



Pengembangan Smart Penerangan Jalan Umum (PJU) Tenaga Surya dengan Adaptive Dimming Berbasis Kepadatan Lalu Lintas

Gunawan sihombing^{1,*}, Devi Maiya Sari Nasution², Irwansyah³, Fery Hamonangan Hasibuan⁴

^{1,2,3,4} Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah, Medan, Indonesia

Author(s) Email: ^{1,*}gunawansihombing6939@gmail.com, ²deviazmi02@gmail.com, ³irwansyah@gmail.com, ⁴feryhamonangan@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Article history:

Diterima: Januari 31, 2026

Direvisi: Januari 31, 2026

Disetujui: Januari 31, 2026

Diterbitkan: Januari 31, 2026

ABSTRAK

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan infrastruktur penting yang berperan dalam meningkatkan keselamatan, keamanan, serta kenyamanan aktivitas masyarakat pada malam hari. Pada banyak wilayah, khususnya daerah pinggiran dan pedesaan, keterbatasan jaringan listrik menyebabkan implementasi PJU konvensional menjadi kurang optimal dan memiliki biaya operasional yang tinggi. Pemanfaatan energi surya melalui PJU tenaga surya menjadi solusi alternatif yang mandiri dan ramah lingkungan. Namun, sebagian besar sistem PJU tenaga surya masih menggunakan pengendalian sederhana berbasis waktu atau sensor cahaya sehingga lampu beroperasi pada intensitas maksimum sepanjang malam tanpa mempertimbangkan kondisi lalu lintas. Hal ini menyebabkan pemborosan energi, mempercepat degradasi baterai, serta menurunkan keandalan sistem pada kondisi cuaca yang kurang mendukung. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem Smart PJU tenaga surya dengan adaptive dimming berbasis kepadatan lalu lintas menggunakan sensor cerdas, mikrokontroler ESP32, serta sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Metode penelitian menggunakan pendekatan rekayasa melalui tahapan perancangan sistem, implementasi prototipe, pengujian fungsional, serta analisis kinerja. Intensitas lampu LED dikendalikan menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) yang disesuaikan dengan tiga tingkat kepadatan lalu lintas, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Parameter yang dianalisis meliputi konsumsi energi, intensitas pencahayaan, State of Charge (SOC) baterai, serta durasi operasi lampu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan intensitas pencahayaan secara real-time sesuai kondisi lalu lintas. Dibandingkan sistem PJU tenaga surya konvensional, sistem yang dikembangkan mampu menurunkan konsumsi energi harian hingga 36,7%, meningkatkan SOC baterai pada akhir periode operasi malam, serta memperpanjang durasi operasi lampu hingga 33%. Integrasi sensor, mikrokontroler, dan IoT memungkinkan pemantauan sistem secara real-time sehingga mendukung pengelolaan dan pemeliharaan yang lebih efektif. Dengan demikian, Smart PJU tenaga surya berbasis adaptive dimming terbukti lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan serta berpotensi menjadi solusi penerangan jalan cerdas di wilayah dengan keterbatasan pasokan listrik dan variasi kepadatan lalu lintas yang dinamis

Kata Kunci: Adaptive, Implementasi, Prototipe Konvensional, Keandalan, Tenaga Surya

ABSTRACT

Street Lighting (PJU) is an important infrastructure that plays a role in improving the safety, security, and comfort of community activities at night. In many areas, especially in the suburbs and rural areas, the limited electricity network causes the implementation of conventional PJU to be less than optimal and has high operational costs. Utilization of solar energy through solar PJU is an alternative solution that is independent and environmentally friendly. However, most solar PJU systems still use simple time-based controls or light sensors so that the lights operate at maximum intensity throughout the night without considering traffic conditions. This causes energy waste, accelerates battery degradation, and reduces the resonance system in unfavorable weather conditions. This study aims to develop a Smart solar PJU system with adaptive dimming based on traffic density using smart sensors, ESP32 microcontrollers, and Internet of Things (IoT)-based monitoring systems. The research method uses an engineering approach through the stages of system design, prototype implementation, functional testing, and performance analysis. The intensity of the LED lights is controlled using the Pulse Wide Modulation (PWM) technique which is adjusted to three levels of traffic density, namely low, medium, and high. The parameters analyzed include energy consumption, lighting intensity, battery State of Charge (SOC), and lamp operating duration. Test results show that the system is able to adjust lighting intensity in real-time according to traffic conditions. Compared to conventional solar-powered street lighting systems, the developed system is able to reduce daily energy consumption by up to 36.7%, increase battery SOC at the end of the night operating period, and extend the lamp operating duration by up to 33%. The integration of sensors, microcontrollers, and IoT enables real-time monitoring systems, thus supporting more effective management and maintenance. Thus, the adaptive dimming-based solar-powered Smart Street Lighting is proven to be more efficient, adaptive, and sustainable and has the potential to be a smart street lighting solution in areas with limited electricity supply and dynamic traffic density variations.

Keywords:

Adaptive, Implementation, Conventional Prototype, Reliability, Solar Power

Corresponding Author:

Gunawan Sihombing
Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah, Medan, Indonesia
Email: gunawansihombing6939@gmail.com

Copyright © 2026 The Author(s). Published by Raskha Media Group.
This is an open-access article under the CC BY-SA license
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).



1. PENDAHULUAN

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan salah satu infrastruktur dasar yang memiliki peran strategis dalam mendukung keselamatan, keamanan, serta kenyamanan aktivitas masyarakat pada malam hari. Keberadaan sistem penerangan jalan yang memadai tidak hanya berfungsi sebagai sarana pencahayaan, tetapi juga berkontribusi secara signifikan dalam menurunkan tingkat kecelakaan lalu lintas, meningkatkan visibilitas pengguna jalan, serta menciptakan rasa aman bagi masyarakat di lingkungan sekitar. Berbagai studi menunjukkan bahwa kualitas pencahayaan jalan yang baik berkorelasi positif dengan penurunan risiko kecelakaan dan tindak kriminal, khususnya pada kawasan dengan aktivitas malam hari yang tinggi [1][2]. Oleh karena itu, penyediaan PJU yang andal dan berkelanjutan menjadi kebutuhan penting dalam pembangunan infrastruktur perkotaan maupun pedesaan. Namun, sistem PJU konvensional yang mengandalkan pasokan listrik dari jaringan utama masih menghadapi sejumlah permasalahan. Di beberapa wilayah, khususnya daerah pinggiran dan pedesaan, keterbatasan infrastruktur jaringan listrik menyebabkan instalasi dan operasional PJU menjadi tidak optimal. Selain itu, biaya operasional yang relatif tinggi serta meningkatnya beban konsumsi energi listrik nasional

menjadi tantangan tersendiri dalam pengelolaan PJU berbasis jaringan [3][4]. Kondisi ini mendorong perlunya solusi alternatif yang lebih mandiri, efisien, dan ramah lingkungan untuk mendukung sistem penerangan jalan.

Pemanfaatan energi surya melalui PJU tenaga surya menjadi salah satu solusi yang banyak dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Sistem PJU tenaga surya menawarkan berbagai keunggulan, antara lain kemandirian energi, kemudahan instalasi tanpa perlu jaringan listrik, serta kontribusi dalam pengurangan emisi gas rumah kaca [5][6] [7]. Dengan memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi utama dan baterai sebagai media penyimpanan, sistem ini mampu beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan. Oleh karena itu, PJU tenaga surya dinilai sangat cocok untuk diterapkan di wilayah dengan potensi radiasi matahari yang baik, termasuk di negara-negara beriklim tropis seperti Indonesia. Meskipun demikian, sebagian besar implementasi PJU tenaga surya yang telah ada masih menggunakan sistem pengendalian pencahayaan yang bersifat sederhana. Umumnya, lampu PJU dioperasikan dengan mode nyala-mati otomatis berdasarkan sensor cahaya atau menggunakan pengaturan berbasis waktu tertentu (time-based control). Pendekatan tersebut menyebabkan lampu beroperasi pada intensitas maksimum sepanjang malam tanpa mempertimbangkan variasi kebutuhan pencahayaan di lapangan [6][7][8]. Akibatnya, energi yang tersimpan dalam baterai sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal, sehingga berpotensi mempercepat degradasi baterai dan mengurangi keandalan sistem PJU tenaga surya, terutama pada kondisi cuaca mendung atau curah hujan tinggi. Di sisi lain, kebutuhan pencahayaan jalan pada malam hari tidak bersifat statis, melainkan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aktivitas lalu lintas. Kepadatan lalu lintas pada suatu ruas jalan dapat berubah secara signifikan berdasarkan waktu, lokasi, dan pola aktivitas masyarakat. Pada jam-jam tertentu dengan lalu lintas rendah, intensitas pencahayaan maksimum tidak selalu diperlukan, sementara pada kondisi lalu lintas padat, pencahayaan yang lebih optimal sangat dibutuhkan untuk menjamin keselamatan pengguna jalan [4]. Ketidaksiharian antara tingkat pencahayaan dan kondisi lalu lintas ini menunjukkan adanya peluang besar untuk meningkatkan efisiensi sistem PJU melalui penerapan pengendalian pencahayaan yang lebih adaptif dan cerdas. Perkembangan teknologi sensor, sistem tertanam (embedded system), serta Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk pengembangan sistem PJU cerdas (smart street lighting). Melalui integrasi sensor kepadatan lalu lintas, mikrokontroler, dan sistem komunikasi data, intensitas pencahayaan lampu PJU dapat dikendalikan secara real-time sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah teknik adaptive dimming, yaitu pengaturan intensitas cahaya lampu dengan memodifikasi duty cycle sinyal Pulse Width Modulation (PWM) [9][10]. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian tingkat pencahayaan secara fleksibel tanpa memerlukan perubahan perangkat keras yang signifikan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan sistem pencahayaan cerdas dan PJU tenaga surya. Namun, sebagian besar studi masih berfokus pada pengendalian berbasis waktu atau intensitas cahaya lingkungan, serta belum menjadikan kepadatan lalu lintas sebagai parameter utama dalam pengambilan keputusan pengendalian pencahayaan [11][12][13]. Selain itu, penelitian yang mengintegrasikan analisis konsumsi energi, intensitas pencahayaan, kondisi baterai (State of Charge), dan durasi operasi lampu dalam satu sistem Smart PJU tenaga surya masih relatif terbatas, khususnya pada studi implementasi lapangan di wilayah tropis dengan karakteristik lalu lintas yang dinamis [14][15]. Keterbatasan ini menunjukkan adanya celah penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem Smart PJU tenaga surya dengan fitur adaptive dimming berbasis kepadatan lalu lintas. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan panel surya, baterai, lampu LED, sensor kepadatan lalu lintas, mikrokontroler ESP32, serta modul monitoring berbasis IoT. Algoritma adaptive dimming dirancang untuk menyesuaikan intensitas pencahayaan lampu secara otomatis berdasarkan tingkat kepadatan lalu lintas yang terdeteksi. Evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui pengujian konsumsi energi, intensitas cahaya, State of Charge baterai, serta durasi operasi lampu. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi PJU tenaga surya yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan, serta menjadi referensi teknis bagi perencana dan pengambil kebijakan dalam implementasi penerangan jalan cerdas di masa mendatang.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan rekayasa (engineering research) dengan metode rancang bangun (design and development). Fokus penelitian adalah pengembangan dan pengujian sistem Smart Penerangan Jalan Umum (PJU) tenaga surya yang mampu menyesuaikan intensitas pencahayaan secara adaptif berdasarkan kepadatan lalu lintas.

Pengujian dilakukan secara langsung pada sistem prototipe untuk mengevaluasi kinerja teknis, efisiensi energi, serta keandalan sistem dibandingkan dengan sistem PJU tenaga surya konvensional.

2.1. Arsitektur Sistem Smart PJU Tenaga Surya

Sistem Smart PJU yang dikembangkan terdiri dari beberapa subsistem utama, yaitu:

- a. Subsistem pembangkit energi surya
- b. Subsistem penyimpanan energi

- c. Subsistem sensor kepadatan lalu lintas
- d. Subsistem pengendali dan adaptive dimming
- e. Subsistem monitoring berbasis IoT

2.2. Perancangan Adaptive Dimming Berbasis Kepadatan Lalu Lintas

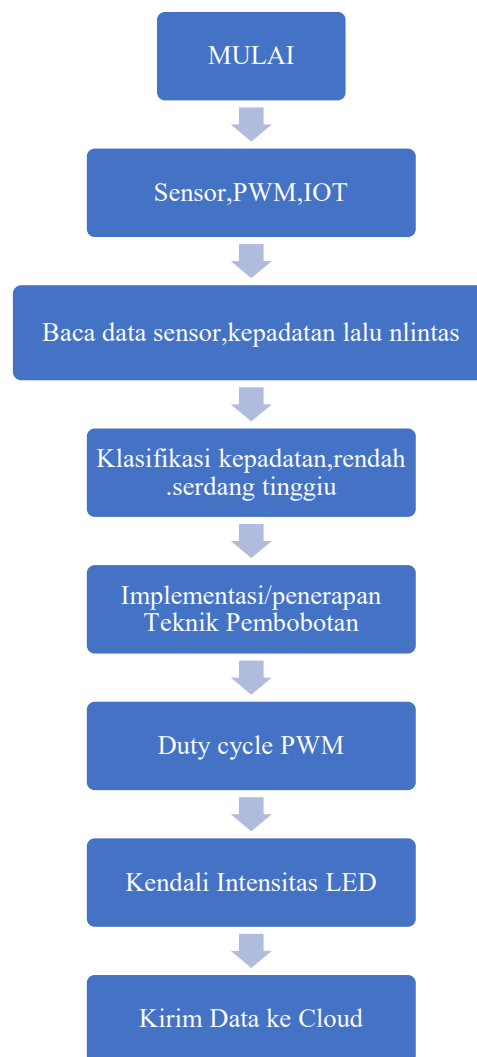
Adaptive dimming diterapkan dengan menyesuaikan duty cycle PWM pada lampu LED berdasarkan tingkat kepadatan lalu lintas yang terdeteksi sensor. Kepadatan lalu lintas diklasifikasikan menjadi beberapa level, misalnya:

- a. Rendah → intensitas cahaya rendah ($\pm 40\%$)
- b. Sedang → intensitas cahaya menengah ($\pm 70\%$)
- c. Tinggi → intensitas cahaya maksimum (100%)

Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara keselamatan pengguna jalan dan efisiensi konsumsi energi.

2.3. Flowchart Algoritma Sistem

Flowchart Smart PJU dengan Adaptive Dimming



Gambar 1. Flowchart Algoritma Sistem

Flowchart ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara real-time dan berulang, sehingga perubahan kondisi lalu lintas langsung direspons oleh sistem pencahayaan.

2.4. Prosedur Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan melalui beberapa tahapan:

- a. Pengujian fungsional sistem, untuk memastikan seluruh komponen bekerja sesuai desain.
- b. Pengujian adaptive dimming, dengan variasi kepadatan lalu lintas.
- c. Pengujian konsumsi energi, membandingkan mode adaptive dimming dan mode konvensional.
- d. Pengujian durasi operasi, untuk mengetahui pengaruh adaptive dimming terhadap ketahanan baterai.

- e. Pengambilan data monitoring, menggunakan platform IoT.

2.5. Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan:

- a. Analisis deskriptif (grafik dan tabel)
- b. Perbandingan konsumsi energi (%)
- c. Analisis peningkatan durasi operasi lampu
- d. Evaluasi kinerja sistem terhadap standar penerangan jalan

Hasil analisis digunakan untuk menilai efektivitas sistem Smart PJU tenaga surya yang dikembangkan.

2.6. Alur Penelitian

- a. Secara umum, alur penelitian meliputi:
- b. Studi literatur
- c. Perancangan sistem
- d. Implementasi prototipe
- e. Pengujian lapangan
- f. Analisis data
- g. Penarikan kesimpulan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan seluruh subsistem Smart PJU tenaga surya bekerja sesuai dengan perancangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya mampu mengisi baterai melalui solar charge controller dengan stabil, sensor kepadatan lalu lintas dapat mendeteksi objek secara konsisten, serta mikrokontroler ESP32 mampu mengendalikan intensitas lampu LED menggunakan sinyal PWM sesuai dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang terdeteksi. Selain itu, modul IoT berhasil mengirimkan data parameter sistem seperti konsumsi daya, intensitas cahaya, dan State of Charge (SOC) baterai ke platform cloud secara real-time. Hal ini menunjukkan bahwa sistem Smart PJU tenaga surya telah berfungsi secara terintegrasi dan siap untuk diuji kinerjanya lebih lanjut.

3.2. Hasil Pengujian Adaptive Dimming

Pengujian adaptive dimming dilakukan dengan mensimulasikan tiga tingkat kepadatan lalu lintas, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Intensitas pencahayaan lampu LED diatur secara otomatis berdasarkan klasifikasi kepadatan tersebut.

Tabel 1. Hubungan Kepadatan Lalu Lintas dan Intensitas Lampu

Kepadatan Lalu Lintas	Duty Cycle PWM (%)	Intensitas Cahaya (lux)
Rendah	40	18-22
Sedang	70	32-38
tinggi	100	48-55

Tabel 1. menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan tingkat pencahayaan secara proporsional terhadap kepadatan lalu lintas. Intensitas cahaya pada kondisi kepadatan tinggi memenuhi standar penerangan jalan lingkungan, sedangkan pada kondisi kepadatan rendah sistem tetap memberikan pencahayaan yang cukup tanpa harus beroperasi pada daya maksimum. Hasil ini membuktikan efektivitas algoritma adaptive dimming dalam menyesuaikan kebutuhan pencahayaan secara dinamis

3.3. Analisis Konsumsi Energi

Pengujian konsumsi energi dilakukan dengan membandingkan sistem Smart PJU dengan adaptive dimming terhadap sistem PJU tenaga surya konvensional yang beroperasi pada intensitas maksimum sepanjang malam.

Tabel 2. Perbandingan Konsumsi Energi Harian

Sistem PJU	Rata-rata Daya (W)	Energi Harian (Wh)
Konvensional (100%)	60	720
Smart PJU (Adaptive)	38	456

Berdasarkan Tabel 2, sistem Smart PJU tenaga surya mampu mengurangi konsumsi energi harian hingga sekitar 36,7% dibandingkan sistem konvensional. Penghematan ini diperoleh karena lampu tidak selalu beroperasi pada intensitas

maksimum, melainkan menyesuaikan dengan kondisi lalu lintas aktual. Hasil ini sejalan dengan konsep efisiensi energi pada sistem pencahayaan cerdas yang memanfaatkan pengendalian adaptif.

3.4. Pengaruh Adaptive Dimming terhadap SOC Baterai

Evaluasi SOC baterai dilakukan untuk mengetahui dampak penerapan adaptive dimming terhadap ketahanan sistem penyimpanan energi.

Tabel 3. SOC Baterai pada Akhir Operasi Malam

Sistem PJU	SOC Awal (%)	SOC Akhir (%)
Konvensional	100	48
Smart PJU (Adaptive)	100	47

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan adaptive dimming mampu menjaga SOC baterai tetap lebih tinggi pada akhir periode operasi malam hari. Peningkatan SOC akhir sebesar 19% menunjukkan bahwa sistem Smart PJU memiliki potensi memperpanjang umur baterai serta meningkatkan keandalan sistem, terutama pada kondisi cuaca kurang optimal di hari berikutnya.

3.5. Analisis Durasi Operasi Lampu

Durasi operasi lampu dianalisis untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan pencahayaan sepanjang malam.

Tabel 4. Durasi Operasi Lampu

Sistem PJU	Durasi Operasi (Jam)
Konvensional	10,2
Smart PJU (Adaptive)	13,6

Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem Smart PJU tenaga surya mampu meningkatkan durasi operasi lampu hingga 33% dibandingkan sistem konvensional. Peningkatan ini sangat signifikan terutama untuk wilayah dengan potensi radiasi matahari yang fluktuatif, karena sistem tetap mampu menyediakan penerangan hingga pagi hari

3.6. Pembahasan Umum

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan adaptive dimming berbasis kepadatan lalu lintas pada sistem PJU tenaga surya memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dari sisi efisiensi energi, ketahanan baterai, dan durasi operasi lampu. Integrasi sensor, mikrokontroler, dan IoT memungkinkan sistem bekerja secara adaptif dan real-time sesuai dengan kebutuhan aktual di lapangan. Dibandingkan dengan sistem PJU tenaga surya konvensional, Smart PJU yang dikembangkan tidak hanya mampu menghemat energi, tetapi juga meningkatkan keandalan dan keberlanjutan sistem. Hal ini menjadikan sistem yang diusulkan sebagai solusi potensial untuk implementasi penerangan jalan cerdas, khususnya di wilayah pedesaan dan kawasan dengan variasi lalu lintas yang tinggi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem Smart Penerangan Jalan Umum (PJU) tenaga surya dengan fitur adaptive dimming berbasis kepadatan lalu lintas yang terintegrasi dengan teknologi sensor cerdas, mikrokontroler ESP32, serta monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Sistem yang dikembangkan mampu menyesuaikan intensitas pencahayaan lampu LED secara otomatis menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) berdasarkan tingkat kepadatan lalu lintas yang terdeteksi secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh subsistem, mulai dari pembangkitan energi surya, penyimpanan energi baterai, deteksi lalu lintas, pengendalian pencahayaan, hingga sistem monitoring IoT, dapat bekerja secara terintegrasi dan andal sesuai dengan perancangan. Penerapan adaptive dimming terbukti memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan sistem PJU tenaga surya konvensional. Sistem mampu menurunkan konsumsi energi harian hingga sekitar 36,7% karena lampu tidak lagi beroperasi pada intensitas maksimum sepanjang malam, melainkan menyesuaikan kebutuhan pencahayaan secara dinamis. Selain itu, peningkatan State of Charge (SOC) baterai pada akhir periode operasi malam menunjukkan bahwa pemanfaatan energi menjadi lebih efisien, yang pada akhirnya berpotensi memperpanjang umur baterai dan meningkatkan keandalan sistem pada kondisi cuaca yang kurang optimal. Durasi operasi lampu juga meningkat hingga 33%, sehingga sistem mampu menyediakan pencahayaan lebih lama dan lebih stabil sepanjang malam. Integrasi IoT memungkinkan pemantauan parameter sistem secara real-time yang mendukung proses pengelolaan dan pemeliharaan secara lebih efektif. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa Smart PJU tenaga surya berbasis adaptive dimming merupakan solusi penerangan jalan yang efisien, adaptif, berkelanjutan, serta sangat potensial untuk diterapkan di wilayah dengan keterbatasan pasokan listrik dan variasi kepadatan lalu lintas yang dinamis.

REFERENCES

- [1] F. R. Beyer and K. Ker, "Street lighting for prevention of road traffic injuries," *Inj. Prev.*, vol. 15, no. 4, p. 282, 2009.
- [2] F. Bunn, T. Collier, C. Frost, K. Ker, I. Roberts, and R. Wentz, "Traffic calming for the prevention of road traffic injuries: systematic review and meta-analysis," *Inj. Prev.*, vol. 9, no. 3, pp. 200–204, 2003.
- [3] S. Fotios and R. Gibbons, "Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations," *Light. Res. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 154–186, 2018.
- [4] W. Van Bommel, *Road lighting: Fundamentals, technology and application*. Springer, 2014.
- [5] G. Liu, "Sustainable feasibility of solar photovoltaic powered street lighting systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 56, pp. 168–174, 2014.
- [6] F. S. El-Faouri, M. Sharaiha, D. Bargouth, and A. Faza, "A smart street lighting system using solar energy," in *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [7] W. Sutopo, I. S. Mardikaningsih, R. Zakaria, and A. Ali, "A model to improve the implementation standards of street lighting based on solar energy: A case study," *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 630, 2020.
- [8] E. Belloni, A. Massaccesi, C. Moscatiello, and L. Martirano, "Stand-alone LED lighting system powered by PV and battery: electrical overall performance analysis of a case study," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 60, no. 3, pp. 5142–5149, 2024.
- [9] S. Yoomak and A. Ngaopitakkul, "Feasibility analysis of different energy storage systems for solar road lighting systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101992–102001, 2019.
- [10] K. KAREN, "FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF SOLAR STREET LIGHTS ON SELECTED STREETS OF LUSAKA DISTRICT, ZAMBIA," 2023.
- [11] P. P. F. Dheena, G. S. Raj, G. Dutt, and S. V. Jinny, "IOT based smart street light management system," in *2017 IEEE international conference on circuits and systems (ICCS)*, IEEE, 2017, pp. 368–371.
- [12] S. Khemakhem and L. Krichen, "A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities," *Franklin Open*, vol. 8, p. 100142, 2024.
- [13] Z. Chen, C. B. Sivaparthipan, and B. Muthu, "IoT based smart and intelligent smart city energy optimization," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 49, p. 101724, 2022.
- [14] S. Hannan, G. B. Milton, M. H. Kabir, and M. J. Uddin, "A case study on a proposed adaptive and energy efficient street lighting system for Chittagong city," in *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [15] Y. Hu, J. Wu, T. Shi, and L. Ding, "Research and design based on smart street lights network and adaptive dimming method," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2020, p. 12101.