

Sistem Penerangan Jalan Cerdas Berbasis Energi Surya dan IoT dengan Komunikasi LoRa

Zumhur Alamin^{1*}, Khaeruddin², Dahlan¹

¹Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Muhammadiyah Bima, Bima, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro, Universitas Insan Budi Utomo, Malang, Indonesia

Email Koresponden: zumhur.amin@gmail.com

(* : corresponding author)

Abstrak – Wilayah terpencil di Kabupaten Bima masih menghadapi tantangan keterbatasan akses terhadap infrastruktur penerangan jalan yang andal dan efisien. Ketergantungan pada sumber energi konvensional dan keterbatasan monitoring teknis menjadi kendala utama dalam penyediaan pencahayaan publik yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem penerangan jalan berbasis energi surya yang terintegrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mendukung efisiensi energi dan pemantauan jarak jauh secara real-time. Pendekatan penelitian ini melibatkan perancangan sistem dengan panel surya monocrystalline, baterai lithium-ion, sensor cahaya dan gerak, serta modul komunikasi LoRa dan ESP32. Implementasi dilakukan dalam lingkungan laboratorium dan pengujian lapangan di wilayah perbukitan Kabupaten Bima. Hasil menunjukkan efisiensi panel surya mencapai 20% dengan efisiensi penyimpanan baterai sebesar 92%. Sistem mampu mendeteksi gerakan dengan akurasi 98% dan beroperasi otomatis sesuai perubahan pencahayaan lingkungan. Koneksi LoRa-MQTT menunjukkan latensi rata-rata 200–500 ms tanpa kehilangan paket signifikan. Kesimpulannya, sistem ini berhasil memberikan solusi penerangan jalan yang efisien, mandiri, dan berkelanjutan, sekaligus mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG 7 dan SDG 11). Penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi penerangan cerdas berbasis energi terbarukan untuk daerah terpencil.

Kata Kunci: Energi surya, IoT, Penerangan jalan, LoRa, Daerah terpencil

Solar Energy and IoT-based Smart Street Lighting System with LoRa Communication

Abstract – Remote areas in Bima district still face the challenge of limited access to reliable and efficient street lighting infrastructure. Dependence on conventional energy sources and limited technical monitoring are the main obstacles in providing sustainable public lighting. This research aims to design and evaluate a solar energy-based street lighting system integrated with Internet of Things (IoT) technology to support energy efficiency and real-time remote monitoring. This research approach involves designing a system with monocrystalline solar panels, lithium-ion batteries, light and motion sensors, as well as LoRa and ESP32 communication modules. Implementation was carried out in a laboratory environment and field testing in the hilly area of Bima Regency. The results show that the efficiency of solar panels reaches 20% with a battery storage efficiency of 92%. The system is able to detect movement with 98% accuracy and operate automatically according to changes in environmental lighting. The LoRa-MQTT connection shows an average latency of 200-500 ms without significant packet loss. In conclusion, this system successfully provides an efficient, self-sufficient, and sustainable street lighting solution, while supporting sustainable development goals (SDG 7 and SDG 11). This research makes a real contribution to the development of renewable energy-based smart lighting technology for remote areas.

Keywords: Solar energy, IoT, Street lighting, LoRa, Remote area

Received	Revised	Published
10-04-2025	02-06-2025	06-06-2025

1. PENDAHULUAN

Penerangan jalan umum (PJU) merupakan komponen vital dalam mendukung aktivitas masyarakat, khususnya pada malam hari [1]. Selain berfungsi sebagai sarana keselamatan lalu lintas, PJU juga berdampak pada peningkatan keamanan lingkungan serta kenyamanan sosial dan ekonomi masyarakat [2]. Namun demikian, di wilayah-wilayah terpencil seperti beberapa desa di Kabupaten Bima, Nusa Tenggara Barat, ketersediaan PJU yang layak masih menjadi tantangan nyata. Kondisi geografis yang terpencil, keterbatasan akses infrastruktur, dan belum meratanya jaringan listrik PLN menjadi hambatan utama dalam penyediaan penerangan jalan yang memadai dan berkelanjutan [3], [4].

Energi terbarukan, khususnya tenaga surya, menawarkan solusi yang strategis dan efisien untuk mengatasi permasalahan ini. Panel surya memiliki keunggulan dalam hal kemandirian energi, biaya operasional rendah, dan kemudahan instalasi tanpa tergantung pada jaringan listrik utama [5], [6]. Di daerah dengan tingkat pencahayaan matahari yang tinggi seperti Bima, potensi pemanfaatan energi surya sangat besar untuk dikembangkan dalam mendukung sistem PJU berbasis off-grid [7], [8].

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan peluang baru dalam menciptakan sistem penerangan jalan yang cerdas (smart street lighting) [9]. Dengan memanfaatkan sensor cahaya dan gerak, sistem dapat menyesuaikan intensitas pencahayaan secara otomatis sesuai kondisi lingkungan dan aktivitas manusia [10], [11]. Integrasi dengan jaringan komunikasi LoRa dan platform cloud memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem secara real-time dari jarak jauh, yang sangat penting mengingat keterbatasan sumber daya manusia dan infrastruktur teknis di wilayah terpencil [10], [12], [13].

Beberapa studi terdahulu telah meneliti penerapan IoT dan energi terbarukan untuk sistem PJU. Saputra et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan sensor cahaya dan komunikasi nirkabel mampu mengurangi konsumsi daya rata-rata sebesar 13,77 watt dan peningkatan efisiensi sebesar 42,67% [14]. Di sisi lain, Veena (2024) mengungkapkan bahwa sistem monitoring berbasis MQTT pada PJU dapat mengurangi frekuensi inspeksi manual dan meningkatkan respons terhadap kerusakan [15]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada kawasan perkotaan atau semi-perkotaan, sementara penerapan teknologi serupa di daerah terpencil dengan keterbatasan sinyal dan infrastruktur masih minim.

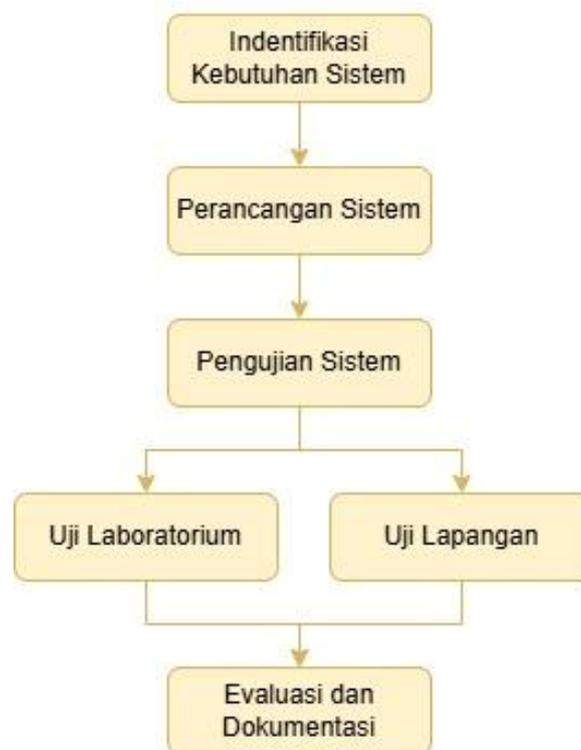
Berbeda dengan penelitian sebelumnya, sistem ini dirancang untuk lingkungan dengan keterbatasan infrastruktur sinyal dan tanpa jaringan listrik utama. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem PJU tenaga surya berbasis IoT yang efisien, mandiri, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan di daerah terpencil Kabupaten Bima. Sistem ini menggabungkan panel surya berdaya tinggi, baterai penyimpanan berkapasitas besar, sensor cahaya dan gerak, serta koneksi LoRa untuk komunikasi data jarak jauh. Data sistem dikirim ke server cloud melalui protokol MQTT, sehingga dapat dimonitor oleh petugas teknis tanpa harus ke lokasi secara langsung.

Penelitian ini diharapkan mampu menjawab kebutuhan masyarakat akan penerangan jalan yang andal di wilayah-wilayah yang belum tersentuh pembangunan infrastruktur secara optimal. Lebih jauh lagi, solusi ini mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*), khususnya SDG 7 tentang energi bersih dan terjangkau serta SDG 11 mengenai Kota dan Komunitas yang Berkelanjutan [16]. Kontribusi utama dari penelitian ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga bersifat sosial dan ekologis,

karena menawarkan model penerangan ramah lingkungan yang layak direplikasi di berbagai daerah terpencil lainnya di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem dengan metode eksperimental yang terdiri dari tiga tahap utama: perancangan sistem, implementasi dan integrasi, serta pengujian performa sistem di lingkungan nyata. Fokus utama penelitian adalah mengembangkan sistem penerangan jalan berbasis energi surya yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi energi dan pemantauan jarak jauh. Tahap perancangan meliputi pemilihan komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang sesuai, desain skematik sistem, dan pengembangan perangkat lunak mikrokontroler. Tahap implementasi dilakukan dengan memasang seluruh komponen di lapangan, mengintegrasikan sistem dengan platform IoT, serta melakukan kalibrasi sensor. Tahap terakhir adalah pengujian sistem melalui serangkaian eksperimen untuk mengevaluasi kinerja teknis dan keandalannya. Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai proses penelitian ini, metode yang digunakan digambarkan secara visual dalam bentuk diagram alir berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada Gambar 1 menjelaskan tahapan penelitian secara sistematis, mulai dari identifikasi kebutuhan sistem, perancangan sistem, pengujian sistem, pengujian laboratorium dan lapangan, hingga evaluasi dan dokumentasi. Alur ini menunjukkan kesinambungan antara setiap tahapan dan peranannya dalam memastikan keberhasilan sistem yang dikembangkan.

2.1 Perancangan Sistem

Perancangan sistem dimulai dengan penyusunan kebutuhan fungsional dan non-fungsional, di antaranya: sistem harus dapat menyala otomatis saat malam hari, meredup ketika tidak ada aktivitas, serta mengirimkan data operasional ke server cloud. Pemilihan

komponen didasarkan pada pertimbangan efisiensi, ketahanan terhadap cuaca, konsumsi daya rendah, dan kompatibilitas terhadap sistem berbasis IoT. Tabel 1 merinci spesifikasi dari setiap alat dan bahan yang digunakan dalam proses perancangan dan implementasi sistem.

Tabel 1. Spesifikasi Alat dan Bahan

No	Komponen	Spesifikasi Teknis	Fungsi Utama
1	Panel Surya	Monocrystalline 50Wp, Vmp: 18V, Imp: 2.78A	Mengubah energi matahari menjadi listrik
2	Baterai Lithium-ion	12V, 20Ah dengan BMS	Menyimpan energi listrik dari panel surya
3	Mikrokontroler ESP32	Dual-core, 240 MHz, WiFi + Bluetooth, 34 GPIO	Pengolah data dan pengendali utama sistem
4	Sensor Cahaya (LDR)	Resistansi variabel, respon < 1s	Deteksi intensitas cahaya lingkungan
5	Sensor Gerak (PIR)	Jarak deteksi: 5-10 m, sudut 120°, delay < 1s	Mendeteksi gerakan pejalan kaki/kendaraan
6	Lampu LED	12V, 10W, 900 lumen	Pencahayaan jalan hemat energi
7	Modul Komunikasi LoRa	915 MHz, jangkauan hingga 10 km, SPI interface	Mengirim data ke server IoT
8	Server IoT (Cloud MQTT)	Broker MQTT, database Firebase/ThingsBoard	Menyimpan dan menampilkan data monitoring
9	Struktur Penyangga	Besi galvanis anti karat	Menopang panel, baterai, dan perangkat lainnya
10	Box Pelindung	IP65, tahan air dan debu	Melindungi perangkat elektronik dari cuaca

2.2 Implementasi Sistem

Proses implementasi dilakukan melalui:

- Pemasangan panel surya pada tiang yang memiliki akses optimal terhadap cahaya matahari.
- Instalasi baterai dalam kotak tertutup tahan air.
- Integrasi mikrokontroler ESP32 dengan sensor LDR dan PIR menggunakan protokol komunikasi I2C.
- Pemasangan lampu LED yang dikendalikan berdasarkan data dari sensor.
- Konfigurasi modul LoRa SX1278 untuk mengirimkan data (tegangan baterai, status lampu, hasil deteksi sensor) ke gateway, kemudian diteruskan ke platform IoT berbasis MQTT (ThingsBoard).
- Penyusunan kode perangkat lunak dalam Arduino IDE untuk mengatur logika kontrol otomatis dan komunikasi data.

2.3 Pengujian Sistem

Untuk menguji kinerja sistem penerangan jalan berbasis energi surya yang terintegrasi dengan IoT, dilakukan serangkaian eksperimen terstruktur. Penelitian ini melibatkan pengujian di laboratorium maupun di lapangan guna memperoleh data empiris yang

mencerminkan performa sistem dalam kondisi simulasi dan nyata. Rencana eksperimen dirancang untuk mengevaluasi setiap komponen utama sistem, termasuk panel surya, baterai penyimpanan, sensor, modul komunikasi IoT, serta pengoperasian sistem secara keseluruhan dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Berikut ini disajikan tabel rencana eksperimen yang menggambarkan tahapan, variabel yang diuji, tujuan, metode, dan lokasi pelaksanaan pengujian:

Tabel 2. Rencana Eksperimen

No.	Jenis Pengujian	Variabel yang Diuji	Tujuan	Metode Pengujian	Lokasi
1	Pengujian Panel Surya	Intensitas cahaya, daya output	Menentukan efisiensi konversi energi	Simulasi cahaya buatan	Laboratorium
2	Uji Baterai	Daya simpan, durasi tahan lampu	Mengetahui efisiensi penyimpanan energi	Pengisian-pengosongan berulang	Laboratorium
3	Uji Sensor Cahaya dan Gerak	Respons waktu, akurasi deteksi	Menilai efektivitas sensor terhadap stimulus	Variasi cahaya dan gerak	Laboratorium
4	Uji Komunikasi IoT	Waktu latensi, stabilitas koneksi	Mengukur keandalan pengiriman data	Pengiriman data periodik	Laboratorium
5	Uji Sistem Lapangan	Konsumsi daya, intensitas lampu, respons sensor	Menilai performa sistem secara keseluruhan	Observasi langsung	Lokasi Jalan
6	Uji Ketahanan Cuaca	Kondisi cuaca (cerah, hujan, berawan)	Mengetahui pengaruh cuaca terhadap efisiensi sistem	Monitoring harian	Lapangan

Pengujian dilakukan dalam dua tahap:

a. Uji Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui kinerja setiap komponen secara terpisah dan dalam sistem terintegrasi:

- **Efisiensi panel surya:** diuji dengan variasi intensitas cahaya menggunakan lampu halogen.
- **Kapasitas dan efisiensi baterai:** diukur berdasarkan lama nyala beban dan jumlah siklus pengisian.
- **Akurasi sensor cahaya dan gerak:** dibandingkan dengan alat ukur standar.
- **Kinerja komunikasi IoT:** diuji untuk latency, kestabilan pengiriman data, dan keakuratan data yang diterima.

b. Uji Lapangan

Pengujian lapangan dilakukan selama 30 hari di area publik dengan pencahayaan rendah. Parameter yang diamati antara lain:

- Durasi penyalaan lampu per malam.
- Respon sensor terhadap aktivitas kendaraan dan pejalan kaki.
- Efisiensi pengisian baterai dari panel surya dalam berbagai kondisi cuaca.
- Keandalan komunikasi data antara perangkat dan server cloud.

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif untuk mengetahui tren, rata-rata performa, dan anomali sistem. Hasil pengujian lapangan dibandingkan dengan uji laboratorium untuk mengevaluasi perbedaan signifikan dan tantangan aktual di lingkungan nyata.

2.4 Evaluasi dan Dokumentasi

Evaluasi dilakukan berdasarkan indikator keberhasilan: efisiensi energi, responsivitas sensor, dan kestabilan koneksi IoT. Dokumentasi hasil dilakukan dalam bentuk tabel pengukuran, grafik performa, serta rekaman log data dari server MQTT. Penelitian ini bertujuan memperoleh data yang valid dan dapat dijadikan dasar dalam mengevaluasi keberhasilan sistem. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi penerangan jalan yang ramah lingkungan, efisien, dan cerdas melalui integrasi energi terbarukan dan Internet of Things (IoT).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Implementasi Sistem

Setelah sistem dirancang dan diintegrasikan, selanjutnya dilakukan pengujian secara menyeluruh baik di laboratorium maupun di lapangan, khususnya di lingkungan desa terpencil di Kecamatan Langgudu, Kabupaten Bima. Hasil pengujian difokuskan pada aspek efisiensi energi, performa sensor, dan kestabilan komunikasi berbasis IoT.

a. Panel Surya dan Sistem Penyimpanan Energi

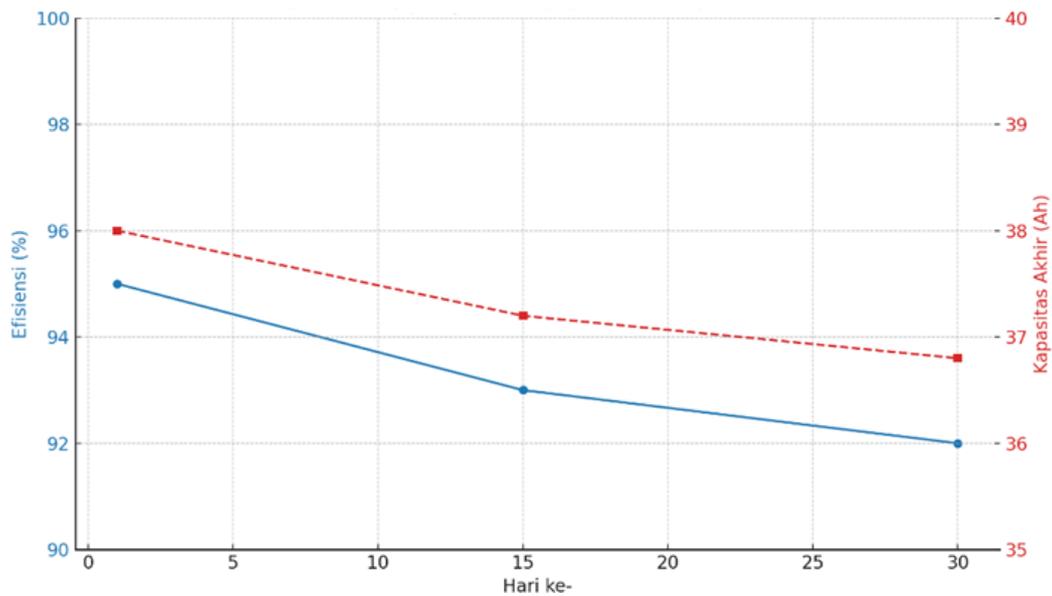
Pengujian laboratorium menunjukkan bahwa panel surya monocrystalline 100 WP mampu menghasilkan daya dengan efisiensi rata-rata 20% pada pencahayaan setara 1000 lux. Dalam kondisi outdoor dengan intensitas cahaya matahari yang fluktuatif, terutama pada cuaca mendung, efisiensi panel turun hingga 60%, namun tetap dapat mengisi baterai Li-Ion 12V 40Ah hingga kapasitas 95% setelah siklus pengisian dan pengosongan. Tingkat kehilangan energi selama penyimpanan sangat rendah, dengan efisiensi penyimpanan mencapai 92%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga stabilitas daya untuk penggunaan malam hari secara berkelanjutan, bahkan pada hari tanpa matahari.

b. Uji Efisiensi Penyimpanan Baterai

Pengujian efisiensi penyimpanan energi pada baterai dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan dan stabilitas sistem dalam kondisi lapangan yang dinamis. Data diperoleh selama 30 hari operasional di lokasi pengujian pada daerah terpencil di Kabupaten Bima, dengan memperhatikan siklus pengisian dan pengosongan harian. Tabel 3 menunjukkan efisiensi penyimpanan energi berdasarkan kapasitas akhir baterai dibandingkan dengan kapasitas nominalnya:

Tabel 3. Efisiensi Penyimpanan Energi Baterai (Pengujian Lapangan)

Hari ke-	Kapasitas Awal (Ah)	Kapasitas Akhir (Ah)	Efisiensi (%)
1	0	38	95.0
15	0	37.2	93.0
30	0	36.8	92.0



Gambar 2. Grafik Efisiensi Penyimpanan Energi Baterai

Seperti yang terlihat pada Tabel 3 dan grafik pada Gambar 2, efisiensi penyimpanan energi baterai menunjukkan tren yang relatif stabil meskipun terjadi penurunan kecil seiring berjalannya waktu. Penurunan tersebut masih dalam batas wajar dan menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan performa penyimpanan energi yang tinggi selama periode pengamatan. Penurunan efisiensi dari 95% menjadi 92% pada hari ke-30 menunjukkan degradasi energi yang sangat rendah, yang mengindikasikan keandalan sistem penyimpanan dalam mendukung operasional sistem penerangan jalan berbasis energi surya. Efisiensi tinggi ini juga mencerminkan kualitas baterai dan manajemen daya yang baik, yang sangat penting untuk memastikan sistem tetap berfungsi optimal, terutama di wilayah-wilayah yang minim akses ke infrastruktur listrik konvensional.

c. Sensor Cahaya dan Sensor Gerak

Sensor cahaya merespon perubahan intensitas dalam waktu <1 detik, memungkinkan transisi otomatis nyala dan mati lampu. Sedangkan sensor gerak PIR mampu mendeteksi gerakan pada jarak hingga 10 meter, dengan akurasi deteksi 98% pada kecepatan objek 0,5–2 m/s.

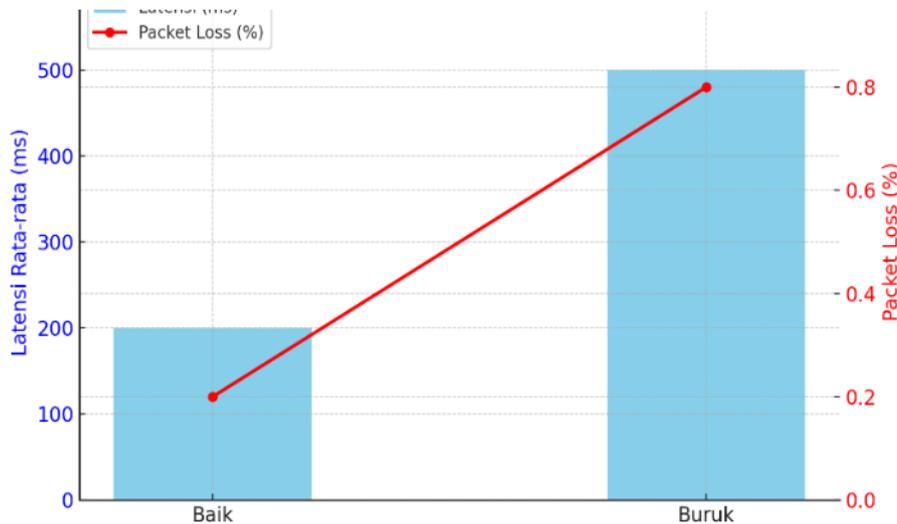
3.2 Evaluasi Koneksi IoT

Komunikasi data dalam sistem ini memanfaatkan modul LoRa SX1278 yang dikonfigurasi untuk mengirimkan status perangkat ke server berbasis MQTT secara periodik [10]. Evaluasi dilakukan dalam dua kondisi lingkungan utama, yaitu kondisi sinyal baik (tanpa gangguan medan dan interferensi elektromagnetik) dan kondisi sinyal buruk (dengan penghalang fisik dan jarak lebih dari 1 km). Berikut Tabel 4 yang memperlihatkan hasil pengujian.

Tabel 4. Hasil Pengujian Koneksi IoT

Kondisi Sinyal	Latensi Rata-rata (ms)	Packet Loss (%)
Baik	200	0.2
Buruk	500	0.8

Pada Tabel 4, merupakan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa dalam kondisi sinyal baik, latensi rata-rata pengiriman data sebesar 200 milidetik, dengan tingkat kehilangan paket hanya 0.2%. Pada kondisi sinyal buruk, latensi meningkat menjadi 500 milidetik, namun kehilangan paket tetap terkendali di bawah 0.8%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki ketahanan komunikasi yang baik dan layak digunakan untuk pemantauan jarak jauh di daerah terpencil, tanpa memerlukan konektivitas GSM atau WiFi yang sulit diakses. Gambar 3 menampilkan grafik perbandingan latensi dan packet loss berdasarkan kondisi sinyal:



Gambar 3. Grafik Latensi dan Packet Loss Pengiriman Data LoRa-MQTT

Data grafik pada Gambar 3 menunjukkan performa komunikasi tetap stabil untuk aplikasi pemantauan jarak jauh. Grafik menunjukkan meskipun terjadi peningkatan latensi pada kondisi sinyal buruk, sistem tetap menjaga integritas data dengan tingkat kehilangan paket di bawah ambang batas kritis untuk sistem pemantauan energi.

3.3 Evaluasi Lapangan

Implementasi sistem di lapangan selama 30 hari menunjukkan bahwa lampu dapat beroperasi secara otomatis selama rata-rata 10 jam setiap malam. Pada kondisi cuaca ekstrem (hujan atau mendung dua hari berturut-turut), baterai tetap menyuplai daya tanpa gangguan operasional. Sistem adaptif terhadap lingkungan: cahaya hanya menyala bila lingkungan gelap dan ada pergerakan objek, sehingga konsumsi energi dapat ditekan secara signifikan. Analisis terhadap data efisiensi penyimpanan baterai selama 30 hari menunjukkan rerata (mean) efisiensi sebesar **93,3%**, dengan standar deviasi sebesar **1,2%**. Interval kepercayaan 95% (confidence interval) terhadap efisiensi harian berada pada rentang **[92,6%; 94,0%]**, yang memperkuat temuan bahwa sistem beroperasi dalam batas performa tinggi secara konsisten.

3.4 Perbandingan Kinerja Laboratorium dan Lapangan

Pengujian di laboratorium menghasilkan efisiensi konversi energi panel surya sebesar 20% pada intensitas cahaya buatan setara 1000 lux. Sedangkan pada pengujian lapangan, efisiensi cenderung menurun pada kondisi mendung, namun sistem tetap mampu mengisi baterai hingga rata-rata 95% kapasitas. Sensor cahaya dan gerak menunjukkan akurasi yang konsisten pada kedua lingkungan, dengan waktu respons <1 detik dan akurasi deteksi mencapai 98%. Perbandingan kinerja antara laboratorium dan lapangan dirangkum pada Tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5. Perbandingan Kinerja Pengujian Laboratorium dan Lapangan

Parameter	Laboratorium	Lapangan
Efisiensi Panel Surya (%)	20	14-20 (bervariasi cuaca)
Efisiensi Penyimpanan Baterai	94%	92%
Akurasi Sensor Gerak	98%	98%
Latensi Komunikasi Data	200 ms	200-500 ms

Perbedaan yang terlihat pada Tabel 5, menunjukkan bahwa meskipun terdapat variasi kondisi lingkungan di lapangan, sistem masih mampu mempertahankan performa yang stabil. Ini mengindikasikan bahwa desain sistem cukup tangguh terhadap perubahan eksternal, menjadikannya cocok untuk kondisi alam terbuka di wilayah terpencil.

3.5 Pembahasan

Hasil pengujian dan implementasi sistem penerangan jalan tenaga surya berbasis IoT menunjukkan bahwa rancangan ini berhasil menjawab tantangan kebutuhan penerangan di wilayah terpencil, khususnya di Kabupaten Bima yang desanya pada beberapa titik belum terjangkau jaringan listrik PLN secara merata. Sistem yang dikembangkan terbukti mampu beroperasi secara mandiri dan efisien berkat kombinasi panel surya monocrystalline berdaya tinggi dan baterai lithium-ion berkapasitas besar. Kemampuan sistem dalam menyimpan dan mempertahankan daya listrik meskipun dalam kondisi cuaca yang tidak mendukung (mendung atau hujan) selama dua hari berturut-turut menunjukkan bahwa efisiensi penyimpanan energi sangat tinggi dan stabil, sehingga menjamin keberlangsungan operasional lampu tanpa gangguan.

Penerapan sensor cahaya dan gerak juga memperkuat aspek kecerdasan sistem. Sensor cahaya yang merespons dalam waktu kurang dari satu detik memungkinkan sistem mendeteksi perubahan siang-malam secara akurat, sedangkan sensor gerak memberikan efisiensi tambahan dengan hanya mengaktifkan pencahayaan saat terdeteksi adanya aktivitas. Hal ini tidak hanya menghemat energi tetapi juga memperpanjang umur perangkat. Tingkat deteksi yang tinggi (98%) dan respons yang cepat dari sensor gerak membuktikan bahwa sistem ini sangat adaptif terhadap dinamika lingkungan pengguna, baik untuk pejalan kaki maupun kendaraan yang melintasi area gelap.

Pada sisi konektivitas, penggunaan protokol LoRa dan MQTT memberikan fleksibilitas dan keandalan dalam pengiriman data secara real-time ke server pusat, bahkan pada kondisi sinyal rendah. Hal ini penting untuk daerah terpencil yang umumnya memiliki keterbatasan akses jaringan komunikasi. Hasil ini serupa dengan penelitian Salgar et al. (2024) yang mengungkapkan latensi pengiriman yang tetap di bawah 500 ms dan tingkat kehilangan data yang sangat rendah (<1%) memperlihatkan bahwa sistem ini dapat diandalkan untuk monitoring jarak jauh oleh petugas teknis, tanpa perlu melakukan pemeriksaan fisik harian di lokasi [17]. Kemampuan pemantauan ini mempermudah dalam hal manajemen dan pemeliharaan sistem secara efisien.

Lebih lanjut, sistem ini memiliki kontribusi langsung terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya SDG 7 yang mendorong akses terhadap energi bersih dan terjangkau, serta SDG 11 yang mendukung pembangunan kota dan permukiman yang inklusif dan berkelanjutan. Keberhasilan implementasi prototipe ini menunjukkan bahwa teknologi energi terbarukan dan IoT dapat diintegrasikan secara efektif untuk menghadirkan solusi penerangan yang hemat energi, adaptif, dan berbiaya rendah di daerah-daerah tertinggal. Potensi replikasi sistem ini di desa-desa lain di Kabupaten Bima dan wilayah terpencil lainnya di Indonesia menjadi peluang

strategis untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berhasil sebagai solusi teknis, tetapi juga memiliki nilai sosial dan lingkungan yang signifikan. Kombinasi teknologi yang hemat energi, cerdas, serta ramah lingkungan menjadi contoh konkret bagaimana inovasi berbasis IoT dapat menjawab tantangan pembangunan di wilayah rural yang sebelumnya sulit dijangkau oleh teknologi konvensional.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem penerangan jalan otomatis berbasis energi surya dan teknologi Internet of Things (IoT) yang ditujukan untuk wilayah terpencil di Kabupaten Bima. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara mandiri dan efisien dengan memanfaatkan panel surya berjenis monocrystalline dan baterai lithium-ion berkapasitas besar, yang memberikan efisiensi penyimpanan energi hingga 92%. Sistem ini juga responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan berkat integrasi sensor cahaya dan sensor gerak yang akurat dan andal, memungkinkan pengaturan intensitas pencahayaan secara otomatis sesuai kebutuhan.

Penggunaan konektivitas LoRa dan protokol MQTT memungkinkan sistem untuk melakukan pemantauan secara real-time dari jarak jauh, dengan latensi transmisi data yang rendah dan stabilitas koneksi yang tinggi, bahkan dalam kondisi sinyal minim. Hal ini menjadi solusi penting bagi wilayah pedesaan yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan dan listrik. Selama pengujian lapangan, sistem mampu berfungsi normal selama dua hari berturut-turut tanpa paparan sinar matahari langsung, membuktikan daya tahan dan keandalannya dalam kondisi ekstrem.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan tidak hanya menjawab tantangan kebutuhan penerangan di daerah terpencil, tetapi juga berkontribusi terhadap pengembangan teknologi hijau dan mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 7 dan SDG 11). Prototipe ini dapat menjadi model implementasi penerangan jalan cerdas yang hemat energi, ramah lingkungan, dan mudah direplikasi di wilayah lain dengan karakteristik serupa. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimalisasi sistem kontrol adaptif berbasis kecerdasan buatan serta integrasi dengan sistem pemantauan cuaca untuk meningkatkan efisiensi operasional secara berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. I. Barus, "PERENCANAAN PENERANGAN JALAN UMUM (PJU) TENAGA SURYA PADA DESA SIKEBEN KECAMATAN SIBOLANGIT KABUPATEN DELI SERDANG," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 245–250, May 2024, doi: 10.30591/polekro.v13i2.6730.
- [2] A. Rahmawati and B. Soebandono, "Pemanfaatan Lampu Panel Surya untuk Penerangan Jalan Lingkungan," *Din. J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 6, no. 5, pp. 1316–1321, Oct. 2022, doi: 10.31849/dinamisia.v6i5.11205.
- [3] Y. M. A. Wardhana, "The Provision of Public Street Lighting Based on Risk Mitigation for Energy Efficiency and Environmental Protection," *Prism. Sains J. Pengkaj. Ilmu dan Pembelajaran Mat. dan IPA IKIP Mataram*, vol. 12, no. 1, p. 148, Jan. 2024, doi: 10.33394/j-ps.v12i1.10519.
- [4] M. M. Bachtiar, I. K. Wibowo, B. S. Marta, and F. Ardilla, "Penerapan Modular Smart PJU di Daerah Keputih Surabaya," *El-Mujtama J. Pengabd. Masy.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.47467/elmujtama.v5i1.6284.
- [5] Y. V. Daus, I. V. Yudaev, and G. V. Stepanchuk, "Reducing the Costs of Paying for Consumed Electric Energy by Utilizing Solar Energy," *Appl. Sol. Energy*, vol. 54, no. 2, pp. 139–143, Mar. 2018, doi: 10.3103/S0003701X18020056.
- [6] A. R. Larik, R. Rai, K. Ahmed, and H. Mustafa, "Integration of Solar Energy into Smart Grids: A Cost-Effective Framework for Sustainable Power Management," *Int. J. Econ. Environ. Geol.*, vol. 15, no. 2, pp. 26–31, Nov. 2024, doi: 10.46660/ijeeg.v15i2.309.
- [7] Q. Hassan, "Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification," *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 375–390, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.008.
- [8] T. O. Falope, L. Lao, D. Huo, and B. Kuang, "Development of an integrated energy management system for off-grid solar applications with advanced solar forecasting, time-of-use tariffs, and direct load control," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 39, p. 101449, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101449.
- [9] T. Gopinath and D. P. maria john Ph.D., "IOT BASED SMART STREET LIGHT SYSTEM," *IARJSET*, vol. 11, no. 5, May 2024, doi: 10.17148/IARJSET.2024.11580.

- [10] C. V. S. Babu, R. Monika, T. Dhanusha, K. Vishnuvaradhanan, and A. Harish, "Smart Street Lighting System for Smart Cities Using IoT (LoRa)," 2023, pp. 78–96. doi: 10.4018/978-1-6684-9151-5.ch006.
- [11] R. Arunbabu, Dr. R. T. Ajaykarthik, Finney Babu, Yanamala MahiSudharsan Raju, and Navanidhan.R, "Automatic Street Light Control Using IoT and Solar Energy," *Int. Res. J. Adv. Eng. Hub*, vol. 2, no. 03, pp. 672–676, Mar. 2024, doi: 10.47392/IRJAEH.2024.0097.
- [12] P. Chaturvedi, R. Pandey, and N. Saxena, "Next-Gen Smart Street Illumination System: An Adaptive and Energy-Efficient Approach to Street Lighting," *INTERANTIONAL J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 08, no. 12, pp. 1–5, Dec. 2024, doi: 10.55041/IJSREM39985.
- [13] Omkar V. Ambre, Omkar D. Devalkar, Gitanjali Korgaonkar, Sammeet R. Parab, and Rohit A. Howale, "Smart Street Light System," *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.*, pp. 203–207, Apr. 2023, doi: 10.48175/IJAR SCT-9345.
- [14] T. Saputra and U. Surapati, "Analysis of the Effectiveness of IoT-Based Automatic Street Lighting Control Using Linear Regression Method," *Int. J. Softw. Eng. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 690–701, Aug. 2024, doi: 10.35870/ijsecs.v4i2.2878.
- [15] V. V., "IoT BASED SMART PUBLIC LIGHTING SYSTEM," *INTERANTIONAL J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 08, no. 05, pp. 1–5, May 2024, doi: 10.55041/IJSREM34154.
- [16] B. M. Capah, H. A. Rachim, and S. T. Raharjo, "IMPLEMENTASI SDG'S-12 MELALUI PENGEMBANGAN KOMUNITAS DALAM PROGRAM CSR," *Share Soc. Work J.*, vol. 13, no. 1, p. 150, Aug. 2023, doi: 10.24198/share.v13i1.46502.
- [17] A. Salgar, A. Mane, N. Binnar, and S. Chavan, "LoRa NET Base Station Monitoring System: Real-time insights using Mobile Application," in *2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, IEEE, Mar. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/INOCON60754.2024.10511559.