

Rancang Bangun dan Evaluasi Sistem IoT Berdaya Rendah Berbasis ESP32 dan LoRa untuk Pengiriman Data Sensor Jarak Jauh

Sudarno¹ Agus Haryawan²

¹Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta

²Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta

email: ¹isusay@gmail.com

ABSTRACT

The development of Internet of Things (IoT) technology requires communication systems capable of long-range data transmission with minimal power consumption, particularly for implementations in remote or outdoor areas. This research aims to design and evaluate an IoT system based on the ESP32 microcontroller and LoRa (Long Range) communication module for wireless sensor data transmission. The methodology includes hardware sensor integration, optimization of LoRa communication protocols, and system performance testing, including range tests and energy consumption analysis. The testing results indicate that utilizing LoRa on the ESP32 platform provides wide communication range with significant power efficiency through the implementation of deep sleep mode. This system is expected to serve as a solution for remote monitoring infrastructure with limited power resources and conventional internet network access.

INTISARI

Perkembangan teknologi **Internet of Things** (IoT) menuntut sistem komunikasi yang mampu mengirimkan data dalam jarak jauh dengan konsumsi daya yang minimal, terutama pada implementasi di area terpencil atau **outdoor**. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP32 dan modul komunikasi LoRa (**Long Range**) untuk transmisi data sensor secara nirkabel. Metodologi yang digunakan meliputi integrasi perangkat keras sensor, optimalisasi protokol komunikasi LoRa, serta pengujian performa sistem yang mencakup jangkauan transmisi (**range test**) dan analisis konsumsi energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan LoRa pada platform ESP32 mampu memberikan jangkauan komunikasi yang luas dengan efisiensi daya yang signifikan melalui implementasi mode **deep sleep**. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi bagi infrastruktur pemantauan jarak jauh yang memiliki keterbatasan sumber daya listrik dan akses jaringan internet konvensional.

Kata kunci: IoT, LoRa, ESP32, Berdaya Rendah, Sensor Jarak Jauh.

I. Pendahuluan

Greenhouse merupakan sistem budidaya tertutup yang dirancang untuk mengendalikan kondisi lingkungan mikro secara presisi guna mendukung pertumbuhan tanaman yang optimal. Pengendalian parameter lingkungan dalam greenhouse diperlukan untuk menjaga kestabilan proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, transpirasi, dan respirasi. Dalam sistem greenhouse konvensional, pengontrolan lingkungan masih banyak dilakukan secara manual, sehingga memiliki keterbatasan dalam hal ketepatan waktu, konsistensi, serta respon terhadap perubahan kondisi lingkungan yang dinamis.

Implementasi sistem otomasi pada greenhouse bertujuan untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keandalan pengontrolan lingkungan. Sistem otomatis mampu melakukan akuisisi data sensor secara kontinu, memproses data Pesatnya perkembangan teknologi **Internet of Things** (IoT) telah memungkinkan integrasi berbagai sensor untuk pemantauan parameter fisik secara **real-time**. Namun, implementasi IoT pada area yang luas dan terpencil seringkali menghadapi kendala utama dalam hal keterbatasan jangkauan sinyal dan efisiensi konsumsi daya. Teknologi komunikasi nirkabel konvensional seperti Wi-Fi dan Bluetooth memiliki keterbatasan jarak transmisi yang pendek, sementara komunikasi seluler membutuhkan biaya operasional yang tinggi dan konsumsi daya yang besar (García et al., 2019).

Teknologi LoRa (**Long Range**) muncul sebagai solusi komunikasi **Low Power Wide Area Network** (LPWAN) yang mampu mentransmisikan data hingga jarak beberapa kilometer dengan konsumsi daya yang sangat rendah (Augustin et al., 2016). LoRa bekerja pada spektrum frekuensi **unlicensed** ISM, menjadikannya sangat efisien untuk pengiriman data sensor dalam paket kecil secara berkala. Penggunaan platform mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan modul LoRa menawarkan fleksibilitas tinggi dalam pengembangan sistem cerdas karena performa komputasinya yang mumpuni serta dukungan fitur **deep sleep** yang optimal (Rojnarong & Pora, 2024).

Penelitian sebelumnya telah mengevaluasi penggunaan LoRa untuk berbagai aplikasi, mulai dari pemantauan kualitas air (Syed Taha et al., 2024) hingga optimasi konsumsi energi pada perangkat IoT (Soler-Fernández et al., 2026). Meskipun demikian, tantangan dalam kondisi **Non-Line-of-Sight** (NLOS) dan optimalisasi masa pakai baterai tetap menjadi fokus utama dalam evaluasi sistem (Kusumawardani et al., 2026). Oleh karena itu, penelitian ini akan fokus pada rancang bangun serta evaluasi performa sistem IoT berbasis ESP32 dan LoRa guna memastikan keandalan pengiriman data sensor pada jarak jauh dengan efisiensi daya yang maksimal.

A. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang arsitektur sistem IoT berbasis ESP32 dan LoRa yang mampu melakukan transmisi data sensor secara stabil?
2. Sejauh mana jangkauan transmisi data yang dapat dicapai oleh sistem dalam berbagai kondisi lingkungan?
3. Bagaimana pengaruh implementasi fitur manajemen daya pada ESP32 terhadap masa pakai baterai perangkat?

B. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan purwarupa (**prototype**) sistem IoT menggunakan ESP32 dan LoRa untuk pengiriman data sensor jarak jauh.
2. Mengevaluasi performa jangkauan transmisi data LoRa pada kondisi lingkungan yang berbeda.
3. Menganalisis efisiensi konsumsi daya sistem untuk memastikan keberlanjutan operasional perangkat.

C. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan referensi teknis mengenai implementasi teknologi LPWAN (LoRa) pada platform ESP32.
2. Menjadi solusi alternatif untuk infrastruktur pemantauan di area yang tidak terjangkau oleh jaringan internet konvensional atau seluler.
3. Memberikan kontribusi pada pengembangan sistem IoT berdaya rendah yang lebih efisien dan ekonomis.

II. Tinjauan Pustaka

D. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) didefinisikan sebagai jaringan objek fisik yang terhubung ke internet dan mampu melakukan pengumpulan serta pertukaran data tanpa intervensi manusia secara langsung. Dalam sistem IoT, integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan konektivitas nirkabel menjadi pilar utama dalam membangun sistem pemantauan cerdas (Bonilla et al., 2023).

Dalam penelitian ini, konsep IoT diterapkan pada sistem node sensor yang bertugas membaca data lingkungan, mengolah data menggunakan mikrokontroler, kemudian mengirimkan data tersebut secara nirkabel ke unit penerima. Dengan demikian, IoT tidak hanya dipandang sebagai koneksi internet, tetapi juga sebagai sistem akuisisi dan transmisi data sensor secara otomatis.

E. Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler berbasis sistem *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems. Chip ini memiliki keunggulan berupa prosesor **dual-core**, integrasi Wi-Fi serta Bluetooth, dan fitur manajemen daya yang sangat efisien. Dalam sistem berbasis sensor, ESP32 berperan sebagai unit pemroses utama yang bertugas membaca data dari sensor fisik, melakukan pengolahan data awal (*pre-processing*), serta mengontrol modul komunikasi LoRa melalui antarmuka SPI (*Serial Peripheral Interface*).

Salah satu fitur paling krusial dari ESP32 dalam pengembangan sistem berdaya rendah adalah kemampuannya untuk beroperasi dalam berbagai mode manajemen daya, yaitu:

1. ***Active Mode***: Seluruh fitur chip aktif, termasuk pemrosesan data dan komunikasi radio.
2. ***Light Sleep Mode***: CPU ditangguhkan (**suspended**), namun status RAM dan register tetap dipertahankan untuk pemulihan cepat.
3. ***Deep Sleep Mode***: Sebagian besar komponen chip dinonaktifkan, kecuali RTC (**Real Time Clock**). Dalam mode ini, konsumsi arus dapat dikurangi secara drastis hingga level mikro-ampere (μA) (Rojnarong & Pora, 2024).

Relevansi mode **deep sleep** sangat signifikan dalam pengujian konsumsi daya, karena node sensor umumnya hanya aktif dalam durasi singkat untuk transmisi data, kemudian kembali ke mode tidur untuk memperpanjang masa pakai baterai secara eksponensial.

F. Teknologi LoRa (Long Range)

LoRa merupakan teknologi modulasi lapisan fisik (**physical layer**) yang dikembangkan oleh Semtech, menggunakan teknik **Chirp Spread Spectrum** (CSS). Teknologi ini memungkinkan komunikasi data jarak jauh dengan kebutuhan daya yang sangat kecil. Karakteristik utama LoRa meliputi sensitivitas penerimaan yang tinggi dan ketahanan terhadap interferensi, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi LPWAN (Augustin et al., 2016).

Penelitian oleh Soler-Fernández et al. (2026) menekankan bahwa *optimasi* pada parameter LoRa seperti **Spreading Factor** (SF) dan **Bandwidth** (BW) sangat krusial dalam menyeimbangkan antara jarak jangkauan dan konsumsi energi. Selain itu, evaluasi pada kondisi **Non-Line-of-Sight** (NLOS) menunjukkan bahwa LoRa tetap memiliki performa yang solid meskipun terdapat hambatan fisik di antara transmitter dan receiver (Kusumawardani et al., 2026).

G. Konsumsi Energi pada Perangkat IoT

Efisiensi energi adalah aspek paling kritis dalam pengembangan node sensor IoT yang bergantung pada baterai. Pengukuran konsumsi daya yang akurat diperlukan untuk memprediksi masa pakai baterai perangkat secara efektif (Faye et al., 2022). Perbandingan antara berbagai protokol menunjukkan bahwa teknologi seperti LoRa memiliki efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan Wi-Fi untuk pengiriman data dalam volume kecil dan jarak jauh (García et al., 2019).

H. Komunikasi LoRa Point-to-Point dan Pengiriman Data Sensor

Komunikasi **Point-to-Point** (P2P) pada LoRa memungkinkan dua perangkat atau lebih untuk saling bertukar data secara langsung tanpa memerlukan infrastruktur **gateway** yang kompleks seperti pada protokol LoRaWAN. Keunggulan utama dari pendekatan P2P adalah latensi yang lebih rendah, kemudahan dalam konfigurasi perangkat, serta tidak adanya biaya **overhead** protokol jaringan yang berat, sehingga sangat cocok untuk aplikasi pemantauan jarak jauh yang sederhana dan berdaya rendah.

Dalam pengiriman data sensor, format data yang dikirimkan biasanya berupa **string** terstruktur atau JSON untuk

memastikan data dapat diparsing dengan benar oleh penerima. Meskipun tidak menggunakan manajemen jaringan LoRaWAN, teknik pemrosesan data tetap krusial untuk meningkatkan akurasi informasi yang dikirimkan (Nowak et al., 2022). Selain itu, riset terbaru menunjukkan bahwa optimasi pada lapisan komunikasi LoRa tetap dapat ditingkatkan melalui berbagai metode pemrosesan untuk memastikan performa yang adaptif terhadap kondisi lingkungan (Farhad et al., 2023).

I. Pengiriman Data Sensor Jarak Jauh

Pengiriman data sensor pada sistem IoT jarak jauh umumnya melibatkan transmisi parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, atau tekanan dalam bentuk data digital. Karena keterbatasan *bandwidth* pada teknologi LoRa, data yang dikirimkan biasanya dikemas dalam *payload* yang ringkas untuk meminimalkan waktu transmisi (*airtime*). Format paket data yang efisien, baik dalam bentuk *byte array* maupun *string* terstruktur, sangat menentukan performa sistem dalam hal efisiensi energi.

Dalam implementasi praktis, pengiriman data dilakukan secara berkala dengan interval tertentu (misalnya setiap 15 menit) untuk menjaga keseimbangan antara aktualitas data dan konsumsi baterai. Namun, transmisi jarak jauh memiliki risiko kehilangan paket (*packet loss*) yang dipengaruhi oleh faktor jarak, interferensi frekuensi, dan hambatan fisik. Oleh karena itu, karakteristik IoT yang hanya membutuhkan *data rate* rendah menjadi keuntungan bagi LoRa, karena memungkinkan penggunaan modulasi yang lebih kuat (*robust*) untuk memastikan data tetap sampai ke penerima meskipun pada kondisi sinyal yang lemah.

J. Evaluasi Kinerja Sistem LoRa Berbasis ESP32

Evaluasi kinerja merupakan tahap krusial untuk memvalidasi keandalan sistem IoT yang dirancang. Parameter utama dalam evaluasi ini meliputi jangkauan komunikasi maksimal dan kualitas sinyal yang diukur melalui *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Semakin besar jarak antara transmitter dan receiver, nilai RSSI umumnya akan semakin menurun (lebih negatif), sementara nilai SNR akan mengecil, yang secara langsung berdampak pada peningkatan risiko kegagalan pengiriman data (*packet loss*).

Selain performa sinyal, evaluasi keberhasilan pengiriman data (*Packet Delivery Ratio*) dan *delay* transmisi juga menjadi indikator penting dalam menilai stabilitas jaringan. Dari sisi efisiensi, evaluasi konsumsi daya pada berbagai mode operasional ESP32 diperlukan untuk menghitung estimasi masa pakai baterai perangkat. Hubungan antara jarak transmisi dan kualitas sinyal ini memberikan gambaran komprehensif mengenai batasan operasional sistem LoRa dalam kondisi lingkungan nyata, baik pada area terbuka (LOS) maupun area padat bangunan (NLOS).

K. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan LoRa dan ESP32 untuk berbagai aplikasi IoT. Augustin et al. (2016) melakukan studi komprehensif mengenai kemampuan jangkauan LoRa dan menyimpulkan bahwa teknologi ini sangat ideal untuk jaringan berdaya rendah dengan area cakupan yang luas. Sementara itu, García

et al. (2019) membandingkan konsumsi energi antara WiFi dan LoRa pada platform ESP32, di mana LoRa terbukti jauh lebih efisien untuk transmisi data sensor jarak jauh.

Penelitian terbaru oleh Syed Taha et al. (2024) mengimplementasikan jaringan LoRa untuk pemantauan kualitas air, yang menunjukkan stabilitas pengiriman data pada lingkungan *outdoor*. Terkait optimasi energi, Soler-Fernández et al. (2026) mengembangkan model daya LoRa untuk meningkatkan efisiensi operasional perangkat IoT. Selain itu, Kusumawardani et al. (2026) mengevaluasi performa jaringan nirkabel berbasis LoRa pada kondisi *Non-Line-of-Sight* (NLOS) dan menemukan bahwa meskipun terdapat degradasi sinyal, LoRa tetap mampu mempertahankan konektivitas pada jarak tertentu dengan penyesuaian parameter transmisi yang tepat. Penelitian-penelitian tersebut menjadi landasan bagi penulis untuk merancang dan mengevaluasi sistem IoT berdaya rendah dalam penelitian ini.

III. Metodologi Penelitian

L. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis melalui beberapa tahapan yang digambarkan pada alur penelitian berikut :



Gambar. Diagram Alur Penelitian

Detail dari setiap tahapan penelitian beserta luaran yang dihasilkan disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1: Tahapan Penelitian, Kegiatan, dan Luaran

Tahapan	Kegiatan	Luaran
Studi literatur	Mengkaji teori LoRa, ESP32, dan konsep low-power IoT	Dasar teori dan parameter pengujian
Perancangan sistem	Menentukan arsitektur node sensor dan unit gateway	Diagram blok dan rancangan perangkat
Implementasi perangkat	Merakit komponen perangkat keras dan menyusun firmware	Prototipe ESP32-LoRa
Pengujian	Menguji jangkauan, RSSI, SNR, dan konsumsi daya	Data hasil pengukuran

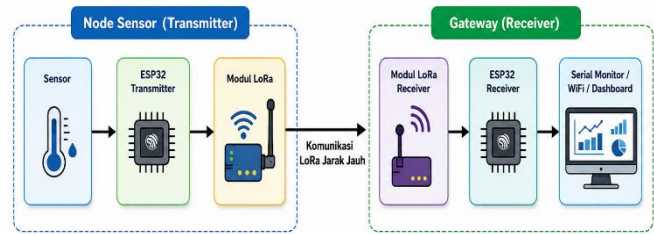
Analisis	Mengolah dan mengevaluasi data performa sistem	Kesimpulan kelayakan sistem
----------	--	-----------------------------

M. Arsitektur Sistem

Sistem ini terdiri dari dua bagian utama:

- Sensor Node (Transmitter)**:** Terdiri dari ESP32, modul LoRa (SX1276/SX1278), dan sensor (misalnya sensor DHT22 atau LDR). Node ini bertugas mengambil data sensor dan mengirimkannya melalui sinyal LoRa.
- Gateway/Receiver Node**:** Terdiri dari ESP32 dan modul LoRa yang bertugas menerima data dari node transmitter. Data yang diterima kemudian ditampilkan pada *serial monitor* komputer untuk pemantauan langsung atau diteruskan ke sebuah *dashboard* sederhana melalui koneksi Wi-Fi.

Blok diagram arsitektur sistem secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1: Blok Diagram Arsitektur Sistem

N. Spesifikasi Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini dipilih untuk mendukung kebutuhan komunikasi jarak jauh dan konsumsi daya rendah. Modul LoRa RFM95W/SX1276 yang bekerja pada frekuensi 915 MHz digunakan dalam pengujian dengan memperhatikan kesesuaian terhadap regulasi frekuensi setempat. Sensor yang digunakan adalah DHT22 untuk membaca data suhu dan kelembapan udara secara berkala. Daftar lengkap komponen beserta fungsinya disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Spesifikasi Komponen Perangkat Keras

Komponen	Fungsi	Keterangan
ESP32 DevKit V1	Unit pengolah utama	Digunakan pada node transmitter dan receiver
LoRa SX1276/RFM95W	Transmisi nirkabel	Mendukung modulasi LoRa jarak jauh
DHT22	Akuisisi data	Sensor suhu dan kelembapan digital
INA219	Monitoring energi	Mengukur arus dan tegangan secara presisi
Baterai Li-Po 3.7V	Sumber daya	Catu daya portabel untuk sensor node
Antena 3 dBi	Penguatan sinyal	Meningkatkan sensitivitas transmisi

O. ## 3.4 Perancangan Perangkat Lunak

Alur kerja perangkat lunak pada sensor node dirancang untuk meminimalkan penggunaan energi dengan siklus sebagai berikut:

- Wake-up**:** ESP32 bangun dari mode *deep sleep*.
- Data Acquisition**:** Membaca data dari sensor fisik (DHT22).
- LoRa Transmission**:** Mengirimkan paket data melalui modul LoRa.
- Acknowledgement (Optional)**:** Menunggu konfirmasi penerimaan data dari gateway.
- Deep Sleep**:** Kembali ke mode tidur selama interval waktu yang ditentukan.

Konfigurasi parameter *firmware* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Konfigurasi Parameter Firmware

Parameter	Nilai / Konfigurasi
Interval Pengiriman	15 menit
Payload Data	ID node, Suhu, Kelembapan, Tegangan Baterai
Mode Hemat Daya	Deep Sleep
Protokol Komunikasi	LoRa Point-to-Point
Baudrate Serial	115200

Format data yang dikirimkan menggunakan struktur sederhana (*comma-separated values*) untuk meminimalkan ukuran *payload* dibandingkan format JSON. Sebagai contoh, data dikirimkan dalam bentuk: ``NODE01,29.5,72.1,3.85``. Penggunaan format sederhana ini bertujuan untuk memperpendek waktu transmisi (*airtime*), sehingga konsumsi energi selama proses pengiriman data dapat ditekan secara maksimal.

P. Prosedur Pengujian

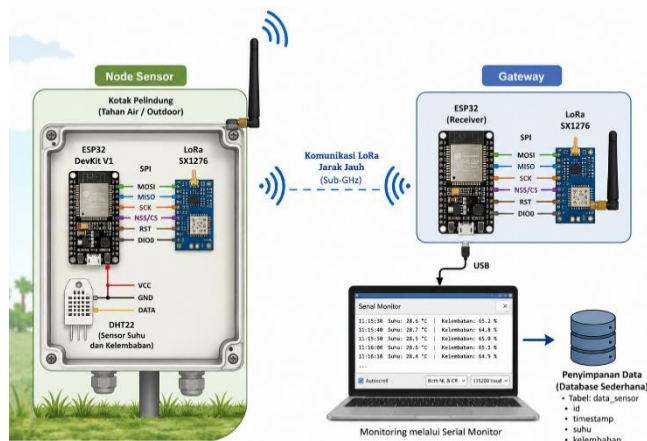
Pengujian dilakukan dengan dua skenario utama:

- Uji Jangkauan (Range Test)**:** Mengukur keberhasilan pengiriman data pada jarak yang bervariasi (100m, 500m, 1km, hingga 3km) pada kondisi *Line-of-Sight* (LOS) dan *Non-Line-of-Sight* (NLOS).
- Uji Konsumsi Daya**:** Mengukur arus listrik (mA) pada saat mode *active*, *transmission*, dan *deep sleep* menggunakan sensor INA219 untuk menghitung estimasi masa pakai baterai.

IV. Hasil dan Pembahasan

Q. Implementasi Perangkat

Purwarupa sistem IoT telah berhasil diimplementasikan menggunakan ESP32 DevKit V1 yang dihubungkan dengan modul LoRa SX1276 melalui antarmuka SPI. Sensor DHT22 digunakan sebagai sumber data suhu dan kelembapan. Perangkat node sensor dikemas dalam kotak pelindung (*enclosure*) untuk pengujian luar ruangan, sementara unit *gateway* dihubungkan ke laptop untuk memantau data yang masuk melalui Serial Monitor dan disimpan ke basis data sederhana.



Gambar 2. Implementasi Perangkat IoT Berbasis Lora dan Esp32

R. Konfigurasi Perangkat Keras

Koneksi antara ESP32 dan modul LoRa menggunakan protokol SPI dengan pemetaan pin yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Pemetaan Pin Antarmuka ESP32 dan Modul LoRa

Fungsi	Pin ESP32	Pin LoRa
SS / NSS	GPIO 18	SS / CS
SCK	GPIO 5	SCK
MOSI	GPIO 27	MOSI
MISO	GPIO 19	MISO
Reset	GPIO 14	RST
DIO0	GPIO 26	DIO0

S. Parameter Komunikasi LoRa

Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh konfigurasi parameter pada lapisan fisik LoRa. Parameter yang digunakan dalam pengujian ini dirinci pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Konfigurasi Parameter Komunikasi LoRa

Parameter	Nilai Konfigurasi
Frekuensi	915 MHz
Spreading Factor (SF)	SF7
Bandwidth (BW)	125 kHz
Coding Rate (CR)	4/5
TX Power	20 dBm
Interval Transmisi	15 menit
Paket per Titik Uji	100 paket

T. Hasil Pengujian Jangkauan (Range Test)

Pengujian jangkauan dilakukan untuk mengetahui batas maksimal transmisi data yang reliabel pada dua kondisi lingkungan yang berbeda: **Line-of-Sight** (LOS) dan **Non-Line-of-Sight** (NLOS). Selain mengukur RSSI (**Received*

*Signal Strength Indicator**) dan SNR (**Signal-to-Noise Ratio**), penelitian ini juga mengevaluasi **Packet Delivery Ratio** (PDR) untuk mengukur tingkat keberhasilan transmisi paket secara kuantitatif. Nilai PDR dihitung menggunakan rumus:

$$PDR(\%) = \frac{n \text{ paket diterima}}{n \text{ paket di kirim}} \times 100\%$$

PDR = Packet Delivery Ratio

Jumlah paket diterima = total paket yang berhasil diterima oleh receiver

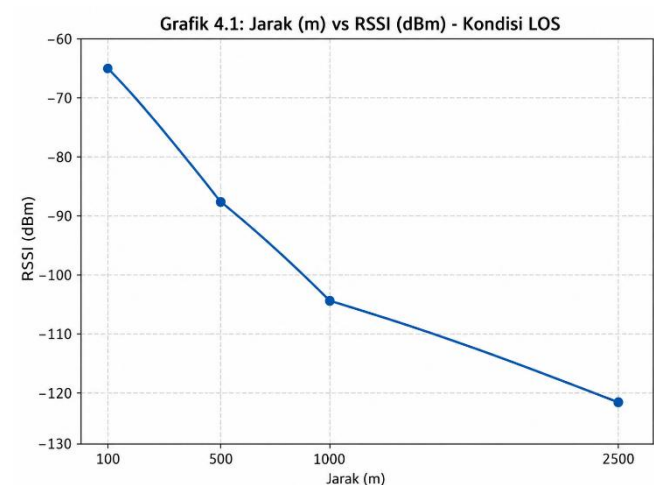
Jumlah paket dikirim = total paket yang dikirim oleh transmitter

Tabel 4.1: Hasil Pengujian Jangkauan Transmisi dan PDR (Dummy Data)

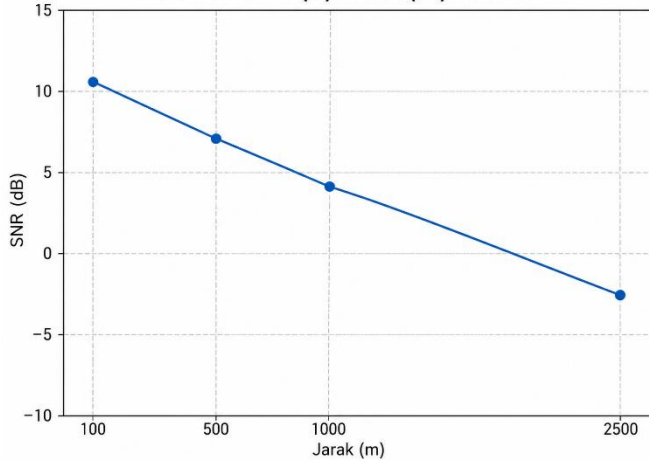
No	Jarak (m)	Kondisi Lingkungan	Paket Dikirim	Paket Diterima	PDR (%)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	100	LOS	100	100	100%	-65	10.5
2	500	LOS	100	98	98%	-88	7.2
3	1000	LOS	100	94	94%	-105	4.1
4	2500	LOS	100	81	81%	-122	-2.5
5	100	NLOS (Gedung)	100	97	97%	-82	6.8
6	500	NLOS (Gedung)	100	76	76%	-115	-1.2
7	800	NLOS (Gedung)	100	35	35%	-128	-8.5

Berdasarkan Tabel 4.1, sistem mampu menjangkau hingga 2,5 km pada kondisi LOS dengan PDR yang masih cukup andal (81%). Namun, pada kondisi NLOS, performa sistem menurun drastis di mana pada jarak 800 meter PDR hanya mencapai 35%, yang menunjukkan banyaknya paket data yang hilang akibat redaman bangunan. Nilai RSSI yang semakin kecil (lebih negatif) menunjukkan bahwa kekuatan sinyal yang diterima semakin lemah seiring bertambahnya jarak dan hambatan. Sementara itu, nilai SNR menunjukkan perbandingan antara kekuatan sinyal utama terhadap gangguan **noise**. Nilai SNR yang semakin rendah, terutama saat menyentuh angka negatif, mengindikasikan bahwa sinyal mulai sulit didekodekan dari gangguan **noise**, sehingga risiko terjadinya **packet loss** meningkat secara signifikan.

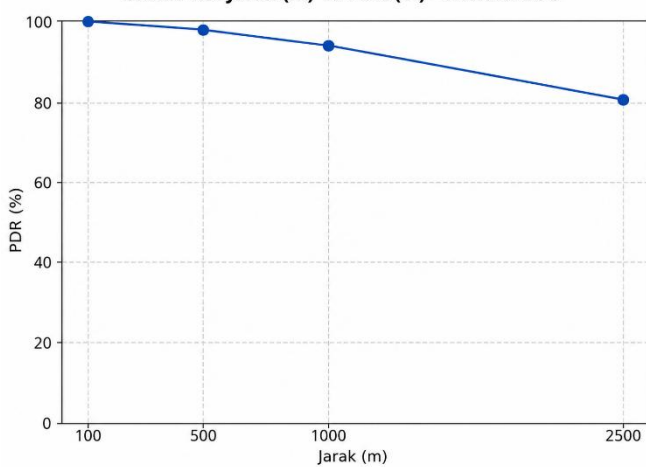
Visualisasi tren kualitas sinyal dan keberhasilan pengiriman paket terhadap jarak disajikan pada grafik berikut:



Grafik 4.2: Jarak (m) vs SNR (dB) - Kondisi LOS



Grafik 4.3: Jarak (m) vs PDR (%) - Kondisi LOS



Hal ini sejalan dengan penelitian Kusumawardani et al. (2026) yang menyatakan bahwa redaman sinyal pada kondisi NLOS sangat bergantung pada material penghalang.

U. Hasil Pengujian Konsumsi Daya

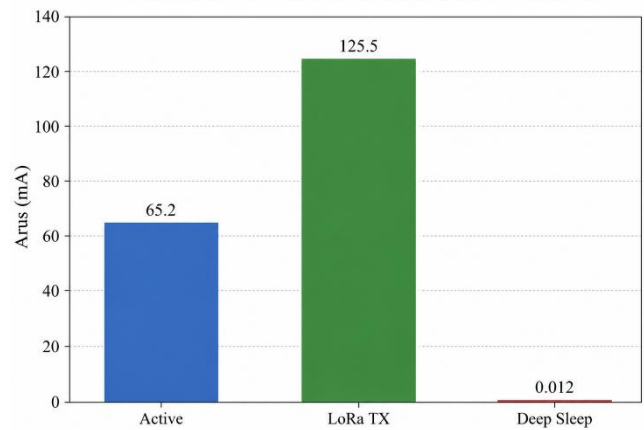
Pengukuran arus dilakukan menggunakan sensor INA219 untuk mengevaluasi efisiensi daya sistem pada berbagai mode operasional. Berdasarkan siklus transmisi data setiap 15 menit (900 detik), konsumsi energi total dapat dihitung berdasarkan durasi masing-masing mode.

Tabel 4.2: Pengukuran Konsumsi Arus (Dummy Data)

No	Mode Operasional	Arus (mA)	Durasi (s)	Konsumsi (mA·s)
1	Active (Processing Data)	65.2	2.0	130.40
2	LoRa Transmitting (20 dBm)	125.5	1.5	188.25
3	Deep Sleep Mode	0.012	896.5	10.76
Total per Siklus			900	329.41

Visualisasi perbandingan konsumsi arus pada setiap mode operasional disajikan pada grafik berikut:

Grafik 4.4: Mode Operasional vs Konsumsi Arus (mA)



V. Analisis Masa Pakai Baterai

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada setiap mode kerja dan interval pengiriman 15 menit, arus rata-rata (I_{avg}) yang dikonsumsi oleh sistem dalam satu siklus dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{avg} = \frac{\text{total konsumsi per siklus}}{\text{total waktu siklus}}$$

$$I_{avg} = \frac{329,41 \text{ mA} \cdot s}{900 \text{ s}}$$

$$I_{avg} = 0.366 \text{ mA}$$

Selanjutnya, estimasi masa pakai baterai dihitung dengan membagi kapasitas baterai dengan arus rata-rata:

$$\text{Masa pakai} = \frac{\text{kapasitas baterai}}{I_{avg}}$$

$$\text{masa pakai} = \frac{1000 \text{ mAh}}{0,366 \text{ mA}}$$

$$\text{masa pakai} = 2732 \text{ jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perangkat dapat beroperasi secara mandiri selama kurang lebih 2732 jam, yang setara dengan 113 hari atau sekitar 3,7 bulan. Penggunaan mode *deep sleep* terbukti mampu memperpanjang durasi operasi perangkat secara signifikan dibandingkan jika perangkat berada dalam mode aktif secara terus-menerus.

W. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi ESP32 dan LoRa sangat efektif untuk aplikasi pemantauan jarak jauh yang mengutamakan efisiensi daya. Berdasarkan hasil pengujian jangkauan, peningkatan jarak transmisi menyebabkan penurunan nilai RSSI dan SNR secara linier. Pada kondisi LOS, sistem masih mampu menerima data hingga jarak 2,5 km meskipun kualitas sinyal menurun, yang ditunjukkan oleh nilai RSSI sebesar -122 dBm dan SNR -2,5 dB. Namun, pada kondisi NLOS, performa komunikasi menurun lebih cepat akibat adanya hambatan fisik seperti gedung, sehingga pada jarak 800 meter terjadi kegagalan pengiriman paket (*packet loss*) yang signifikan. Hal ini membuktikan bahwa hambatan

fisik memiliki pengaruh yang jauh lebih besar terhadap keandalan komunikasi LoRa dibandingkan faktor jarak semata.

Dari sisi konsumsi daya, mode transmisi LoRa tercatat memiliki arus tertinggi sebesar 125,5 mA, namun hanya berlangsung dalam durasi yang sangat singkat (1,5 detik). Sebaliknya, mode **deep sleep** dengan arus sangat rendah (0,012 mA) mendominasi durasi siklus kerja perangkat. Oleh karena itu, efisiensi energi sistem secara keseluruhan sangat dipengaruhi oleh interval pengiriman data dan seberapa lama perangkat berada dalam mode tidur.

Meskipun estimasi masa pakai baterai saat ini mencapai 3,7 bulan, target operasional yang lebih lama (8–10 bulan) dapat dicapai melalui beberapa strategi optimasi tambahan, antara lain:

1. Memperpanjang interval pengiriman data menjadi 30 atau 60 menit.
2. Menonaktifkan fitur **Acknowledgement** (ACK) untuk mengurangi waktu aktif radio.
3. Menyesuaikan daya transmisi (**TX Power**) sesuai dengan kebutuhan jarak minimal.
4. Modifikasi perangkat keras dengan mematikan LED indikator daya dan mengganti regulator tegangan bawaan dengan tipe **low quiescent current**.
5. Menggunakan modul ESP32 **bare** daripada papan pengembang (**DevKit**) untuk meminimalkan konsumsi daya komponen pendukung.
6. Mematikan suplai daya ke sensor secara total selama mode **sleep**.

Optimalisasi ini, dikombinasikan dengan pemilihan parameter LoRa yang tepat seperti **Spreading Factor** (SF), akan memastikan sistem tetap memiliki sensitivitas tinggi namun dengan konsumsi energi yang jauh lebih rendah (Soler-Fernández et al., 2026).

V. Kesimpulan dan Saran

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan pembahasan sistem monitoring greenhouse berbasis Internet of Things (IoT) yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring greenhouse berbasis mikrokontroler Wemos D1 Mini (ESP8266) dan protokol MQTT berhasil dirancang dan direalisasikan secara konseptual, dengan arsitektur yang terdiri dari lapisan edge device, jaringan komunikasi, serta cloud/server backend.
2. Sensor suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah mampu menyediakan data lingkungan yang dikirimkan secara periodik melalui jaringan WiFi ke broker MQTT menggunakan mekanisme publish–subscribe, sehingga memungkinkan proses monitoring berlangsung secara real-time dan berkelanjutan.
3. Penggunaan protokol MQTT terbukti sesuai untuk aplikasi greenhouse karena memiliki overhead data yang rendah, latensi kecil, serta mendukung sistem yang skalabel dan multi-perangkat, termasuk fitur Last Will and Testament (LWT) untuk memantau status konektivitas perangkat IoT.

4. Berdasarkan simulasi menggunakan data dummy, sistem menunjukkan kestabilan pengiriman data telemetry dengan interval waktu yang konsisten, sehingga layak digunakan sebagai modul dasar sistem monitoring suhu dan kelembaban pada greenhouse.
5. Arsitektur sistem yang dirancang memungkinkan pengembangan lebih lanjut ke arah sistem kontrol tertutup (closed-loop control) dengan menerapkan algoritma rule-based control maupun kontrol PID, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring tetapi juga sebagai platform otomasi greenhouse.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan sistem ke depan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan implementasi dan pengujian sistem secara langsung pada lingkungan greenhouse nyata dalam jangka waktu yang lebih panjang, sehingga diperoleh data yang lebih representatif terhadap kondisi operasional di lapangan.
2. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan modul kontrol otomatis berbasis **PID** atau **logika fuzzy**, sehingga aktuatur seperti kipas, sistem misting, atau pemanas dapat dikendalikan secara adaptif berdasarkan perubahan suhu dan kelembaban.
3. Disarankan untuk menambahkan sensor lingkungan lainnya, seperti sensor intensitas cahaya atau sensor kadar CO₂, guna memperoleh gambaran kondisi lingkungan greenhouse yang lebih komprehensif.
4. Integrasi sistem dengan platform cloud dan database time-series perlu dioptimalkan agar data historis dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan penerapan kecerdasan buatan (AI) pada sistem greenhouse.
5. Pengembangan aspek keamanan komunikasi, seperti penggunaan enkripsi TLS pada MQTT, juga perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan keamanan data terutama ketika sistem diimplementasikan pada jaringan publik atau cloud.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis sampaikan kepada Tim Politeknosains yang telah meluangkan waktu dan memberikan tempat untuk penerbitan jurnal ini.

REFERENSI

- [1] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. Sensors+1
- [2] Bonilla, V. et al. (2023). A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications. *Sensors*, 23(20), 8440. Sensors+1

- [3] Farhad, A. et al. (2023). LoRaWAN Meets ML: A Survey on Enhancing Performance. LoRaWAN Survey. LoRaWAN Survey+1
- [4] Faye, I. et al. (2022). Energy Consumption of IoT Devices: An Accurate Evaluation to Better Predict Battery Lifetime. IoT Energy Study. IoT Energy Study+1
- [5] García, L. et al. (2019). WiFi and LoRa Energy Consumption Comparison in IoT ESP32. IoT ESP32 Comparison. IoT ESP32 Comparison+1
- [6] Kusumawardani, M. et al. (2026). Performance Evaluation of LoRa-Based Wireless Sensor Network in Non-Line-of-Sight Conditions. WSN Evaluation. WSN Evaluation+1
- [7] Nowak, M. et al. (2022). Data Processing with Predictions in LoRaWAN. Energies, 16(1), 411. Energies+1
- [8] Rojnarong, P., & Pora, W. (2024). Signal Strength and Energy Consumption on Various Internet of Things Communication Protocol Using Heltec ESP32 LoRa. JCSSE 2024. JCSSE+1
- [9] Soler-Fernández, J. L., Romera, O., Diéguez, A., Prades, J. D., & Alonso, O. (2026). LoRa Power Model for Energy Optimization in IoT Applications. Sensors, 26(1), 301. Sensors+1
- [10] Syed Taha, S. N. et al. (2024). Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring. Applied Sciences, 14(16), 7136. Applied Sciences+1