Prosedur Operasional Alat

Prosedur operasional jalannya sistem dari pengiriman data melalui perangkat transmitter kemudian diterima oleh perangkat receiver dijelaskan pada Gambar 3 dan 4 sebagai berikut:



Gambar 3 Flowchart Perangkat Transmitter



Gambar 4 Flowchart Perangkat Receiver

2.4 Metode Pengujian dan Pengambilan Data

2.4.1 Pengujian Keberhasilan Kendali dan Monitoring PJU

Pengujian persentase keberhasilan kendali dan monitoring PJU dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mengeksekusi perintah berdasarkan tiga metode kendali, yaitu manual melalui push button, kendali waktu menggunakan RTC, serta kendali otomatis berbasis sensor cahaya (LDR). Setiap metode diuji sebanyak 10 kali percobaan dengan parameter pengamatan berupa kesesuaian respon lampu terhadap perintah yang diberikan serta keberhasilan pengiriman data status ke sistem monitoring. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu bekerja sesuai dengan logika kendali yang telah dirancang.

$$\text{Presentase keberhasilan (\%)} = \frac{\text{Jumlah berhasil}}{\text{Jumlah percobaan}} \quad (1)$$

2.4.2 Pengujian LoRa dengan RSSI

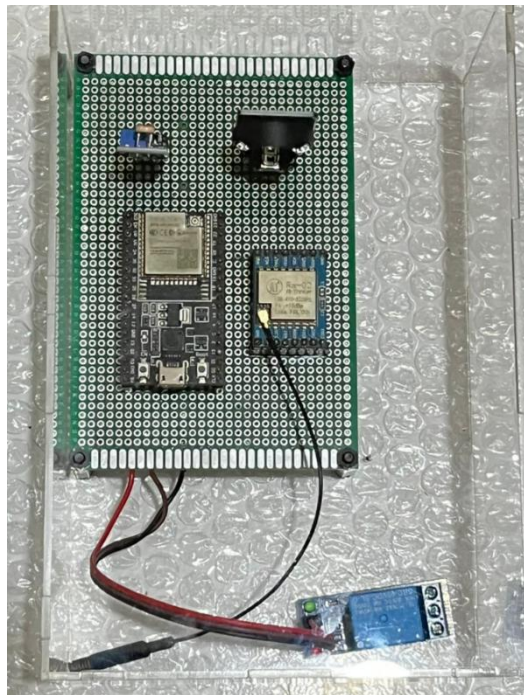
Pengujian keberhasilan komunikasi LoRa berdasarkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam proses pengiriman dan penerimaan data pada berbagai variasi jarak antara node transmitter (TX) dan receiver (RX). Parameter yang diamati meliputi jumlah paket data yang berhasil diterima serta nilai rata-rata RSSI pada setiap jarak pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui batas optimal komunikasi serta hubungan antara penurunan kekuatan sinyal terhadap tingkat keberhasilan transmisi data. Perhitungan persentase keberhasilan menggunakan Persamaan (1).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

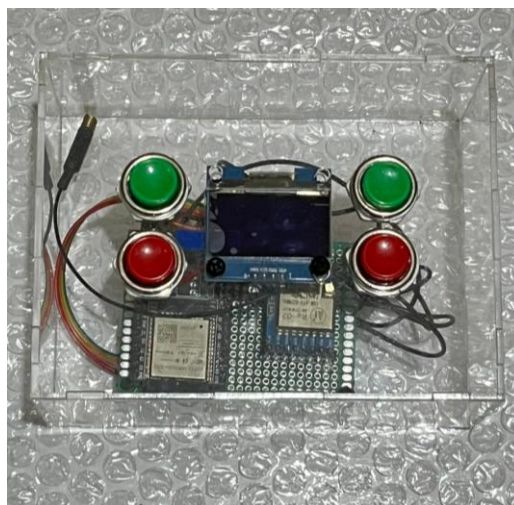
3.1 Implementasi Sistem

Gambar 5 menunjukkan hasil implementasi perangkat LoRa transmitter yang terdiri dari ESP32, modul LoRa SX1278, sensor LDR, RTC, dan relay. Perangkat ini berfungsi sebagai unit pengendali lampu PJU yang memproses data dari sensor cahaya, waktu RTC, serta perintah manual untuk menentukan kondisi operasi lampu. Selain itu, transmitter juga mengirimkan informasi status sistem ke node receiver melalui komunikasi LoRa.

Gambar 6 menunjukkan hasil implementasi perangkat LoRa receiver yang terdiri dari ESP32, modul LoRa SX1278, OLED display, dan push button. Perangkat ini berfungsi untuk menerima data monitoring dari transmitter, menampilkan informasi kondisi sistem pada OLED, serta mengirimkan perintah kendali ke transmitter sesuai input yang diberikan pengguna melalui push button.



Gambar 6 Hasil Alat LoRa Transmitter



Gambar 5 Hasil Alat LoRa Receiver

3.2 Hasil Pengujian Kendali dan Monitoring

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, persentase keberhasilan sistem dihitung menggunakan Persamaan (1). Pada pengujian kendali manual, seluruh perintah ON dan OFF yang dikirim melalui push button pada receiver berhasil diterima dan dieksekusi oleh transmitter sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Selain itu, perubahan status lampu juga berhasil dikirim kembali sebagai data monitoring sehingga seluruh percobaan memperoleh tingkat keberhasilan 100%.

Hasil yang sama diperoleh pada pengujian kendali berbasis RTC. Lampu berhasil melakukan proses ON dan OFF sesuai jadwal yang telah ditentukan, serta status operasinya dapat diteruskan ke sistem monitoring tanpa mengalami kegagalan. Sementara itu, pada pengujian kendali berbasis sensor LDR, lampu berhasil melakukan ON saat kondisi gelap dan OFF saat kondisi terang sesuai perubahan intensitas cahaya yang terdeteksi. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan Persamaan (1), seluruh metode kendali menghasilkan persentase keberhasilan sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi kendali dan monitoring secara konsisten sesuai rancangan.

Tabel 1 Hasil Pengujian Kendali dan Monitoring

No	Jenis Kendali	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal	Keterangan
1	Manual	10	10	0	Normal
2	RTC	10	10	0	Normal
3	Sensor LDR	10	10	0	Normal
Persentase Tingkat Keberhasilan (%)		30	30	0	100%

3.3 Hasil Pengujian LoRa dengan RSSI

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, komunikasi LoRa pada jarak 50 meter menunjukkan performa terbaik dengan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 100% dan nilai RSSI sebesar -31 dBm. Seiring bertambahnya jarak hingga 200 meter, seluruh paket data masih berhasil diterima dengan tingkat keberhasilan 100%, meskipun nilai RSSI mengalami penurunan hingga mencapai -72 dBm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem masih mampu mempertahankan komunikasi yang stabil pada rentang jarak tersebut. Penurunan performa mulai terlihat pada jarak 250 meter dan 300 meter, dimana tingkat keberhasilan pengiriman data menurun menjadi 90% dan 80% dengan nilai RSSI masing-masing sebesar -89 dBm dan -91 dBm. Pada jarak 350 meter, tidak terdapat paket data yang berhasil diterima sehingga komunikasi dinyatakan gagal. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar jarak antara transmitter dan receiver maka nilai RSSI akan semakin menurun dalam pengiriman data.

Tabel 2 Hasil Pengujian RSSI

No	Jarak TX-RX (m)	Total Paket Data Dikirim	Data Diterima	Rata-rata RSSI (dBm)	Keterangan
1	50	10	10	- 31	Normal
2	100	10	10	- 44	Normal
3	150	10	10	- 67	Normal
4	200	10	10	- 72	Normal
5	250	10	9	- 89	Terdapat 1 Paket Data yang tidak terkirim
6	300	10	8	-91	Terdapat 2 Paket Data yang tidak terkirim
7	350	10	0	-	Tidak ada data yang terkirim
Persentase Tingkat Keberhasilan (%)		70	68	- 56	97,14 % Tingkat Keberhasilan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem monitoring dan kendali Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis LoRa berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan ESP32, modul LoRa SX1278, sensor LDR, RTC, dan relay. Sistem mampu menjalankan tiga metode kendali, yaitu kendali manual, kendali berbasis waktu menggunakan RTC, dan kendali otomatis berdasarkan intensitas cahaya menggunakan sensor LDR. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh metode kendali dan monitoring memperoleh tingkat keberhasilan sebesar 100%. Selain itu, komunikasi LoRa menghasilkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 97,14%, dengan performa yang masih stabil hingga jarak 200 meter. Nilai RSSI cenderung menurun seiring bertambahnya jarak antara transmitter dan receiver, yang berdampak pada penurunan keberhasilan pengiriman data. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dikembangkan mampu mendukung proses monitoring dan kendali PJU secara efektif serta memiliki tingkat keandalan yang baik pada area pengujian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, masukan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] F. Ahmad, R. K. Pramyanti, and T. D. Cahyono, "Implementasi Penerangan Jalan Umum Berbasis Solar Cell untuk Peningkatan Keamanan Lingkungan di Widoro I Kelurahan Sembungharjo Genuk Kota Semarang," *Jurnal Pengabdian KOLABORATIF*, vol. 4, no. 1, pp. 125–134, 2026.
- [2] R. A. Ananto, M. F. Hakim, P. S. Harijanto, A. H. Santoso, and Mudjiono, "Pemasangan Lampu Jalan Umum (PJU) di Lingkungan Kelurahan Dampit Kecamatan Dampit Kabupaten Malang," *Jurnal Pengabdian Polinema Kepada Masyarakat*, vol. 11, no. 2, pp. 104–110, 2024.
- [3] M. Aminuddin, R. F. Adhipramana, M. I. Fikri, M. Farhan, and T. A. Ningsih, "Kajian Permasalahan Infrastruktur di Kawasan Suburban: Studi Kasus Dusun Wonosalam," *Seminar Karya & Pameran Arsitektur Indonesia*, vol. 7, no. 1, pp. 619–632, 2024.
- [4] Z. Alamin, Khaeruddin, and Dahlan, "Sistem Penerangan Jalan Cerdas Berbasis Energi Surya dan IoT dengan Komunikasi LoRa," *Jurnal Pengembangan Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 2, pp. 69–79, 2025.
- [5] I. F. Arridzwani, "Analisis Perbandingan Photocell dan Timer sebagai Kendali Otomatis pada Sistem Lampu PJU di Dinas Kabupaten Sukabumi," *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Aplikasi Digital Inovasi*, 2023.
- [6] T. Tauladan and F. Latifah, "Sistem Kendali Otomatis Hemat Energi Pada Lampu Penerangan Jalan Tol LDR, Infrared Dengan Mikrokontroler AT89S52," *Informatics for Educators and Professionals*, vol. 1, no. 1, pp. 219–226, 2017.
- [7] T. Saputra and U. Surapati, "Analisis Efektivitas Sistem Kendali Otomatis PJU Berbasis IoT Menggunakan Mikrokontroler ESP32 dengan Metode Regresi Linier," *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*, vol. 5, no. 3, pp. 2582–2595, 2024.
- [8] J. T. Susilo et al., "Pemasangan Sistem Penerangan Jalan Umum Otomatis Berbasis Sensor Cahaya (Photocell) di Kampung Rajeg Kavling V," *J-ABDIMASTEK*, vol. 4, no. 2, pp. 114–123, 2025.
- [9] A. Syahfitri, "Internet of Things (IoT), Sejarah, Teknologi, dan Penerapannya," *Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika*, vol. 3, no. 1, pp. 113–120, 2025.
- [10] R. T. Hidayat, I. A. Nugroho, D. M. W. Saputra, M. I. Marzuki, and S. Prayogi, "Pengembangan Sistem Penerangan Jalan Pintar Berbasis IoT dengan Arduino dan NodeMCU," *Jurnal Algoritma*, vol. 21, no. 2, pp. 124–131, 2024.
- [11] P. D. P. Adi and M. Efendi, "Evaluasi Kinerja LPWA Berbasis Internet of Things Menggunakan Radio Frekuensi LoRa 915 MHz dan 920 MHz," *Seminar Keinsinyuran*, pp. 1–60, 2021.
- [12] A. Ifnil, F. Rozie, M. J. Rizaldi, and Akhdiaytul, "Monitoring Tegangan dan Arus Menggunakan LoRa (Long Range) Pada Sistem PJUTS," *Journal of Electrical Network Systems and Sources*, vol. 3, no. 1, pp. 13–18, 2024.
- [13] Y. Rahmanto, J. Bob, C. Haloho, M. R. Fazhri, and N. N. Fahreza, "Rancang Bangun Sistem Kontrol: Implementasi LoRa untuk Pemantauan Jarak Jauh pada Lampu Penerangan Jalan Berbasis Tenaga Surya," *R2J*, vol. 8, no. 1, 2025.
- [14] W. Abdillah, D. Saripurna, S. Yakub, and P. Studi Sistem Komputer, "Analisis Kinerja LoRa (Long Range) Berdasarkan Jarak dan Spreading Factor pada Area Rural," *Jurnal CyberTech*, vol. 4, no. 4, 2021.
- [15] D. Aditama, A. Taryana, and H. Siswanto, "Evaluasi Spasial dan Kualifikasi Sinyal LoRa di Lingkungan Indoor Bertingkat dengan Algoritma K-Means," *SINTA Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, vol. 2, pp. 133–141, 2025.
- [16] A. Sanchez-Sutil, F. Cano-Ortega, J. Hernandez, and J. A. Moron, "Smart regulation and efficiency energy system for street lighting with LoRa LPWAN," *Energies*, vol. 14, no. 7, art. no. 2006, 2021.
- [17] M. M. A. B. M. M. D. et al., "A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities," 2025.
- [18] M. Jabbar, T. K. Keat, F. A. Dael, L. C. Hong, Y. F. M. Yussof, and A. Nasir, "Optimising urban lighting efficiency with IoT and LoRaWAN integration in smart street lighting systems," *Discover Internet of Things*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [19] W. A. Jabbar, T. K. Keat, F. A. Dael, L. C. Hong, Y. F. M. Yussof, and A. Nasir, "Optimizing energy efficiency and network performance in smart street lighting systems using LoRaWAN technology," in *2024 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 2024, doi: 10.1109/INCOS59338.2024.10527564.
- [20] H. S. Al-Nahari, M. A. N. A. Al-Ansari, and S. Y. A. Al-Rohili, "LoRaWAN in motion: Preliminary tests for real time low power data gathering from vehicles," in *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive)*, 2021, doi: 10.1109/MetroAutomotive50197.2021.9502882.