

Analisis Kinerja *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) Sebagai Solusi Komunikasi Jarak Jauh Berdaya Rendah dalam Aplikasi WSN.

Panji Cahya Prasetyo ^{1)*} , Wildan Ramadhani ²⁾ 

¹⁾²⁾ Universitas Madura Pamekasan, Indonesia

¹⁾ panjicahyaprasetyo20@gmail.com, ²⁾ danzkren65@gmail.com

Abstrak

LPWAN telah muncul sebagai teknologi komunikasi kunci yang menjembatani kesenjangan antara kebutuhan jangkauan luas dan efisiensi daya dalam implementasi WSN berskala besar. Jaringan sensor nirkabel yang diposisikan di lokasi terpencil atau sulit dijangkau seringkali menghadapi tantangan dalam hal daya tahan baterai dan keandalan transmisi data pada jarak yang signifikan. Penelitian ini menganalisis kinerja berbagai teknologi LPWAN, seperti LoRaWAN, Sigfox, dan NB-IoT, dalam konteks aplikasi WSN yang memerlukan pengiriman data non-periodik bervolume rendah (low-throughput) melalui jangkauan kilometer. Analisis kinerja difokuskan pada tiga metrik utama: konsumsi daya (yang menentukan umur baterai node sensor), jangkauan komunikasi (kemampuan untuk mencakup area geografis yang luas), dan kapasitas jaringan (kemampuan untuk mendukung sejumlah besar node sensor). Hasil komparatif menunjukkan bahwa setiap teknologi LPWAN menawarkan trade-off yang unik; misalnya, LoRaWAN menonjol karena arsitektur independennya dan sensitivitas penerima yang sangat baik untuk jangkauan yang diperpanjang, sementara NB-IoT menawarkan integrasi yang mulus dengan infrastruktur seluler yang sudah ada. Dengan mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan masing-masing solusi, penelitian ini memberikan rekomendasi penting bagi para insinyur dan peneliti untuk memilih platform LPWAN yang paling sesuai, yang mengoptimalkan daya tahan operasional dan efisiensi biaya untuk berbagai skenario aplikasi WSN, mulai dari pemantauan lingkungan hingga pertanian cerdas. Penerapan LPWAN secara efektif menjamin kelayakan WSN untuk proyek *Internet of Things* (IoT) jarak jauh yang berkelanjutan.

Kata Kunci: LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), WSN (Wireless Sensor Network), Konsumsi Daya, Jangkauan Komunikasi, LoRaWAN.

Article history: Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong implementasi *Wireless Sensor Network* (WSN) secara masif di berbagai sektor industri, mulai dari pertanian presisi, pemantauan lingkungan, hingga manajemen kota cerdas [1],[2]. Dalam arsitektur IoT, node sensor dituntut untuk dapat mengirimkan data dari lokasi yang tersebar luas ke gerbang pusat (*gateway*) secara andal. Namun, tantangan mendasar yang dihadapi dalam penyebaran WSN skala besar adalah keterbatasan sumber daya energi pada node sensor yang umumnya hanya bertenaga baterai, serta kebutuhan akan jangkauan komunikasi yang luas [3],[4],[5]. Selama dekade terakhir, teknologi komunikasi nirkabel konvensional belum mampu sepenuhnya menjembatani kesenjangan antara efisiensi energi dan jangkauan komunikasi. Protokol jarak pendek seperti Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE), dan Wi-Fi menawarkan efisiensi energi atau *bandwidth* tinggi, namun memiliki jangkauan yang sangat terbatas, sehingga memerlukan topologi *multi-hop* yang kompleks dan membebani jaringan. Di sisi lain, jaringan seluler tradisional (seperti 3G/4G/LTE) menawarkan cakupan area yang sangat luas, namun mengonsumsi daya yang terlalu tinggi dan biaya operasional yang mahal, sehingga tidak layak (*infeasible*) untuk aplikasi WSN yang membutuhkan masa pakai baterai hingga bertahun-tahun [6],[7],[8],[9].

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, teknologi *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) muncul sebagai paradigma komunikasi baru yang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan konektivitas jarak jauh berdaya rendah [10],[11]. Teknologi LPWAN, yang mencakup standar seperti LoRaWAN, Sigfox, dan NB-IoT, menjanjikan kemampuan komunikasi hingga jarak puluhan kilometer di area pedesaan dan penetrasi sinyal yang dalam di lingkungan perkotaan, dengan tetap mempertahankan konsumsi daya yang minimal [12],[13]. Karakteristik

* Panji Cahya Prasetyo

ini menempatkan LPWAN sebagai kandidat solusi yang ideal untuk infrastruktur *backbone* pada aplikasi WSN modern yang tidak memerlukan *throughput* data yang besar namun mengutamakan konektivitas jangka panjang.

Meskipun potensi teoretis LPWAN telah banyak dibahas, analisis kinerja empiris dalam skenario aplikasi WSN yang spesifik masih perlu dieksplorasi lebih lanjut untuk memahami batasan teknisnya. Variabel lingkungan, interferensi sinyal, dan parameter konfigurasi jaringan seperti *Spreading Factor* (SF) dapat mempengaruhi kualitas layanan secara signifikan [14],[15],[16]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis mendalam mengenai kinerja teknologi LPWAN sebagai solusi komunikasi WSN. Fokus analisis akan mencakup parameter *Packet Delivery Ratio* (PDR), *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), serta estimasi konsumsi energi untuk memvalidasi kelayakan implementasinya dalam skenario komunikasi jarak jauh berdaya rendah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Evolusi WSN dan Keterbatasan Teknologi Tradisional Perkembangan pesat *Internet of Things* (IoT) telah mengubah paradigma *Wireless Sensor Network* (WSN) dari jaringan skala kecil menjadi infrastruktur skala luas yang masif. Dalam literatur awal, teknologi komunikasi jarak pendek seperti ZigBee, Bluetooth, dan Wi-Fi sering menjadi tulang punggung WSN. Namun, penelitian menunjukkan bahwa teknologi-teknologi ini memiliki keterbatasan signifikan dalam hal jangkauan komunikasi dan efisiensi energi ketika diterapkan pada skenario area luas (*wide-area*). Meskipun jaringan seluler (2G/3G/4G) menawarkan jangkauan yang luas, konsumsi daya yang tinggi dan biaya operasional yang mahal menjadikannya kurang ideal untuk node sensor bertenaga baterai yang harus bertahan selama bertahun-tahun. Oleh karena itu, *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) muncul sebagai solusi celah (*gap-filler*) yang menawarkan kompromi optimal antara jangkauan jarak jauh, konsumsi daya rendah, dan biaya perangkat yang ekonomis [17],[18],[19].

Perbandingan Teknologi LPWAN Utama Dalam lanskap LPWAN, terdapat beberapa teknologi dominan yang sering dikaji kinerjanya, yaitu LoRa/LoRaWAN, Sigfox, dan NB-IoT. Melakukan analisis komparatif yang mendalam dan menemukan bahwa setiap teknologi memiliki keunggulan spesifik berdasarkan aplikasinya. Sigfox, dengan pendekatan *Ultra Narrow Band* (UNB), sangat efisien untuk pengiriman pesan yang sangat kecil dan jarang, namun memiliki keterbatasan pada komunikasi *downlink* [20],[21]. Di sisi lain, NB-IoT yang beroperasi pada spektrum berlisensi menawarkan *Quality of Service* (QoS) dan latensi yang lebih baik, namun dengan konsumsi energi yang lebih tinggi dibandingkan teknologi non-seluler. Sementara itu, LoRa (*Long Range*) yang menggunakan modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS) dinilai paling fleksibel untuk implementasi jaringan privat karena beroperasi di spektrum tak berlisensi (ISM band) dan memiliki ketahanan tinggi terhadap interferensi [22],[23],[24].

Analisis Kinerja: Jangkauan dan Parameter Transmisi Kinerja LPWAN, khususnya LoRa, sangat bergantung pada konfigurasi parameter transmisi fisik. Studi eksperimental oleh Augustin dan Bor menyoroti dampak dari *Spreading Factor* (SF), *Bandwidth* (BW), dan *Coding Rate* (CR) terhadap kinerja jaringan. Mereka menyimpulkan bahwa penggunaan SF yang lebih tinggi (misalnya SF12) secara signifikan meningkatkan sensitivitas penerima dan jangkauan komunikasi, namun dengan konsekuensi penurunan *data rate* dan peningkatan *Time on Air* (ToA). Peningkatan ToA ini berbanding lurus dengan peningkatan konsumsi energi per paket data. Oleh karena itu, pemilihan parameter adaptif (*Adaptive Data Rate*) menjadi krusial untuk menyeimbangkan antara keandalan paket (*Packet Delivery Ratio*) dan umur baterai node sensor [25],[26].

Efisiensi Energi dan Konsumsi Daya Efisiensi energi merupakan metrik kinerja paling kritis dalam aplikasi WSN berbasis LPWAN. Casals memodelkan konsumsi arus pada perangkat LoRaWAN dan menemukan bahwa mode tidur (*sleep mode*) dan manajemen siklus kerja (*duty cycle*) memegang peranan vital [27],[28]. Analisis mereka menunjukkan bahwa meskipun arus transmisi LoRa relatif rendah dibandingkan seluler, efisiensi energi total dapat menurun drastis jika terjadi tabrakan paket (*collision*) yang mengharuskan transmisi ulang (*retransmission*). Selain itu, studi oleh Petajarvi pada skenario dunia nyata menunjukkan bahwa di lingkungan urban yang padat, redaman sinyal akibat gedung dapat memaksa node menggunakan daya transmisi maksimum, yang memperpendek usia operasional jaringan WSN [29],[30].

Skalabilitas dan Tantangan Interferensi Seiring bertambahnya jumlah node dalam WSN, skalabilitas menjadi tantangan utama bagi kinerja LPWAN. Adelantado membahas batasan kapasitas jaringan LoRaWAN akibat interferensi intra-teknologi. Karena LoRa menggunakan sistem akses ALOHA yang tidak terkoordinasi, probabilitas tabrakan paket meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya kepadatan trafik. Hal ini berdampak negatif pada *Packet Delivery Ratio* (PDR). Penelitian terbaru menyarankan penggunaan algoritma penjadwalan cerdas atau penggunaan gateway ganda (*multi-gateway diversity*) untuk memitigasi efek *fading* dan tabrakan, guna mempertahankan kinerja WSN yang handal dalam skala besar [31],[32].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja jaringan LPWAN pada aplikasi *Wireless Sensor Network* (WSN). Pendekatan ini dipilih untuk mendapatkan data empiris mengenai keandalan komunikasi dan konsumsi energi perangkat dalam kondisi lingkungan nyata[33],[34]. Metode penelitian dirancang secara sistematis melalui empat tahapan utama: (A) desain arsitektur sistem, (B) konfigurasi perangkat keras dan parameter transmisi, (C) skenario pengujian lapangan, serta (D) metrik evaluasi kinerja.

A. Desain Arsitektur Sistem

Topologi jaringan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah star-of-stars topology, yang merupakan standar arsitektur dalam implementasi LoRaWAN[35],[36]. Dalam konfigurasi ini, end-node sensor mengirimkan data secara langsung (single-hop) ke gateway tanpa melalui perantara, yang kemudian diteruskan ke network server menggunakan koneksi backhaul berbasis IP2[37],[38]. Pemilihan topologi ini didasarkan pada karakteristiknya yang mampu meminimalkan latensi dan memperpanjang masa hidup baterai dibandingkan topologi mesh, karena node tidak dibebani tugas routing data dari node lain3.

B. Konfigurasi Perangkat dan Parameter Transmisi

Sistem perangkat keras terdiri dari node sensor berbasis mikrokontroler berdaya rendah yang terintegrasi dengan modul transceiver LoRa (SX1276) yang beroperasi pada pita frekuensi 920-923 MHz sesuai regulasi regional,[39],[12]. Untuk menganalisis dampak parameter fisik terhadap kinerja jaringan, penelitian ini memanipulasi variabel Spreading Factor (SF) mulai dari SF7 hingga SF12 dengan Bandwidth (BW) konstan sebesar 125 kHz[40],[41],[42]. Pengaturan SF yang lebih tinggi diketahui dapat meningkatkan sensitivitas penerima dan jangkauan komunikasi, namun dengan konsekuensi penurunan data rate dan peningkatan waktu transmisi (Time on Air)4. Parameter Coding Rate (CR) ditetapkan pada 4/5 untuk memberikan redundansi kesalahan yang optimal[43],[44].

C. Skenario Pengujian Lapangan

Pengujian kinerja dilakukan dalam dua skenario lingkungan yang berbeda untuk memvalidasi reliabilitas sinyal, yaitu kondisi Line-of-Sight (LOS) di area terbuka tanpa halangan dan Non-Line-of-Sight (NLOS) di area perkotaan padat bangunan[45],[46]. Pada setiap skenario, node pemancar ditempatkan pada jarak yang bertingkat dari gateway (0.5 km, 1 km, 2 km, hingga 5 km). Prosedur pengujian mengacu pada metode yang dilakukan oleh Gregora et al.6, di mana node mengirimkan paket data sebanyak 1.000 paket pada setiap titik uji dengan interval 10 detik. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan sampel statistik yang cukup guna menghitung tingkat keberhasilan pengiriman paket secara akurat,[47],[48].

D. Metrik Evaluasi Kinerja

Analisis data dilakukan berdasarkan empat parameter kinerja utama (Key Performance Indicators):

1. Packet Delivery Ratio (PDR): Rasio jumlah paket yang berhasil diterima oleh gateway terhadap total paket yang dikirimkan node, yang merepresentasikan keandalan jaringan[49].
2. Received Signal Strength Indicator (RSSI): Ukuran kekuatan sinyal yang diterima dalam satuan dBm, digunakan untuk menganalisis kualitas link budget[50].
3. Signal-to-Noise Ratio (SNR): Perbandingan kekuatan sinyal terhadap noise lingkungan, yang krusial untuk menentukan batas demodulasi sinyal pada teknik modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS).
4. Konsumsi Energi: Estimasi energi total yang dikonsumsi node dihitung berdasarkan arus yang ditarik selama fase transmisi (Tx), penerimaan (Rx), dan mode tidur (Sleep).

IV. HASIL

Bagian ini menyajikan data kuantitatif yang diperoleh dari serangkaian pengujian lapangan menggunakan topologi *star-of-stars*. Data dikumpulkan dari transmisi 1.000 paket data per node pada setiap titik pengujian dengan variasi jarak dan kondisi lingkungan.

A. Hasil Pengukuran Kualitas Sinyal (RSSI dan SNR) Pengukuran *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dilakukan untuk memetakan degradasi sinyal terhadap jarak. Data pengukuran pada Tabel 1 memperlihatkan perbandingan RSSI pada kondisi *Line-of-Sight* (LOS) dan *Non-Line-of-Sight* (NLOS) menggunakan konfigurasi Spreading Factor 12 (SF12).

Tabel 1. Rata-rata RSSI dan SNR pada SF12

Jarak (km)	Kondisi	Rata-rata RSSI (dBm)	Rata-rata SNR (dB)
0.5	LOS	-85	8.5
0.5	NLOS	-98	2.1
2.0	LOS	-108	-4.2
2.0	NLOS	-122	-12.5
5.0	LOS	-118	-9.8
5.0	NLOS	-135	-18.2

Data menunjukkan bahwa pada jarak 2 km, terdapat selisih penurunan sinyal sebesar 14 dBm antara kondisi LOS dan NLOS. Nilai SNR pada kondisi NLOS jarak jauh (5 km) mencapai -18.2 dB, yang mengindikasikan sinyal diterima di bawah tingkat kebisingan (*noise floor*).

B. Hasil Pengukuran Packet Delivery Ratio (PDR)

Tingkat keberhasilan pengiriman paket (PDR) diukur dengan memvariasikan parameter *Spreading Factor* (SF).

- Jarak Pendek (< 1 km): Semua konfigurasi (SF7 hingga SF12) mencatat PDR stabil di atas 98% baik pada LOS maupun NLOS.
- Jarak Menengah (3 km - NLOS):
 - SF7: PDR turun drastis menjadi 42%.
 - SF12: PDR bertahan pada angka 88%.
- Jarak Jauh (5 km - NLOS): Koneksi dengan SF7 gagal total (PDR 0%), sedangkan SF12 masih mampu mengirimkan data dengan PDR 65%.

C. Hasil Estimasi Konsumsi Energi

Berdasarkan pengukuran durasi transmisi (*Time on Air*), diperoleh data konsumsi energi per paket data (payload 20 byte) sebagai berikut:

- SF7: Durasi transmisi 40 ms, konsumsi energi rata-rata 0.05 mJ.
- SF12: Durasi transmisi 1.300 ms (1,3 detik), konsumsi energi rata-rata 1.45 mJ.

Terlihat adanya peningkatan konsumsi energi sebesar kurang lebih 29 kali lipat ketika node sensor beralih dari konfigurasi SF7 ke SF12.

V. PEMBAHASAN

Bagian ini menginterpretasikan data hasil penelitian dan menganalisis implikasinya terhadap kinerja jaringan WSN secara keseluruhan tanpa merujuk pada referensi eksternal, melainkan fokus pada temuan eksperimental.

A. Pengaruh Lingkungan Terhadap Atenuasi Sinyal

Hasil pengukuran RSSI secara jelas menunjukkan bahwa lingkungan fisik memiliki dampak dominan terhadap kualitas *link budget*. Penurunan drastis kekuatan sinyal pada kondisi NLOS disebabkan oleh adanya halangan fisik seperti gedung beton dan vegetasi di area perkotaan yang menyebabkan fenomena *multipath fading* dan *shadowing*. Meskipun sinyal mengalami atenuasi hebat hingga mencapai level yang sangat rendah (-135 dBm), sistem masih mampu mempertahankan konektivitas. Hal ini membuktikan bahwa teknik modulasi yang digunakan pada LPWAN sangat efektif dalam memulihkan data meskipun sinyal berada di bawah *noise floor* (SNR negatif), sebuah kemampuan yang tidak dimiliki oleh protokol komunikasi nirkabel standar lainnya.

B. Analisis Trade-off Antara Jangkauan dan Reliabilitas

Data PDR mengungkapkan adanya hubungan terbalik (*trade-off*) yang nyata antara jangkauan komunikasi dan kecepatan transmisi data. Kegagalan total komunikasi pada jarak jauh saat menggunakan SF7 menunjukkan bahwa parameter ini memiliki sensitivitas penerimaan yang rendah, sehingga paket data tidak dapat didekode saat sinyal melemah. Sebaliknya, penggunaan SF12 terbukti memberikan ketahanan (*robustness*) yang jauh lebih baik terhadap interferensi dan jarak, memungkinkan node untuk tetap mengirimkan data dengan reliabilitas tinggi meskipun berada di lingkungan yang menantang. Artinya, untuk aplikasi yang membutuhkan cakupan luas di area perkotaan, penggunaan SF tinggi adalah sebuah keharusan, meskipun harus mengorbankan kecepatan data.

C. Implikasi Terhadap Efisiensi Energi

Temuan yang paling signifikan dari penelitian ini adalah disparitas konsumsi energi yang sangat besar antara pengaturan SF rendah dan SF tinggi. Data menunjukkan bahwa durasi transmisi pada SF12 memakan waktu yang jauh lebih lama dibandingkan SF7, yang berdampak langsung pada besarnya energi yang dikuras dari baterai. Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa penggunaan konfigurasi statis (tetap) pada jaringan WSN sangat tidak efisien. Jika seluruh node dipaksa menggunakan SF12 demi jangkauan maksimum, node yang sebenarnya berada dekat dengan *gateway* akan membuang energi secara percuma.

D. Rekomendasi Implementasi

Berdasarkan analisis hasil di atas, implementasi WSN berbasis LPWAN tidak bisa hanya mengandalkan satu konfigurasi parameter. Diperlukan mekanisme adaptif di mana node sensor mampu mendeteksi kualitas sinyalnya sendiri. Node yang berada di lokasi buruk harus diizinkan menggunakan SF tinggi demi reliabilitas, sementara node dengan sinyal kuat harus segera menurunkan parameter ke SF rendah untuk menghemat daya. Strategi manajemen parameter dinamis ini adalah kunci untuk memaksimalkan masa hidup jaringan tanpa mengorbankan kinerja komunikasi.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengevaluasi kinerja teknologi Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) sebagai solusi komunikasi Wireless Sensor Network (WSN) melalui serangkaian pengujian lapangan yang komprehensif. Hasil analisis menunjukkan bahwa LPWAN mampu menjawab tantangan konektivitas jarak jauh di lingkungan perkotaan yang padat. Teknik modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) terbukti sangat tangguh dalam menjaga integritas data meskipun sinyal diterima di bawah tingkat kebisingan (*noise floor*) dengan SNR mencapai -18.2 dB pada kondisi Non-Line-of-Sight (NLOS).

Temuan utama penelitian ini menggarisbawahi adanya *trade-off* yang signifikan antara reliabilitas jaringan dan efisiensi energi. Penggunaan Spreading Factor tinggi (SF12) mampu menjamin Packet Delivery Ratio (PDR) tetap berada di angka 88% pada jarak 3 km di area perkotaan, namun konsekuensinya adalah lonjakan konsumsi energi hingga 29 kali lipat dibandingkan penggunaan SF7. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan konfigurasi parameter transmisi yang statis (tetap) pada seluruh node sensor bukanlah pendekatan yang efisien untuk penyebaran WSN skala besar.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa LPWAN sangat layak diimplementasikan sebagai infrastruktur backbone untuk aplikasi WSN yang membutuhkan jangkauan luas dengan throughput rendah. Namun, untuk memaksimalkan masa hidup jaringan, mekanisme adaptasi parameter dinamis mutlak diperlukan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk berfokus pada pengembangan algoritma Adaptive Data Rate (ADR) cerdas yang mampu menyeimbangkan parameter SF dan daya transmisi secara real-time berdasarkan kondisi kanal setiap node, serta mengeksplorasi integrasi mekanisme energy harvesting untuk mendukung keberlanjutan operasional node sensor.

Kontribusi Penulis: [Panji Cahya Prasetyo]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, Supervisi. Merancang konsep dan metodologi penelitian, memimpin penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

[Wildan Ramadhani]: Investigasi, Kurasi Data. Melakukan pengumpulan dan pengolahan data hasil simulasi serta penyusunan tabel hasil penelitian.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: https: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENCES

- [1] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [2] F. P. E. Putra, M. Irfan, M. Aziz, and R. N. Saputra, "Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 1, pp. 144–150, Mar. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5876.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [4] F. P. Eka Putra, Ach. M. Ubaidillah Solichin, Moh. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *INFOTEK*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, July 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [5] F. P. E. Putra, N. Ramadhani, F. Fauzan, and M. Mursidi, "Service Quality Analysis of RFID-Based Smart Door Lock in Front One Azana Style Hotel Area," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 372–381, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4292.
- [6] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [7] F. P. E. Putra, M. Surur, M. Mahendra, and G. Arifin, "Internet Network QOS Analysis at Yala Kopitiam pamekasan Using Wireshak," *Brilliance*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, June 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5940.
- [8] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. Aziz, Moh. Irfan, and R. Alim, "Improving Network Service Quality in parts of Sampang City: QoS Evaluation and User Perception of QoE," *Brilliance*, vol. 4, no. 1, pp. 408–412, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4311.
- [9] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, "Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [11] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi*, pp. 167–174, July 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.233.
- [12] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sept. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [13] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.

- [14] D. S. Igna, J. S. Smith, and Q. H. Wu, "Detection of power disturbances using Mathematical Morphology on small data windows," in *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, June 2016, pp. 211–214. doi: 10.1109/TSP.2016.7760862.
- [15] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi," *Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi*, pp. 26–32, July 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.232.
- [16] F. P. E. Putra, M. Aziz, G. Arifin, A. Rohman, A. Rizki, and A. M. Syam, "Analisis Qos & Qoe," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 5, no. 1, pp. 140–145, Jan. 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i1.973.
- [17] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, Oct. 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.
- [18] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution," *Sensors*, vol. 9, no. 9, pp. 6869–6896, Aug. 2009, doi: 10.3390/s90906869.
- [19] M. H. Widiyanto, A. Sinaga, and M. A. Ginting, "A Systematic Review of LPWAN and Short-Range Network using AI to Enhance Internet of Things," *Journal of Robotics and Control*, vol. 3, no. 4, pp. 505–518, July 2022, doi: 10.18196/jrc.v3i4.15419.
- [20] J. Kim and J. Park, "FPGA-based network intrusion detection for IEC 61850-based industrial network," *ICT Express*, vol. 4, no. 1, pp. 1–5, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.icte.2018.01.002.
- [21] K. Kuru, "Planning the Future of Smart Cities With Swarms of Fully Autonomous Unmanned Aerial Vehicles Using a Novel Framework," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6571–6595, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3049094.
- [22] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [23] M. Islam, H. Jamil, S. Pranto, R. Das, A. Amin, and A. Khan, "Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2509, Apr. 2024, doi: 10.3390/s24082509.
- [24] K. Wang *et al.*, "Research on Digital Twin System Platform Framework and Key Technologies of Unmanned Ground Equipment," *Complex System Modeling and Simulation*, vol. 4, no. 2, pp. 109–123, June 2024, doi: 10.23919/CSMS.2024.0009.
- [25] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?," in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, in MSWiM '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Nov. 2016, pp. 59–67. doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [26] N. Mishra and Y. Kim, "Hybrid Zigbee-LPWAN Communication Model for Smart Urban Infrastructure," *Journal of Wireless Sensor Networks and IoT*, vol. 3, no. 1, pp. 62–70, 2026, doi: 10.31838/WSNIOT/03.01.09.
- [27] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the Energy Performance of LoRaWAN," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2364, Oct. 2017, doi: 10.3390/s17102364.
- [28] R. Sanchez-Vital, L. Casals, B. Heer-Salva, R. Vidal, C. Gomez, and E. Garcia-Villegas, "Energy Performance of LR-FHSS: Analysis and Evaluation," *Sensors*, vol. 24, no. 17, p. 5770, Sept. 2024, doi: 10.3390/s24175770.
- [29] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Dec. 2015, pp. 55–59. doi: 10.1109/ITST.2015.7377400.

- [30] S. Darroudi and C. Gomez, "Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey," *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1467, June 2017, doi: 10.3390/s17071467.
- [31] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, Sept. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [32] Y. Zhang, Y. Li, Z. Song, R. Lin, Y. Chen, and J. Qian, "A High-Q AFM Sensor Using a Balanced Trolling Quartz Tuning Fork in the Liquid," *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1628, May 2018, doi: 10.3390/s18051628.
- [33] Q. Guo, F. Yang, and J. Wei, "Experimental Evaluation of the Packet Reception Performance of LoRa," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1071, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21041071.
- [34] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [35] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, Nov. 2018, doi: 10.3390/s18113995.
- [36] D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "On the Limits of LoRaWAN Channel Access," in *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, Nov. 2016, pp. 10–14. doi: 10.1109/EnT.2016.011.
- [37] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, and M. Gidlund, "Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4724–4734, Nov. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2852491.
- [38] H. Zeng, P. Zuo, F. Deng, and P. Zhang, "Monitoring System of Transmission Line in Mountainous Area Based on LPWAN," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4898, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13184898.
- [39] F. M. Fahrezi, M. A. Sulaiman, and T. Toni, "Analisis Pengaruh Parameter Fisik Terhadap Jarak Jangkauan dan Keandalan Data LoRa SX1276," *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, vol. 7, no. 3, pp. 138–143, Dec. 2024, doi: 10.31598/jurnalresistor.v7i3.1666.
- [40] H. I. R. Mosey, "Perancangan Sistem Node Jaringan Sensor Nirkabel (JSN) Topologi Point to Point Berbasis Mikrokontroler dan RF Transceiver," *Jurnal MIPA*, vol. 5, no. 1, pp. 49–53, 2016, doi: 10.35799/jm.5.1.2016.12286.
- [41] W. Abdillah, D. Saripurna, and S. Yakub, "Analisis Kinerja LoRa (Long Range) berdasarkan Jarak dan Spreading Factor pada Area Rural," *Jurnal Cyber Tech*, vol. 4, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.53513/jct.v4i4.3918.
- [42] D. W. Herdiyanto, F. M. Alfian, C. S. Sarwono, D. Setiabudi, A. C. Eska, and M. A. Laagu, "Prototipe Deteksi Letak Kebocoran Pipa dengan Optimalisasi Kinerja Penerimaan Paket LoRa menggunakan Pengkodean Parameter Fisik," *Journal of Applied Computer Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 40–49, Mar. 2024, doi: 10.52158/jacost.v5i1.641.
- [43] C. Aliagas, R. Pueyo Centelles, R. Meseguer, P. Millán, and C. Molina, "Dynamic Selection and Detection of Spreading Factors and Channels for End-Node Devices of LoRa Networks," *Electronics*, vol. 14, no. 17, p. 3341, Jan. 2025, doi: 10.3390/electronics14173341.
- [44] D. Zorbas, A. Sabyrbek, and L. Di Puglia Pugliese, "Revisiting the problem of optimizing spreading factor allocations in LoRaWAN: From theory to practice," *Computer Communications*, vol. 243, p. 108321, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.comcom.2025.108321.

- [45] B. Zholamanov *et al.*, “Enhanced Reinforcement Learning Algorithm Based-Transmission Parameter Selection for Optimization of Energy Consumption and Packet Delivery Ratio in LoRa Wireless Networks,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 6, p. 89, Dec. 2024, doi: 10.3390/jsan13060089.
- [46] C. Milarokostas, D. Tsolkas, N. Passas, and L. Merakos, “A Comprehensive Study on LPWANs With a Focus on the Potential of LoRa/LoRaWAN Systems,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 825–867, 2023, doi: 10.1109/COMST.2022.3229846.
- [47] Q. Zhou, K. Zheng, H. Lu, J. Xing, and R. Xu, “Design and Implementation of Open LoRa for IoT,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, July 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930243.
- [48] G. Callebaut, G. Leenders, C. Buyle, S. Crul, and L. V. der Perre, “LoRa Physical Layer Evaluation for Point-to-Point Links and Coverage Measurements in Diverse Environments,” Sept. 18, 2019, *arXiv*: arXiv:1909.08300. doi: 10.48550/arXiv.1909.08300.
- [49] R. Mena, M. Ramos, L. Urquiza, and J. D. Vega-Sánchez, “Comprehensive Evaluation of LoRaWAN Technology in Urban and Rural Environments of Quito,” *Engineering Proceedings*, vol. 77, no. 1, p. 28, 2024, doi: 10.3390/engproc2024077028.
- [50] C. Zhong and X. Nie, “A novel single-channel edge computing LoRa gateway for real-time confirmed messaging,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 8369, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-59058-8.

Publisher’s Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.