

Pengembangan Sistem Monitoring Penerangan Jalan Umum Bandar Udara Berbasis Node-RED dan Telegram untuk Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya

Ulfah Hisanah¹, Irfan^{1,*}, Kurniaty Atmia¹, Sukarman¹

¹Teknologi Pemeliharaan Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Makassar, Makassar

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 24 November 2025
Direvisi: 20 Februari 2026
Diterima: 2 Mei 2026

Kata kunci:

ESP32, Internet of Things, Node-RED, Penerangan jalan umum, Telegram

Keywords:

ESP32, Internet of Things, Node-RED, Public street lighting, Telegram

Penulis Korespondensi:

Irfan
Email:
irfanpoltekbangmakassar@gmail.com

ABSTRAK

Monitoring Penerangan Jalan Umum (PJU) di Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya masih dilakukan melalui pemeriksaan langsung oleh teknisi sehingga proses identifikasi gangguan memerlukan waktu yang relatif lebih lama. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji prototipe sistem monitoring dan kontrol PJU berbasis Node-RED dengan notifikasi Telegram sebagai alternatif monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) yang meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data, perancangan sistem, pembuatan prototipe, pengujian, dan analisis hasil. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan sensor LDR, PIR, DHT22, dan INA219, serta memanfaatkan protokol MQTT sebagai media komunikasi data, Node-RED sebagai dashboard monitoring, dan Telegram sebagai media notifikasi. Hasil pengujian fungsional menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem mampu bekerja sesuai dengan rancangan, meliputi pembacaan data sensor, komunikasi MQTT, visualisasi data pada dashboard Node-RED, pengiriman notifikasi Telegram, serta kontrol lampu berdasarkan intensitas cahaya dan deteksi gerakan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa prototipe berhasil mengintegrasikan fungsi monitoring, kontrol, visualisasi data, dan notifikasi dalam satu sistem berbasis IoT. Namun, penerapan sistem masih dipengaruhi oleh kestabilan koneksi internet sehingga pengujian performa secara lebih komprehensif diperlukan pada implementasi selanjutnya.

Public Street Lighting (PSL) monitoring at Juanda International Airport, Surabaya, is still conducted through direct field inspections by technicians, making the identification of system faults relatively time-consuming. This study aimed to design and evaluate a prototype of a Node-RED-based public street lighting monitoring and control system with Telegram notifications as an Internet of Things (IoT)-based monitoring alternative. The study employed the Research and Development (R&D) method, which consisted of problem identification, data collection, system design, prototype development, testing, and result analysis. The proposed system was developed using an ESP32 microcontroller integrated with LDR, PIR, DHT22, and INA219 sensors. It utilized the MQTT protocol for data communication, Node-RED as the monitoring dashboard, and Telegram as the notification platform. Functional testing demonstrated that all system components operated according to the design, including sensor data acquisition, MQTT data communication, real-time visualization through the Node-RED dashboard, Telegram notification delivery, and adaptive lighting control based on ambient light intensity and motion detection. These findings indicate that the prototype successfully integrates monitoring, control, data visualization, and notification functions into a single IoT-based system. However, the system performance remains dependent on internet connection stability; therefore, more comprehensive performance evaluation is recommended for future implementation.

Copyright © 2026 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN,

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan salah satu fasilitas pendukung yang berperan penting dalam menjamin keselamatan, keamanan, dan kelancaran mobilitas pada suatu kawasan, termasuk lingkungan bandar udara. Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 47 Tahun 2023, alat penerangan jalan berfungsi memberikan penerangan pada ruang lalu lintas guna mendukung aktivitas operasional secara aman dan efektif. Di lingkungan bandar udara, keberadaan PJU menjadi komponen penting dalam menunjang aktivitas teknisi, petugas operasional, kendaraan pelayanan darat, serta pengguna jasa bandara, terutama pada malam hari dan kondisi cuaca dengan tingkat visibilitas rendah (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2023).

Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya memiliki area operasional yang luas dengan jumlah titik Penerangan Jalan Umum (PJU) yang tersebar di berbagai zona operasional seperti area *taxiway*, apron, dan akses jalan internal bandara. Berdasarkan hasil observasi selama pelaksanaan *On the Job Training* (OJT), proses monitoring PJU masih dilakukan secara manual melalui inspeksi lapangan oleh teknisi dengan pola pengecekan berkala. Inspeksi umumnya dilakukan secara rutin pada jam tertentu dan bersifat berkeliling (patroli) ke setiap titik lampu, sehingga tidak memungkinkan pemantauan kondisi secara terus-menerus. Kondisi ini menyebabkan keterlambatan dalam mendeteksi gangguan, terutama ketika terjadi kerusakan pada beberapa titik secara bersamaan. Selain itu, waktu penanganan gangguan dapat mencapai beberapa jam hingga laporan diterima dan teknisi tiba di lokasi, sehingga sistem monitoring yang ada belum mampu memberikan informasi kondisi lampu secara real-time dan terpusat. Akibatnya, proses pelaporan dan respon perbaikan menjadi kurang efisien dalam mendukung kebutuhan operasional bandar udara.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk meningkatkan efektivitas monitoring dan kontrol PJU melalui integrasi sensor, mikrokontroler, serta platform monitoring berbasis jaringan. Penelitian yang dilakukan oleh Melisa et al., (2025) menunjukkan bahwa sistem monitoring dan kontrol PJU berbasis IoT mampu menampilkan data kelistrikan secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik. Penelitian lain oleh Hermansyah dan Wijayanto (2024) membuktikan bahwa sensor DHT22 dapat digunakan untuk memantau suhu dan kelembapan lingkungan secara *real-time* disertai notifikasi Telegram. Sementara itu, Faruqi & Aribowo (2023) mengembangkan sistem monitoring PJU berbasis Node-RED dan sensor PIR yang mampu mendeteksi aktivitas pengguna jalan dan menampilkan informasi melalui perangkat bergerak.

Meskipun teknologi *Internet of Things* (IoT) seperti ESP32, MQTT, Node-RED, dan Telegram telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian, sebagian besar implementasi masih berfokus pada sistem monitoring umum dan belum secara spesifik diadaptasi untuk kebutuhan operasional bandar udara yang memiliki standar keselamatan dan responsivitas tinggi. Selain itu, penelitian sebelumnya cenderung mengembangkan sistem secara parsial, seperti hanya monitoring sensor atau hanya notifikasi, tanpa integrasi menyeluruh antara monitoring parameter kelistrikan, kondisi lingkungan, kontrol pencahayaan adaptif, visualisasi terpusat, dan notifikasi real-time dalam satu sistem. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem yang lebih terintegrasi dan sesuai dengan karakteristik operasional lingkungan bandar udara.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan modifikasi sistem monitoring dan kontrol Penerangan Jalan Umum berbasis Node-RED dengan notifikasi Telegram di Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan sensor INA219 untuk monitoring parameter kelistrikan, sensor DHT22 untuk pemantauan suhu dan kelembapan, sensor LDR dan PIR untuk pengendalian pencahayaan adaptif berbasis PWM, komunikasi data menggunakan MQTT, dashboard monitoring berbasis Node-RED, serta notifikasi *real-time* melalui Telegram.

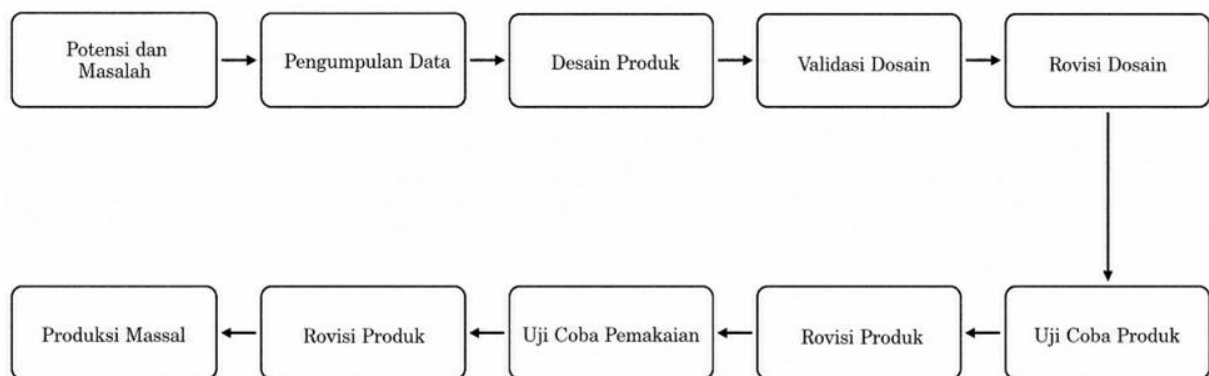
Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi menyeluruh antara fungsi monitoring parameter kelistrikan, kondisi lingkungan, kontrol pencahayaan adaptif berbasis sensor, visualisasi data terpusat menggunakan Node-RED, serta notifikasi real-time melalui Telegram dalam satu sistem berbasis IoT. Selain itu, penelitian ini secara khusus mengadaptasikan sistem pada konteks operasional Penerangan Jalan Umum di lingkungan bandar udara yang memiliki kebutuhan pemantauan cepat, terpusat, dan andal untuk mendukung aktivitas operasional. Penelitian ini dibatasi pada tahap perancangan dan pengujian prototipe untuk mengevaluasi fungsi sistem, tanpa pengukuran performa jaringan secara mendalam.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang mengacu pada model pengembangan Sugiyono, (2019). Metode R&D dipilih karena penelitian berfokus pada pengembangan dan pengujian prototipe sistem monitoring dan kontrol Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis *Internet of Things* (IoT). Tahapan penelitian dilaksanakan mulai dari identifikasi masalah hingga pengujian prototipe untuk memastikan sistem dapat berfungsi sesuai dengan tujuan yang dirancang.

II.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian mengacu pada model R&D Sugiyono yang meliputi identifikasi potensi dan masalah, pengumpulan data, perancangan sistem, validasi desain, revisi desain, pembuatan prototipe, pengujian produk, dan revisi produk (Sugiyono, 2019). Pada penelitian ini, tahapan pengembangan dibatasi sampai tahap revisi produk karena fokus penelitian adalah menghasilkan dan menguji prototipe sistem monitoring dan kontrol PJU.



Gambar 1 Desain Penelitian R&D

Gambar tersebut menunjukkan alur penelitian dan pengembangan (*Research and Development*/R&D) menurut Sugiyono yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini. Model ini menggambarkan tahapan sistematis dalam mengembangkan dan menguji suatu produk hingga diperoleh produk yang layak digunakan. Tahapan awal dimulai dari potensi dan masalah, yaitu proses identifikasi permasalahan yang terjadi pada sistem monitoring Penerangan Jalan Umum (PJU) di Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya. Pada tahap ini dilakukan observasi untuk menemukan permasalahan nyata yang terjadi di lapangan, khususnya terkait sistem monitoring yang masih dilakukan secara manual.

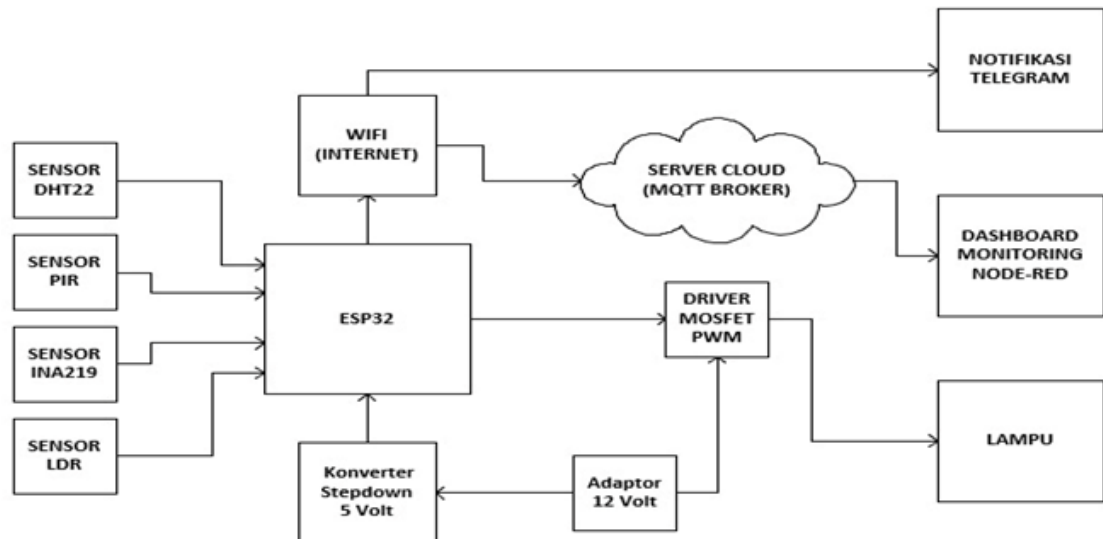
Tahap selanjutnya adalah pengumpulan data, yaitu proses pengumpulan informasi yang berkaitan dengan kebutuhan sistem, parameter yang harus dipantau, serta teknologi yang digunakan dalam pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT). Setelah itu dilakukan desain produk, yaitu perancangan sistem monitoring dan kontrol PJU yang meliputi desain perangkat keras (*hardware*) seperti ESP32 dan sensor, serta perangkat lunak (*software*) seperti MQTT, Node-RED, dan Telegram.

Tahap berikutnya adalah validasi desain, yaitu proses pengecekan dan evaluasi rancangan sistem untuk memastikan bahwa desain telah sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penelitian. Kemudian dilakukan revisi desain berdasarkan hasil validasi untuk memperbaiki kekurangan pada rancangan awal. Selanjutnya masuk pada tahap uji coba produk, yaitu implementasi prototipe sistem yang telah dibuat untuk diuji fungsinya, meliputi pembacaan sensor, komunikasi data, *dashboard* monitoring, serta notifikasi Telegram.

Setelah uji coba dilakukan, apabila ditemukan kekurangan maka dilakukan revisi produk untuk penyempurnaan sistem. Tahap berikutnya adalah uji coba pemakaian, yaitu pengujian sistem dalam kondisi yang lebih mendekati lingkungan sebenarnya untuk melihat kinerja prototipe secara keseluruhan. Tahap terakhir adalah produksi massal, namun pada penelitian ini tahap tersebut tidak dilakukan karena penelitian hanya berfokus pada pengembangan dan pengujian prototipe sistem.

II.2 Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas beberapa sensor sebagai masukan (input), mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, Node-RED sebagai platform monitoring, MQTT sebagai protokol komunikasi data, serta Telegram sebagai media notifikasi real-time. Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Blok diagram sistem monitoring dan kontrol PJU berbasis Node-RED

Pada sisi input, sistem terdiri dari beberapa sensor, yaitu sensor DHT22, PIR, INA219, dan LDR. Sensor DHT22 berfungsi untuk membaca suhu dan kelembapan lingkungan, sensor PIR digunakan untuk mendeteksi adanya pergerakan, sensor INA219 digunakan untuk mengukur parameter kelistrikan berupa tegangan dan arus, sedangkan sensor LDR digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya lingkungan. Seluruh data dari sensor tersebut dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem. ESP32 berfungsi untuk mengolah data sensor, menjalankan logika kontrol, serta mengatur komunikasi data dengan sistem berbasis jaringan.

Selanjutnya, ESP32 terhubung ke jaringan WiFi (*internet*) untuk mengirimkan data ke server cloud MQTT broker. MQTT berperan sebagai protokol komunikasi data yang memungkinkan pengiriman informasi secara ringan dan real-time antara perangkat dan sistem monitoring. Data yang diterima oleh MQTT broker kemudian diteruskan ke dua komponen utama, yaitu *dashboard* monitoring Node-RED dan sistem notifikasi Telegram. Pada Node-RED, data divisualisasikan dalam bentuk *dashboard* sehingga pengguna dapat memantau kondisi PJU secara real-time melalui tampilan grafik, indikator, dan nilai sensor. Sementara itu, sistem juga mengirimkan notifikasi otomatis melalui Telegram ketika kondisi tertentu terdeteksi sesuai dengan logika program, sehingga pengguna dapat menerima informasi secara cepat tanpa harus membuka *dashboard*.

Pada sisi kontrol, ESP32 mengatur driver MOSFET PWM yang digunakan untuk mengendalikan lampu. Driver ini menerima suplai dari adaptor 12 Volt, kemudian melalui konverter *step-down* 5 Volt untuk mensuplai ESP32. Sistem PWM digunakan untuk mengatur intensitas cahaya lampu berdasarkan kondisi lingkungan yang terdeteksi oleh sensor. Lampu akan bekerja secara adaptif, yaitu mati pada kondisi terang, menyala redup pada kondisi gelap, dan menyala lebih terang ketika sensor PIR mendeteksi adanya pergerakan. Secara keseluruhan, diagram tersebut menggambarkan integrasi antara sistem sensor, komunikasi IoT, pemrosesan data berbasis *cloud*, serta sistem kontrol lampu yang bekerja secara otomatis dan *real-time*.

Secara spesifikasi perangkat keras, sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 yang beroperasi pada tegangan kerja 3,3V dengan konektivitas WiFi terintegrasi. Sensor DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu -40 hingga 80°C dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ serta kelembapan 0-100% RH. Sensor LDR digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya dengan karakteristik resistansi yang berubah terhadap cahaya lingkungan, sedangkan sensor PIR memiliki jarak deteksi gerakan hingga

sekitar 3-7 meter tergantung kondisi lingkungan. Sensor INA219 digunakan untuk pengukuran arus dan tegangan dengan rentang pengukuran hingga 26V dan arus hingga $\pm 3,2A$. Pada sisi perangkat lunak, sistem ini menggunakan *Arduino IDE* sebagai platform pemrograman ESP32 dengan *library* WiFi, MQTT (*PubSubClient*), serta *library* sensor sesuai modul yang digunakan. Node-RED digunakan sebagai platform visualisasi dengan versi yang kompatibel dengan MQTT *broker Mosquitto* sebagai server komunikasi data. Sistem notifikasi menggunakan Telegram Bot API yang memungkinkan pengiriman pesan secara real-time berdasarkan kondisi yang terdeteksi oleh sistem.

II.3 Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi kinerja fungsional prototipe yang dikembangkan. Fokus pengujian adalah untuk memastikan setiap komponen sistem dapat bekerja sesuai dengan rancangan, mulai dari pembacaan sensor, pengiriman data, visualisasi pada dashboard Node-RED, sistem komunikasi MQTT, hingga mekanisme notifikasi Telegram dan kontrol lampu. Pengujian dilakukan pada beberapa skenario kondisi lingkungan, yaitu kondisi siang hari dengan intensitas cahaya tinggi, kondisi malam hari dengan intensitas cahaya rendah, kondisi tanpa gerakan, serta kondisi dengan adanya pergerakan. Setiap skenario diuji secara berulang untuk memastikan konsistensi kerja sistem.

Selain pengujian fungsional (berhasil/tidak berhasil), dilakukan pula pengamatan performa sistem secara deskriptif melalui pengulangan percobaan untuk melihat kestabilan respons sistem, terutama pada proses komunikasi MQTT, pembaruan data pada Node-RED, dan pengiriman notifikasi Telegram. Pengamatan ini dilakukan untuk memberikan gambaran umum mengenai responsivitas sistem tanpa menggunakan analisis statistik yang kompleks.

Evaluasi sistem dilakukan berdasarkan indikator keberhasilan fungsi pada setiap komponen, yaitu apakah sensor dapat membaca data dengan baik, apakah data dapat dikirim melalui MQTT, apakah data dapat ditampilkan pada Node-RED secara *real-time*, serta apakah sistem notifikasi Telegram dan kontrol lampu dapat merespons kondisi sesuai logika yang telah dirancang. Sistem dinyatakan berhasil apabila seluruh fungsi utama dapat berjalan sesuai dengan rancangan tanpa terjadi kegagalan sistem pada skenario pengujian yang telah ditentukan.

Tabel 1 Skenario pengujian sistem

Parameter Uji	Skenario	Indikator Keberhasilan
DHT22	Suhu & kelembapan lingkungan	Data tampil pada Node-RED
LDR	Perubahan intensitas cahaya	Nilai berubah sesuai kondisi
PIR	Deteksi gerakan	Status terdeteksi pada <i>dashboard</i>
INA219	Tegangan, arus, daya	Data terbaca dan tampil
MQTT	Pengiriman data ESP32	Data diterima Node-RED
Telegram	Trigger notifikasi	Pesan diterima pengguna
PWM Lampu	Siang/malam + gerakan	Intensitas lampu berubah

II.4 Teknik Analisis Data

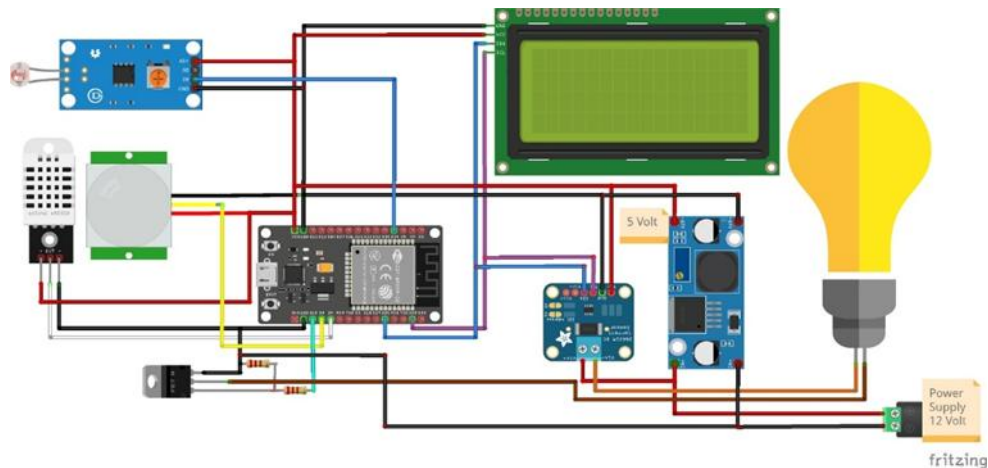
Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis deskriptif terhadap hasil pengujian fungsional prototipe. Data diperoleh dari hasil observasi selama proses pengujian yang meliputi pembacaan sensor, komunikasi MQTT, visualisasi pada Node-RED, sistem notifikasi Telegram, serta kontrol lampu.

Analisis dilakukan dengan cara mengevaluasi kesesuaian antara hasil pengujian dengan indikator keberhasilan yang telah ditentukan pada setiap komponen sistem. Setiap komponen dinyatakan berfungsi dengan baik apabila mampu menjalankan tugasnya sesuai dengan rancangan sistem tanpa mengalami kegagalan fungsi selama proses pengujian. Hasil analisis kemudian digunakan untuk menentukan tingkat keberhasilan sistem secara keseluruhan dalam bentuk keberhasilan fungsional prototipe.

III. HASIL DAN DISKUSI

III.1 Hasil Penelitian

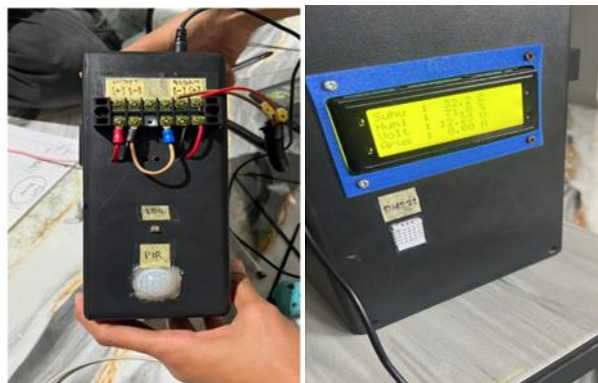
Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe sistem monitoring dan kontrol Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mengintegrasikan sensor LDR, PIR, DHT22, dan INA219 dengan mikrokontroler ESP32, komunikasi MQTT, dashboard Node-RED, serta notifikasi Telegram. Sistem ini dikembangkan sebagai transformasi dari metode monitoring konvensional yang masih dilakukan secara manual di lapangan menjadi sistem monitoring berbasis real-time yang terintegrasi dan terpusat.



Gambar 3 Skema Rangkaian atau Blok Diagram Sistem

Gambar 3 menunjukkan arsitektur sistem secara keseluruhan yang menggambarkan integrasi antara sensor, unit pemrosesan, komunikasi data, serta aktuator dalam satu ekosistem IoT. Pada sisi input, sistem terdiri dari sensor LDR, PIR, DHT22, dan INA219 yang masing-masing berfungsi untuk mendeteksi intensitas cahaya, gerakan, suhu dan kelembapan, serta parameter kelistrikan berupa tegangan dan arus. Seluruh data sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama yang juga menjalankan logika kontrol sistem. Hasil pemrosesan digunakan untuk menentukan kondisi aktuator berupa lampu yang dikendalikan secara otomatis menggunakan mekanisme PWM sesuai kondisi lingkungan.

Pada sisi komunikasi, ESP32 terhubung ke jaringan WiFi untuk mengirimkan data menuju MQTT broker. Protokol MQTT digunakan karena ringan dan sesuai untuk sistem IoT real-time. Data yang diterima broker kemudian diteruskan ke Node-RED untuk visualisasi dashboard serta ke Telegram Bot API untuk notifikasi otomatis kepada pengguna. Secara keseluruhan, Gambar 3 menunjukkan bahwa sistem telah menerapkan konsep IoT terintegrasi yang mencakup proses sensing, processing, communication, dan actuation secara *real-time*.



Gambar 4 Bentuk Fisik Prototipe Sistem Monitoring PJU

Gambar 4 menunjukkan implementasi fisik dari prototipe sistem yang telah dibangun. Sistem terdiri dari modul ESP32 yang terhubung dengan sensor LDR, PIR, DHT22, serta INA219 sebagai pengukur parameter listrik. Pada implementasi ini, LCD digunakan sebagai media monitoring lokal yang menampilkan data sensor secara langsung seperti suhu, kelembapan, arus, tegangan, serta status sistem. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya bergantung pada dashboard berbasis web, tetapi juga menyediakan antarmuka lokal untuk monitoring langsung.

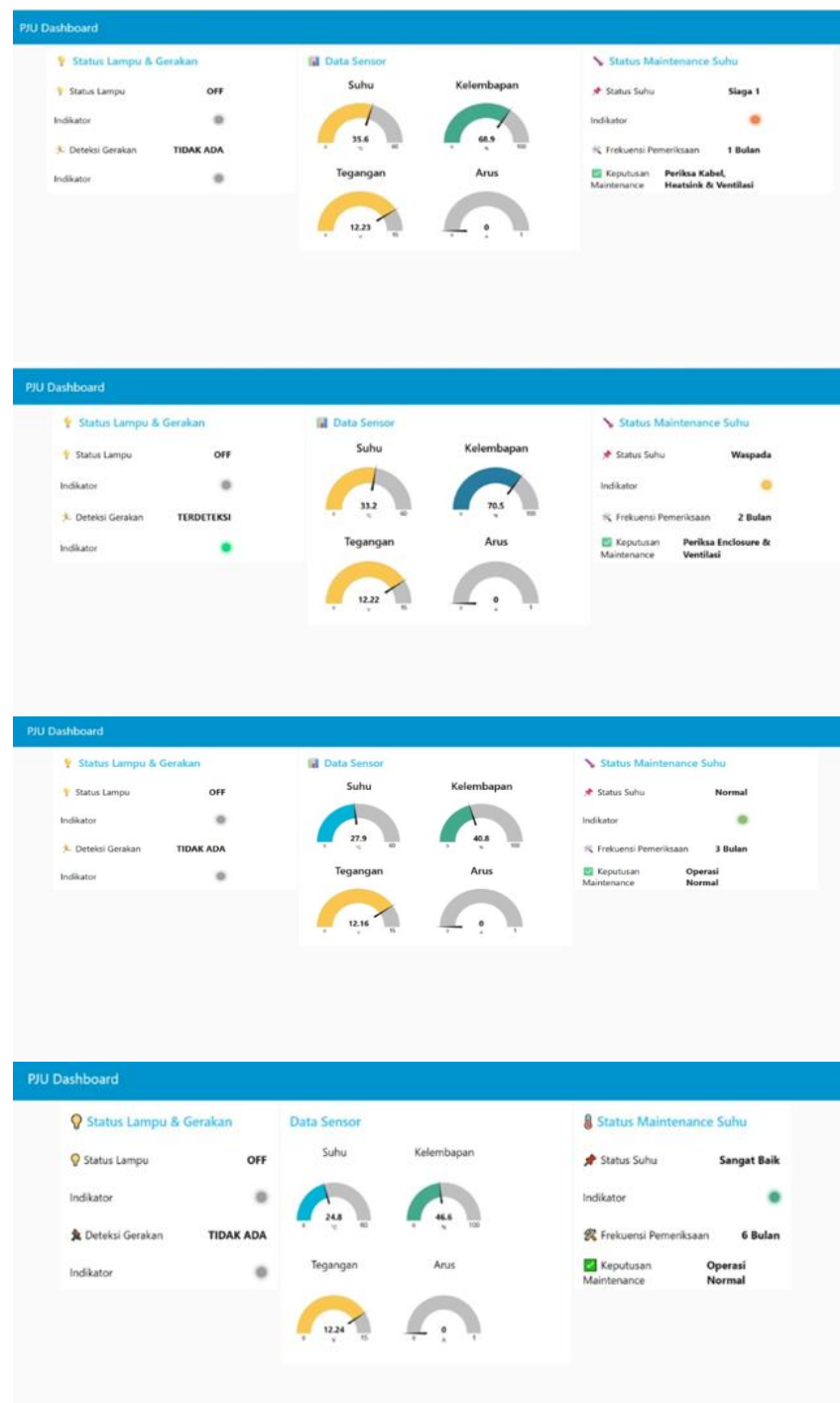
Hasil implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen telah terintegrasi secara fisik dan mampu bekerja sebagai satu kesatuan sistem. Data dari sensor berhasil diproses oleh ESP32 dan didistribusikan ke berbagai output, baik LCD, dashboard Node-RED, maupun sistem notifikasi Telegram.



Gambar 5 Tampilan Notifikasi Telegram

Gambar 5 menunjukkan hasil implementasi sistem notifikasi yang dikirim melalui Telegram secara otomatis menggunakan integrasi Node-RED dan Telegram Bot API. Notifikasi ini berfungsi sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*) terhadap kondisi yang terdeteksi oleh sensor. Setiap pesan notifikasi berisi informasi kondisi sistem seperti status gerakan, kondisi lampu, serta parameter lingkungan (suhu, kelembapan, tegangan, dan arus). Informasi disajikan secara ringkas sehingga mudah dipahami oleh pengguna.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan notifikasi secara real-time sesuai perubahan kondisi lingkungan. Ketika sensor PIR mendeteksi gerakan, sistem secara otomatis mengubah kondisi lampu dan mengirimkan informasi kepada pengguna. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi dan logika kontrol berjalan dengan baik..



Gambar 6 Tampilan Dashboard Node-RED

Gambar 6 menunjukkan dashboard Node-RED yang digunakan sebagai pusat visualisasi sistem monitoring. Dashboard menampilkan data sensor secara *real-time* yang diperoleh dari ESP32 melalui protokol MQTT. Visualisasi data ditampilkan dalam bentuk gauge dan indikator status yang mencakup parameter suhu, kelembapan, intensitas cahaya, tegangan, arus, serta status gerakan. Perubahan nilai pada dashboard mengikuti kondisi lingkungan secara dinamis, menunjukkan bahwa sistem memiliki responsivitas yang baik terhadap perubahan input sensor.

Selain itu, dashboard juga menampilkan status lampu dan indikator sistem yang memungkinkan pengguna melakukan pemantauan kondisi PJU secara terpusat. Hasil implementasi menunjukkan bahwa Node-RED berfungsi tidak hanya sebagai media visualisasi, tetapi juga sebagai pusat monitoring utama dalam sistem.

Tabel 2 Indikator Keberhasilan Sistem

No	Parameter Pengujian	Indikator Keberhasilan	Hasil Pengujian
1	Pembacaan data sensor	Data suhu, kelembapan, arus, tegangan, intensitas cahaya, dan deteksi gerakan dapat terbaca oleh sistem.	Berhasil, karena data dapat diproses dan ditampilkan pada media monitoring.
2	Pengiriman data MQTT	Data dari ESP32 dapat dikirimkan ke Node-RED berdasarkan topik MQTT yang telah ditentukan.	Berhasil, karena data sensor dapat masuk ke node MQTT pada Node-RED.
3	Dashboard Node-RED	Dashboard dapat menampilkan informasi monitoring secara real-time.	Berhasil, karena nilai monitoring tampil dalam bentuk gauge, format data, dan indikator sistem.
4	Notifikasi Telegram	Telegram dapat menerima pesan otomatis dari sistem.	Berhasil, karena bot Telegram dapat mengirimkan informasi kondisi sistem kepada pengguna.
5	Kontrol lampu	Lampu dapat bekerja berdasarkan kondisi sensor dan logika program.	Berhasil, karena sistem dapat merespons input sensor sesuai rancangan.

Tabel 2 menunjukkan indikator keberhasilan sistem berdasarkan fungsi utama yang diuji pada prototipe. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen utama sistem telah berfungsi sesuai dengan rancangan. Sistem mampu melakukan pembacaan data sensor yang mencakup suhu, kelembapan, intensitas cahaya, arus, tegangan, serta deteksi gerakan secara konsisten. Data tersebut berhasil diproses dan ditampilkan dalam sistem monitoring.

Pada aspek komunikasi, pengiriman data melalui MQTT dari ESP32 ke Node-RED berjalan dengan baik tanpa gangguan, sehingga menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi IoT telah berfungsi secara stabil. Selanjutnya, dashboard Node-RED mampu menampilkan data secara real-time dalam bentuk visualisasi yang mudah dipahami, sementara sistem notifikasi Telegram berhasil mengirimkan informasi otomatis kepada pengguna sesuai kondisi yang terdeteksi.

Pada aspek kontrol, lampu dapat bekerja secara otomatis berdasarkan kondisi sensor dan logika sistem yang telah ditentukan. Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa sistem telah berhasil menjalankan seluruh fungsi utama secara terintegrasi.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian fungsional setiap komponen dalam sistem monitoring dan kontrol PJU berbasis IoT. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap modul dapat berfungsi sesuai dengan perannya dalam sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor LDR mampu mendeteksi perubahan intensitas cahaya pada kondisi terang dan gelap, sedangkan sensor PIR mampu mendeteksi adanya pergerakan di sekitar sistem. Sensor DHT22 berhasil membaca parameter suhu dan kelembapan, sementara sensor INA219 mampu mengukur tegangan dan arus secara sesuai dengan kondisi sistem.

Pada sisi aktuator, sistem kontrol lampu mampu merespons kondisi lingkungan secara otomatis dengan mengatur intensitas cahaya sesuai logika program, yaitu menyala, redup, atau mati. Selain itu, LCD berhasil menampilkan data sensor secara *real-time* sebagai media monitoring lokal. Dari sisi komunikasi, MQTT berhasil mengirimkan data dari ESP32 ke Node-RED dengan baik, dan data tersebut dapat divisualisasikan pada dashboard. Sistem notifikasi Telegram juga berhasil mengirimkan pesan otomatis kepada pengguna sesuai kondisi yang terdeteksi, menunjukkan bahwa integrasi sistem berjalan dengan baik. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem telah berfungsi dengan baik dan terintegrasi sesuai dengan desain yang telah dirancang.

Tabel 3 Hasil Pengujian Fungsional Prototipe

No	Aspek Pengujian	Skenario Pengujian	Indikator Keberhasilan	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Sensor LDR	Sensor diuji pada kondisi terang dan gelap	Sensor mampu membaca perubahan intensitas cahaya	Data cahaya terbaca oleh sistem	Berhasil
2	Sensor PIR	Sensor diuji dengan adanya gerakan di sekitar prototipe	Sensor mampu mendeteksi gerakan	Status gerakan terbaca oleh sistem	Berhasil
3	Sensor DHT22	Sensor diuji untuk membaca suhu dan kelembapan	Data suhu dan kelembapan dapat terbaca	Nilai suhu dan kelembapan tampil pada sistem	Berhasil
4	Sensor INA219	Sensor diuji untuk membaca arus dan tegangan	Data arus dan tegangan dapat terbaca	Nilai arus dan tegangan tampil pada sistem	Berhasil
5	Kontrol Lampu	Lampu diuji berdasarkan input sensor dan logika program	Lampu dapat menyala, mati, atau redup sesuai kondisi	Lampu merespons perintah sistem	Berhasil
6	LCD	Data monitoring ditampilkan pada LCD	LCD mampu menampilkan data sensor dan status sistem	Informasi tampil pada LCD	Berhasil
7	MQTT	Data dari ESP32 dikirim ke Node-RED	Data dapat diterima Node-RED melalui topik MQTT	Data sensor berhasil masuk ke Node-RED	Berhasil
8	Dashboard Node-RED	Data ditampilkan pada dashboard	Dashboard mampu menampilkan data secara real-time	Data tampil dalam bentuk gauge/status	Berhasil
9	Notifikasi Telegram	Sistem mengirim pesan otomatis ke Telegram	Telegram menerima notifikasi sesuai kondisi program	Pesan berhasil diterima pengguna	Berhasil

III.2 Diskusi

III.2.1 Pembacaan Data Sensor

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor LDR, PIR, DHT22, dan INA219 dapat melakukan pembacaan data sesuai dengan fungsi masing-masing. Sensor LDR mampu mendeteksi perubahan intensitas cahaya yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengendalian lampu. Sensor PIR juga menunjukkan respons yang baik dalam mendeteksi keberadaan gerakan di sekitar prototipe, sehingga sistem dapat menyesuaikan kondisi lampu secara adaptif.

Sensor DHT22 berhasil membaca parameter suhu dan kelembapan secara real-time, sedangkan sensor INA219 mampu mengukur tegangan dan arus dengan stabil selama proses pengujian. Keberhasilan pembacaan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kestabilan suplai daya pada ESP32, kondisi lingkungan pengujian yang relatif tidak ekstrem, serta penggunaan library sensor yang kompatibel.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Hermansyah dan Wijayanto (2024) yang menunjukkan bahwa DHT22 dapat digunakan untuk monitoring kondisi lingkungan secara real-time, serta penelitian Bayu et al. (2023) yang menyatakan bahwa INA219 mampu memberikan pembacaan parameter listrik dengan tingkat akurasi yang baik.

Meskipun demikian, akurasi pembacaan sensor tetap dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti noise lingkungan, jarak deteksi PIR, serta sensitivitas LDR terhadap perubahan cahaya yang tidak selalu linier. Faktor-faktor ini menunjukkan bahwa performa sensor tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi perangkat, tetapi juga oleh kondisi implementasi yang dapat menyebabkan variasi hasil pembacaan. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem berjalan dengan baik pada skala prototipe, diperlukan kalibrasi lebih lanjut jika diterapkan pada lingkungan operasional nyata seperti bandar udara yang memiliki tingkat gangguan cahaya dan aktivitas yang lebih kompleks.

Selain itu, potensi kegagalan pembacaan dapat terjadi ketika terdapat gangguan elektromagnetik atau perubahan lingkungan yang cepat, yang dapat menyebabkan data tidak stabil dan berdampak pada keputusan kontrol sistem.

III.2.2 Komunikasi Data Menggunakan MQTT

Pengujian komunikasi data menunjukkan bahwa ESP32 berhasil mengirimkan data ke Node-RED melalui MQTT broker sesuai dengan topik yang telah ditentukan. Selama pengujian, tidak ditemukan kegagalan koneksi yang signifikan, sehingga dapat dikatakan bahwa komunikasi data berjalan stabil pada kondisi eksperimen.

Keberhasilan ini dipengaruhi oleh penggunaan protokol MQTT yang ringan serta cocok untuk perangkat dengan sumber daya terbatas seperti ESP32. Namun, stabilitas komunikasi sangat bergantung pada kualitas jaringan WiFi yang digunakan. Hasil tersebut mendukung penelitian Motamedi & Villányi (2024) yang menjelaskan bahwa MQTT merupakan protokol komunikasi ringan yang efektif digunakan dalam sistem IoT karena mampu mendukung pengiriman data secara cepat dan real-time.

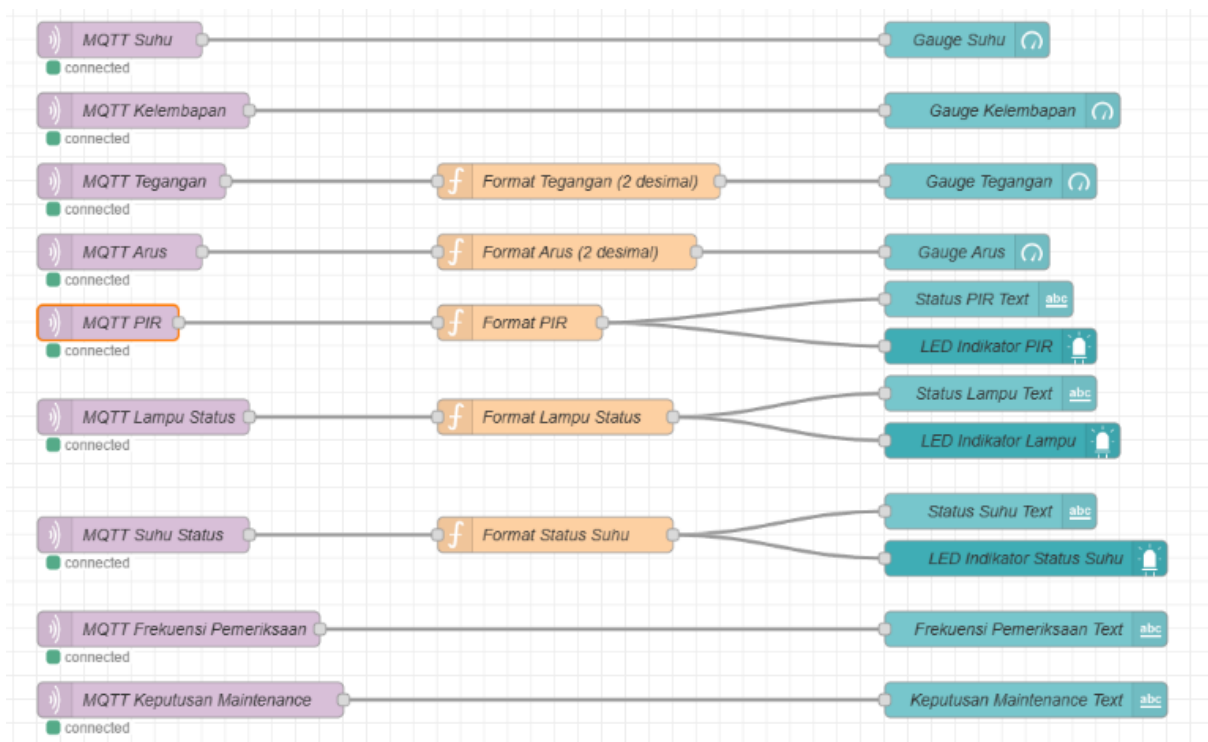
Dalam konteks implementasi di lingkungan bandar udara, faktor seperti interferensi sinyal, kepadatan perangkat jaringan, serta kebijakan keamanan jaringan internal dapat memengaruhi reliabilitas komunikasi. Kegagalan komunikasi dapat menyebabkan keterlambatan atau hilangnya data sensor, yang berpotensi mengganggu proses monitoring dan pengambilan keputusan sistem secara real-time. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme redundansi atau fallback system untuk menjaga kontinuitas data apabila terjadi gangguan koneksi.

Selain itu, ketergantungan penuh pada koneksi internet menjadi salah satu kelemahan utama sistem, karena ketika jaringan terputus, tidak terdapat mekanisme lokal yang mampu menjaga alur data secara penuh.

III.2.3 Visualisasi Monitoring Menggunakan Node-RED

Node-RED berhasil digunakan sebagai pusat visualisasi data yang menampilkan seluruh parameter sensor dalam bentuk dashboard real-time. Data ditampilkan dalam bentuk gauge, indikator status, dan nilai numerik sehingga memudahkan interpretasi kondisi sistem. Keberhasilan ini dipengaruhi oleh integrasi yang baik antara MQTT broker dan Node-RED serta desain flow yang sesuai dengan kebutuhan sistem monitoring.

Flow Node-RED pada sistem ini dirancang dengan alur utama yang terdiri dari input MQTT, proses parsing data, serta distribusi ke beberapa node dashboard. Data yang dikirim dari ESP32 melalui MQTT broker diterima oleh node MQTT-in, kemudian diproses untuk memisahkan parameter sensor seperti LDR, PIR, suhu, kelembapan, serta arus dan tegangan dari INA219. Setelah proses parsing, data diteruskan ke node dashboard (*gauge*, *chart*, dan indikator status) untuk ditampilkan secara real-time kepada pengguna. Selain itu, pada kondisi tertentu, data juga diteruskan ke node logika untuk memicu notifikasi Telegram apabila melewati ambang batas yang telah ditentukan.



Gambar 7 Flow Node-RED

Namun demikian, performa visualisasi sangat bergantung pada kestabilan data input. Jika terjadi delay atau packet loss pada komunikasi MQTT, maka pembaruan data pada dashboard juga dapat tertunda. Dalam skenario penerapan di bandar udara, keterlambatan informasi dapat berdampak pada proses pengambilan keputusan operasional. Dalam konteks sistem keselamatan seperti bandar udara, delay sekecil apa pun dapat mengurangi tingkat keandalan sistem monitoring karena informasi tidak lagi bersifat real-time secara presisi. Oleh karena itu, sistem visualisasi perlu didukung dengan mekanisme buffering data atau alert system tambahan agar tetap andal dalam kondisi jaringan tidak stabil.

Hasil ini menunjukkan bahwa Node-RED dapat berfungsi sebagai pusat monitoring yang mampu mengintegrasikan berbagai data sensor dalam satu tampilan yang mudah dipahami. Temuan ini sejalan dengan penelitian Chen et al., (2024) yang menyatakan bahwa Node-RED memiliki kemampuan visualisasi dan integrasi data yang baik pada sistem *Internet of Things*. Namun, keterbatasan Node-RED sebagai sistem visualisasi berbasis jaringan menyebabkan ketergantungan tinggi pada konektivitas, sehingga tidak dapat berfungsi optimal ketika terjadi gangguan komunikasi. Selain itu, kompleksitas *flow* yang semakin meningkat seiring penambahan fitur dapat berpotensi menyebabkan penurunan performa pemrosesan jika tidak dioptimalkan dengan baik.

III.2.4 Notifikasi Telegram

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan notifikasi otomatis ke Telegram sesuai dengan kondisi yang telah diprogramkan. Notifikasi ini berfungsi sebagai media peringatan dini (*early warning system*) yang memungkinkan pengguna menerima informasi tanpa harus membuka dashboard.

Keberhasilan pengiriman notifikasi dipengaruhi oleh kestabilan koneksi internet dan respons server Telegram Bot API. Dalam kondisi pengujian, pengiriman pesan berjalan dengan baik dan tepat waktu. Hasil ini mendukung penelitian Aliansih et al., (2024) yang menyatakan bahwa Telegram mampu mengirimkan informasi secara *real-time* sehingga dapat mempercepat respons pengguna terhadap perubahan kondisi sistem.

Namun, dalam konteks implementasi skala besar seperti bandar udara, keterlambatan notifikasi dapat terjadi akibat gangguan jaringan atau overload sistem komunikasi. Kegagalan pengiriman notifikasi dapat menyebabkan keterlambatan respons pengguna terhadap kondisi kritis, sehingga mengurangi efektivitas sistem sebagai *early warning system*. Selain itu, aspek keamanan data juga menjadi perhatian karena informasi sistem dikirim melalui platform eksternal, sehingga diperlukan pertimbangan terkait enkripsi dan kontrol akses.

Ketergantungan pada layanan pihak ketiga juga menjadi keterbatasan karena sistem tidak memiliki kontrol penuh terhadap ketersediaan layanan notifikasi.

III.2.5 Sistem Kontrol Lampu Berbasis Sensor dan PWM

Sistem kontrol lampu yang dikembangkan berhasil menjalankan logika operasi sesuai rancangan. Ketika kondisi lingkungan terang, lampu berada pada kondisi mati. Pada kondisi gelap tanpa adanya gerakan, lampu menyala dengan intensitas redup. Sementara itu, ketika sensor PIR mendeteksi gerakan pada kondisi gelap, lampu menyala dengan intensitas lebih tinggi melalui pengaturan PWM.

Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor LDR, PIR, dan PWM mampu menghasilkan sistem pencahayaan adaptif yang lebih efisien dibandingkan sistem konvensional yang hanya menggunakan metode ON/OFF. Temuan ini mendukung penelitian Abdelkader et al. (2023) dan Kavaliauskas et al. (2024) yang menjelaskan bahwa PWM dapat digunakan untuk mengatur intensitas cahaya secara fleksibel dan efisien.

Keberhasilan sistem kontrol dipengaruhi oleh respons cepat ESP32 dalam memproses input sensor serta kestabilan output PWM. Namun, faktor seperti delay pembacaan sensor atau fluktuasi nilai LDR dapat menyebabkan perubahan intensitas lampu yang kurang stabil dalam kondisi tertentu. Fluktuasi ini dapat menimbulkan fenomena flickering yang berpotensi mengganggu kenyamanan visual dan menurunkan kualitas sistem pencahayaan. Dalam implementasi di bandar udara, kestabilan pencahayaan menjadi aspek kritis karena berhubungan dengan keselamatan operasional. Oleh karena itu, diperlukan penyempurnaan algoritma filtering data sensor agar transisi intensitas lampu lebih halus dan tidak terjadi flickering. Selain itu, tidak adanya mekanisme *fail-safe* pada kondisi sensor error menjadi salah satu keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam implementasi skala industri.

III.2.6 Efektivitas Prototipe

Efektivitas prototipe dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam menjalankan fungsi utama secara terintegrasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem berfungsi dengan baik.

Tabel 4 Rekapitulasi Efektivitas Prototipe

Aspek	Status
Pembacaan Sensor	Berhasil
Kontrol Lampu	Berhasil
MQTT	Berhasil
Dashboard Node-RED	Berhasil
Telegram	Berhasil
Integrasi Sistem	Berhasil

Tabel tersebut menunjukkan bahwa secara fungsional sistem telah bekerja sesuai rancangan. Namun, keberhasilan ini masih berada pada level prototipe yang diuji dalam lingkungan terkontrol. Dari sisi keandalan, sistem memiliki beberapa faktor yang memengaruhi performa, yaitu:

1. Ketergantungan koneksi internet, yang menjadi jalur utama komunikasi data.
2. Keamanan data, karena komunikasi MQTT dan Telegram bergantung pada jaringan eksternal yang berpotensi memiliki risiko akses tidak sah.
3. Stabilitas komunikasi, yang dapat terganggu oleh interferensi jaringan atau lonjakan trafik.
4. Keterbatasan sensor, seperti sensitivitas LDR terhadap kondisi cahaya non-linier dan PIR yang dipengaruhi lingkungan fisik.

Dalam konteks implementasi di bandar udara, faktor keandalan menjadi sangat penting karena sistem digunakan pada lingkungan dengan standar keselamatan tinggi. Oleh karena itu, diperlukan penguatan sistem berupa:

1. Penggunaan jaringan yang lebih stabil (misalnya LAN atau jaringan privat iot),
2. Penerapan keamanan komunikasi (enkripsi MQTT/SSL),
3. Serta kalibrasi sensor secara berkala untuk menjaga akurasi.

Selain itu, belum adanya sistem redundansi (*backup system*) menyebabkan prototipe ini belum sepenuhnya siap untuk kondisi kegagalan sistem utama, sehingga masih membutuhkan pengembangan lebih lanjut untuk memenuhi standar keandalan industri. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan potensi yang baik untuk diterapkan sebagai sistem monitoring PJU berbasis IoT, namun masih memerlukan penguatan pada aspek keandalan, keamanan, dan stabilitas.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe sistem monitoring dan kontrol Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis Node-RED dengan notifikasi Telegram. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan ESP32, sensor LDR, PIR, DHT22, dan INA219 dengan komunikasi MQTT, dashboard Node-RED, serta notifikasi Telegram dalam satu platform monitoring yang terpusat. Integrasi tersebut memungkinkan proses pemantauan kondisi lingkungan, parameter kelistrikan, status lampu, serta pengiriman informasi kepada pengguna secara real-time.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh fungsi utama sistem dapat berjalan sesuai dengan tujuan perancangan. Sensor mampu membaca parameter yang dipantau, data berhasil dikirim melalui MQTT dan ditampilkan pada dashboard Node-RED, sistem kontrol lampu berbasis PWM dapat merespons kondisi cahaya dan gerakan sesuai logika program, serta notifikasi Telegram dapat diterima secara otomatis oleh pengguna. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dikembangkan dinyatakan berhasil pada tahap pengujian prototipe (skala laboratorium), namun belum dapat merepresentasikan kinerja secara penuh pada kondisi operasional lapangan yang sebenarnya.

Dengan demikian, efektivitas sistem yang diperoleh dalam penelitian ini terbatas pada lingkungan uji prototipe dengan kondisi jaringan yang relatif stabil. Meskipun demikian, kinerja sistem masih dipengaruhi oleh kualitas koneksi internet yang digunakan dalam proses komunikasi data dan pengiriman notifikasi. Hasil ini menunjukkan bahwa keandalan sistem sangat bergantung pada stabilitas jaringan serta integrasi komunikasi IoT yang digunakan, sehingga menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan pada implementasi lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk:

1. Melakukan uji lapangan pada lingkungan operasional nyata (bandar udara) untuk mengevaluasi keandalan sistem dalam kondisi dinamis.
2. Mengembangkan sistem penyimpanan data historis (*database*) untuk mendukung analisis gangguan dan pemantauan jangka panjang.
3. Menambahkan mekanisme komunikasi cadangan (*backup communication system*) untuk mengurangi ketergantungan pada satu jalur jaringan.

Melakukan evaluasi keandalan sistem dalam jangka panjang, termasuk stabilitas sensor, komunikasi data, dan respon sistem dalam kondisi beban operasional yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Penerbangan Makassar atas dukungan akademik yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses perancangan, pengujian, serta penyusunan artikel ini. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya yang telah memberikan informasi dan dukungan sehingga penelitian mengenai sistem monitoring dan kontrol Penerangan Jalan Umum (PJU) ini dapat terlaksana dengan baik. Penelitian ini tidak menerima hibah khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, atau nirlaba.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Melisa, P. Porman, and K. Ekki, "Perancangan Sistem Monitoring dan Kontrol Berbasis Internet Of Things Untuk Penerangan Jalan Umum Catu Daya Hybrid (Tenaga Surya dan Makro Hidro)," in *e-Proceeding of Engineering*, 2025, pp. 7370–7373.
- [2] R. Hermansyah and D. Wijayanto, "Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan Berbasis DHT22 dengan Metodologi Rapid Application Development," in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian*

- Dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta*, 2024, pp. 1837–1849. [Online]. Available: <https://proceeding.unisayogya.ac.id/index.php/prosemnaslppm/article/view/767>
- [3] M. I. Faruqi and W. Aribowo, “Monitoring Pada Alat Penerangan Jalan Umum(PJU) Menggunakan Sensor Passive Infrared Reciver(PIR) Berbasis Node-red,” *J. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 27–32, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.26740/jte.v12n3.p27-32>
- [4] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2019.
- [5] J. S. Bayu, A. P. Gurum, R. Agus, and A. Surtono, “Design and Build Voltage and Current Monitoring Parameters Device of Rechargeable Batteries in Real-Time Using the INA219 GY-219 Sensor,” *J. Energy, Mater. Instrum. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 58–71, 2023, doi: <https://doi.org/10.23960/jemit.v4i2.137>.
- [6] B. Motamedi and B. Villányi, “A Reliable Publish–Subscribe Mechanism for Internet of Things-Enabled Smart Greenhouses,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 5, p. 6407, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14156407>.
- [7] C. Chen, S. Wu, B. Huang, and C. Huang, “Internet of Things Web-based Internet of Things on environmental and lighting control and monitoring system using node-RED , MQTT and Modbus communications within embedded Linux platform,” *Internet of Things*, vol. 27, p. 101305, 2024, doi: [10.1016/j.iot.2024.101305](https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101305).
- [8] T. F. Aliansih, R. Hidayati, and K. Sari, “Sistem Pemantauan Infus Berbasis IoT dengan Notifikasi Real-Time melalui Telegram,” *Process. J. Ilm. Sist. Informasi, Teknol. Inf. dan Sist. Komput.*, vol. 19, no. 2, pp. 156–170, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33998/processor.2024.19.2.1843>
- [9] O. H. Abdelkader, H. Bouzebiba, D. Pena, and A. P. Aguiar, “Energy-Efficient IoT-Based Light Control System in Smart Indoor Agriculture,” *Sensors*, vol. 23, no. 18, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23187670>.
- [10] Ž. Kavaliauskas, I. Šajev, G. Blažiūnas, G. Gecevičius, and A. Iljinis, “Investigation of an LED Strip Controller Based on a PWM Driver and a PIC Series Microcontroller,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 10, p. 103390, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14104110>.