

Analisis Konsep Low Power Wide Area Network (LPWAN) dalam Mendukung Sistem Internet of Things

Danda Maritsyah Putra¹

Program Studi D4 Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik negeri padang, Jl. Kampus, Limau Manis, Kec. Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat 25164, Indonesia

Abstract. *The development of the Internet of Things (IoT) has increased the need for communication technologies capable of supporting widespread device connectivity with low power consumption. Low Power Wide Area Networks (LPWAN) have become a widely used solution due to their characteristics of wide communication range, energy efficiency, and relatively low implementation costs. This study aims to analyze the concept of LPWAN in supporting IoT implementation through a literature review approach. The research method used is a literature review, examining various scientific articles obtained from the IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, and Google Scholar databases. The analysis results show that LPWAN technologies, such as LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, and LTE-M, have different characteristics and advantages depending on application needs. LoRaWAN excels in low implementation costs and network flexibility, while NB-IoT and LTE-M offer better communication reliability via cellular networks. Although LPWAN technologies have limitations in terms of data transmission rates and payload size, they remain effective for supporting various IoT applications, such as smart agriculture, smart cities, smart metering, and environmental monitoring. Therefore, the selection of LPWAN technology must be tailored to the specific needs of the application to achieve optimal communication performance.*

Keywords: *Internet of Things, Low Power Wide Area Network, LPWAN, LoRaWAN*

Abstrak Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah meningkatkan kebutuhan akan teknologi komunikasi yang mampu mendukung konektivitas perangkat secara luas dengan konsumsi daya yang rendah. Low Power Wide Area Network (LPWAN) menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan karena memiliki karakteristik jangkauan komunikasi yang luas, efisiensi energi, serta biaya implementasi yang relatif rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsep LPWAN dalam mendukung implementasi IoT melalui pendekatan studi literatur. Metode penelitian yang digunakan adalah literature review dengan mengkaji berbagai artikel ilmiah yang diperoleh dari basis data IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, dan Google Scholar. Hasil analisis menunjukkan bahwa teknologi LPWAN, seperti LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, dan LTE-M, memiliki karakteristik serta keunggulan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan aplikasi. LoRaWAN unggul pada biaya implementasi yang rendah dan fleksibilitas jaringan, sedangkan NB-IoT dan LTE-M menawarkan keandalan komunikasi yang lebih baik melalui jaringan seluler. Meskipun memiliki keterbatasan pada laju transmisi data dan ukuran payload, LPWAN tetap menjadi teknologi yang efektif untuk mendukung berbagai aplikasi IoT, seperti smart agriculture, smart city, smart metering, dan pemantauan lingkungan. Oleh karena itu, pemilihan teknologi LPWAN perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi agar diperoleh kinerja komunikasi yang optimal.

Kata kunci : *Internet of Things, Low Power Wide Area Network, LPWAN, LoRaWAN*

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah membawa perubahan yang signifikan dalam berbagai sektor, seperti pertanian, industri, kesehatan, transportasi, dan smart city. IoT memungkinkan berbagai perangkat saling terhubung melalui jaringan internet untuk melakukan pengumpulan, pertukaran, dan pengolahan data secara otomatis. Dengan kemampuan tersebut, IoT mampu meningkatkan efisiensi operasional, mendukung pengambilan keputusan secara real-time, serta mengurangi keterlibatan manusia dalam proses monitoring dan pengendalian (Mousavi et al., 2022; Kumar et al., 2022).

Seiring dengan meningkatnya jumlah perangkat IoT yang terhubung, kebutuhan akan teknologi komunikasi yang mampu menyediakan jangkauan luas dengan konsumsi daya yang rendah menjadi semakin penting. Teknologi komunikasi konvensional seperti Wi-Fi, Bluetooth, dan ZigBee memiliki keterbatasan dalam hal jangkauan transmisi, sedangkan teknologi seluler memiliki konsumsi daya dan biaya operasional yang relatif lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan teknologi komunikasi yang mampu mengakomodasi kebutuhan perangkat IoT yang beroperasi dalam waktu lama dengan penggunaan energi yang efisien (Mousavi et al., 2022; Widiyanto et al., 2022).

Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah Low Power Wide Area Network (LPWAN). LPWAN merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang dirancang untuk mendukung transmisi data dengan konsumsi daya rendah, jangkauan komunikasi yang luas, serta biaya implementasi yang relatif rendah. Karakteristik tersebut menjadikan LPWAN sebagai salah satu solusi yang sesuai untuk berbagai aplikasi IoT yang memerlukan pengiriman data berukuran kecil secara berkala, seperti sistem monitoring lingkungan, smart farming, smart metering, dan smart city (Mousavi et al., 2022; Jouhari et al., 2022).

Saat ini terdapat beberapa teknologi yang termasuk dalam kategori LPWAN, di antaranya LoRaWAN, Narrowband *Internet of Things* (NB-IoT), Sigfox, dan LTE-M. Masing-masing teknologi memiliki karakteristik, kelebihan, dan keterbatasan yang berbeda, baik dari aspek jangkauan komunikasi, konsumsi daya, kapasitas jaringan, laju transmisi data, maupun biaya implementasi. Perbedaan karakteristik tersebut

menyebabkan pemilihan teknologi LPWAN harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi yang akan dikembangkan (Jouhari et al., 2022; Mousavi et al., 2022).

Meskipun telah banyak penelitian yang membahas teknologi LPWAN, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi satu jenis teknologi atau implementasi pada bidang tertentu. Kajian yang membandingkan berbagai teknologi LPWAN secara komprehensif berdasarkan karakteristik, keunggulan, keterbatasan, dan potensi penerapannya pada berbagai skenario *Internet of Things* masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan suatu studi literatur yang mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai konsep LPWAN sebagai dasar dalam menentukan teknologi komunikasi yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi IoT (Mousavi et al., 2022).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsep LPWAN beserta karakteristik dan implementasinya dalam mendukung sistem *Internet of Things* melalui pendekatan studi literatur. Kajian ini mengidentifikasi konsep dasar LPWAN, membandingkan berbagai teknologi LPWAN, serta menganalisis potensi penerapannya pada berbagai bidang aplikasi IoT. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pemanfaatan LPWAN sebagai teknologi komunikasi yang mendukung pengembangan sistem *Internet of Things* serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya (Mousavi et al., 2022; Widiyanto et al., 2022).

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma komunikasi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga mampu melakukan proses pengumpulan, pertukaran, dan pengolahan data secara otomatis. Setiap perangkat IoT umumnya dilengkapi dengan sensor, aktuator, mikrokontroler, dan modul komunikasi yang memungkinkan perangkat berinteraksi dengan lingkungan serta mengirimkan data ke platform pengolahan untuk dianalisis secara *real-time*. Perkembangan IoT telah mendorong penerapannya pada berbagai sektor, seperti pertanian, kesehatan, industri, transportasi, dan *smart city*, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data (Mousavi et al., 2022).

Secara umum, arsitektur IoT terdiri atas empat lapisan, yaitu *perception layer*, *network layer*, *processing layer*, dan *application layer*. *Perception layer* berfungsi mengumpulkan data melalui sensor, *network layer* bertugas mengirimkan data menggunakan teknologi komunikasi, *processing layer* melakukan penyimpanan dan analisis data, sedangkan *application layer* menyajikan informasi kepada pengguna sesuai kebutuhan aplikasi. Keberhasilan implementasi IoT sangat dipengaruhi oleh teknologi komunikasi yang digunakan, terutama dalam aspek jangkauan komunikasi, konsumsi daya, kapasitas jaringan, dan biaya implementasi (Widianto et al., 2022).

2.2 Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Low Power Wide Area Network (LPWAN) merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang dirancang untuk mendukung komunikasi perangkat IoT dengan konsumsi daya rendah, jangkauan komunikasi yang luas, dan biaya operasional yang relatif rendah. Teknologi ini dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan aplikasi IoT yang mengirimkan data berukuran kecil secara periodik dalam jangka waktu yang lama. Dengan karakteristik tersebut, perangkat LPWAN dapat beroperasi menggunakan baterai selama beberapa tahun tanpa memerlukan penggantian daya secara rutin (Mousavi et al., 2022).

LPWAN banyak digunakan pada berbagai aplikasi, seperti *smart agriculture*, *smart metering*, pemantauan lingkungan, pelacakan aset, dan *smart city*. Dibandingkan dengan teknologi komunikasi lain seperti Wi-Fi atau Bluetooth, LPWAN menawarkan jangkauan komunikasi yang lebih luas dengan konsumsi energi yang lebih rendah, meskipun memiliki kecepatan transmisi data yang relatif kecil. Oleh karena itu, LPWAN menjadi salah satu teknologi komunikasi yang paling sesuai untuk implementasi IoT berskala besar (Alsharif et al., 2022).

2.3 Karakteristik LPWAN

Beberapa teknologi yang termasuk dalam kategori LPWAN adalah LoRaWAN, Sigfox, Narrowband *Internet of Things* (NB-IoT), dan LTE-M. LoRaWAN merupakan teknologi yang menggunakan pita frekuensi tidak berlisensi (*unlicensed spectrum*) sehingga banyak diterapkan pada sistem pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, dan *smart city*. Sigfox juga menggunakan frekuensi tidak berlisensi dengan konsumsi daya

yang sangat rendah, namun memiliki kapasitas pengiriman data yang lebih terbatas (Alsharif et al., 2022).

Sementara itu, NB-IoT dan LTE-M merupakan teknologi LPWAN yang dikembangkan berdasarkan standar 3GPP dan memanfaatkan jaringan seluler berlisensi. Kedua teknologi tersebut menawarkan kualitas layanan (*Quality of Service*) yang lebih baik dibandingkan LPWAN berbasis frekuensi tidak berlisensi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan tingkat keandalan komunikasi yang tinggi. Pemilihan teknologi LPWAN perlu mempertimbangkan kebutuhan aplikasi, seperti jangkauan komunikasi, konsumsi daya, kapasitas jaringan, biaya implementasi, serta laju transmisi data (Mousavi et al., 2022; Widiyanto et al., 2022).

2.4 Jenis-Jenis Teknologi LPWAN

Beberapa teknologi yang termasuk dalam kategori LPWAN adalah LoRaWAN, Sigfox, Narrowband *Internet of Things* (NB-IoT), dan LTE-M. LoRaWAN merupakan teknologi yang menggunakan pita frekuensi tidak berlisensi (*unlicensed spectrum*) sehingga banyak diterapkan pada sistem pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, dan *smart city*. Sigfox juga menggunakan frekuensi tidak berlisensi dengan konsumsi daya yang sangat rendah, namun memiliki kapasitas pengiriman data yang lebih terbatas (Alsharif et al., 2022).

Sementara itu, NB-IoT dan LTE-M merupakan teknologi LPWAN yang dikembangkan berdasarkan standar 3GPP dan memanfaatkan jaringan seluler berlisensi. Kedua teknologi tersebut menawarkan kualitas layanan (*Quality of Service*) yang lebih baik dibandingkan LPWAN berbasis frekuensi tidak berlisensi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan tingkat keandalan komunikasi yang tinggi. Pemilihan teknologi LPWAN perlu mempertimbangkan kebutuhan aplikasi, seperti jangkauan komunikasi, konsumsi daya, kapasitas jaringan, biaya implementasi, serta laju transmisi data (Mousavi et al., 2022; Widiyanto et al., 2022).

3. METODE PENELITIAN

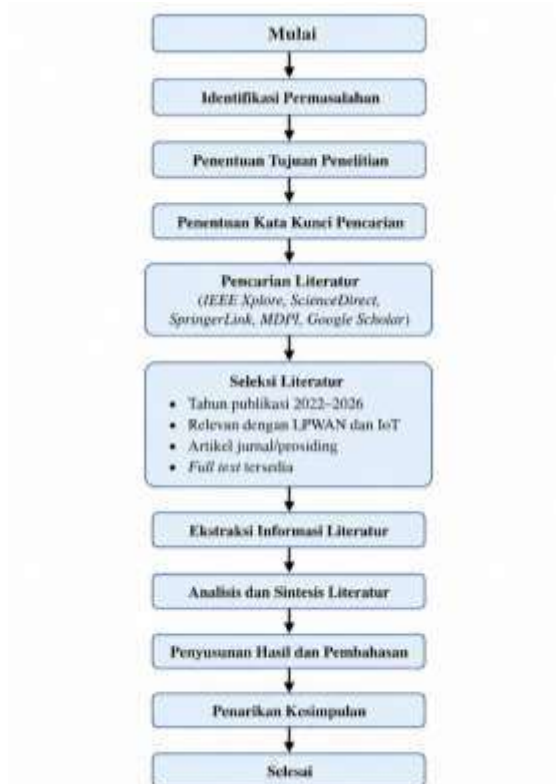
Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) untuk mengkaji konsep Low Power Wide Area Network (LPWAN) dalam mendukung implementasi *Internet of Things* (IoT). Metode studi literatur dipilih karena penelitian

ini bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menyintesis berbagai hasil penelitian yang telah dipublikasikan sehingga diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik, keunggulan, keterbatasan, serta implementasi teknologi LPWAN pada berbagai bidang aplikasi IoT (Snyder, 2019).

Proses pengumpulan literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah, antara lain IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian meliputi *Low Power Wide Area Network*, *LPWAN*, *Internet of Things*, *LoRaWAN*, *NB-IoT*, *Sigfox*, *LTE-M*, serta kombinasi dari kata kunci tersebut. Literatur yang dipilih merupakan artikel ilmiah yang diterbitkan pada rentang tahun 2022–2026 agar informasi yang diperoleh sesuai dengan perkembangan teknologi terkini.

Literatur yang diperoleh selanjutnya diseleksi berdasarkan beberapa kriteria, yaitu kesesuaian dengan topik penelitian, keterkaitan dengan implementasi LPWAN pada sistem IoT, serta publikasi yang berasal dari jurnal atau prosiding internasional bereputasi. Artikel yang tidak relevan, tidak melalui proses *peer review*, atau memiliki pembahasan yang tidak sesuai dengan tujuan penelitian tidak dimasukkan ke dalam proses analisis.

Tahap berikutnya adalah analisis data yang dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan hasil penelitian dari berbagai sumber. Analisis difokuskan pada karakteristik masing-masing teknologi LPWAN, meliputi jangkauan komunikasi, konsumsi daya, laju transmisi data, kapasitas jaringan, biaya implementasi, serta bidang penerapannya dalam sistem IoT. Selanjutnya, hasil analisis disintesis untuk mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, serta potensi pengembangan teknologi LPWAN dalam mendukung implementasi *Internet of Things*.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Teknologi LPWAN

Berdasarkan hasil telaah terhadap berbagai penelitian, teknologi Low Power Wide Area Network (LPWAN) memiliki karakteristik yang menjadikannya sesuai untuk mendukung implementasi *Internet of Things* (IoT). Teknologi ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan komunikasi perangkat IoT yang memerlukan konsumsi daya rendah, jangkauan komunikasi yang luas, serta biaya operasional yang relatif rendah. Menurut Mousavi et al. (2022), LPWAN mampu menghubungkan ribuan perangkat dalam satu jaringan (*massive connectivity*) dengan konsumsi energi yang sangat efisien sehingga perangkat dapat beroperasi menggunakan baterai selama beberapa tahun.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa LPWAN memiliki keunggulan dibandingkan teknologi komunikasi jarak pendek seperti Wi-Fi, Bluetooth, maupun ZigBee. Ketiga teknologi tersebut menawarkan kecepatan transmisi data yang lebih tinggi, namun memiliki keterbatasan pada jangkauan komunikasi dan efisiensi energi. Sebaliknya, LPWAN dirancang untuk aplikasi yang hanya mengirimkan data berukuran

kecil secara periodik sehingga lebih sesuai digunakan pada sistem monitoring jarak jauh (Jouhari et al., 2022).

Meskipun demikian, LPWAN memiliki keterbatasan berupa laju transmisi data yang relatif rendah serta ukuran *payload* yang terbatas. Oleh karena itu, teknologi ini kurang sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan komunikasi *real-time* berkecepatan tinggi, seperti transmisi video maupun multimedia. Berdasarkan hasil telaah literatur, karakteristik tersebut menunjukkan bahwa LPWAN lebih tepat diterapkan pada aplikasi IoT yang berorientasi pada efisiensi energi dibandingkan kebutuhan bandwidth yang besar (Alsharif et al., 2022).

4.2 Analisis Perbandingan Teknologi LPWAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap teknologi LPWAN memiliki karakteristik yang berbeda sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi.

Tabel 4.1. Perbandingan Teknologi LPWAN

Parameter	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Spektrum	Tidak berlisensi	Tidak berlisensi	Berlisensi	Berlisensi
Jangkauan	Sangat luas	Luas	Luas	Luas
Konsumsi daya	Sangat rendah	Sangat rendah	Rendah	Rendah
Data rate	Rendah	Sangat rendah	Sedang	Tinggi
Mobilitas	Terbatas	Terbatas	Baik	Sangat baik
Biaya Infrastruktur	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi

Berdasarkan Tabel 1, LoRaWAN dan Sigfox lebih unggul dalam aspek efisiensi energi dan biaya implementasi karena menggunakan spektrum frekuensi tidak berlisensi. Sebaliknya, NB-IoT dan LTE-M menawarkan kualitas layanan (*Quality of Service*) yang lebih baik karena memanfaatkan jaringan seluler berlisensi. Namun, penggunaan jaringan operator menyebabkan biaya implementasi menjadi lebih tinggi dibandingkan teknologi berbasis *unlicensed spectrum* (Mousavi et al., 2022).

Selain itu, LTE-M memiliki keunggulan dalam mendukung mobilitas perangkat dan laju transmisi data yang lebih tinggi dibandingkan teknologi LPWAN lainnya. Di sisi

lain, LoRaWAN lebih banyak digunakan pada aplikasi *smart agriculture* dan pemantauan lingkungan karena dapat dibangun secara mandiri tanpa bergantung pada operator seluler (Jouhari et al., 2022).

4.3 Analisis Implementasi LPWAN pada Berbagai Bidang IoT

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa LPWAN telah diimplementasikan pada berbagai bidang yang membutuhkan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi energi rendah. Pada sektor *smart agriculture*, LPWAN dimanfaatkan untuk mengirimkan data sensor kelembaban tanah, suhu, kelembaban udara, dan kondisi lingkungan secara berkala. Penggunaan LPWAN memungkinkan sistem monitoring lahan pertanian tetap beroperasi dalam waktu lama tanpa memerlukan penggantian baterai secara rutin sehingga mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan (Alsharif et al., 2022).

Dalam bidang *smart city*, LPWAN diterapkan pada sistem pemantauan kualitas udara, pengelolaan parkir pintar, lampu jalan pintar, serta pengelolaan sampah berbasis sensor. Implementasi tersebut memungkinkan pemerintah memperoleh data secara *real-time* dengan biaya komunikasi yang relatif rendah dibandingkan penggunaan teknologi seluler konvensional (Mousavi et al., 2022).

Selain itu, LPWAN juga banyak diterapkan pada *smart metering*, seperti pemantauan konsumsi listrik, air, dan gas secara otomatis. Teknologi ini memungkinkan proses pembacaan meter dilakukan dari jarak jauh sehingga mengurangi kebutuhan inspeksi manual serta meningkatkan efisiensi operasional penyedia layanan utilitas (Widianto et al., 2022).

4.4 Analisis Potensi dan Tantangan LPWAN

Berdasarkan hasil telaah literatur, LPWAN memiliki potensi yang besar dalam mendukung perkembangan ekosistem *Internet of Things*, terutama pada implementasi massive IoT. Karakteristik berupa konsumsi daya rendah, jangkauan komunikasi yang luas, serta kemampuan menghubungkan ribuan perangkat menjadikan LPWAN sebagai salah satu teknologi komunikasi yang relevan untuk pengembangan sistem monitoring dan otomatisasi pada masa mendatang (Mousavi et al., 2022).

Namun demikian, beberapa tantangan masih perlu diperhatikan, antara lain

keterbatasan kapasitas transmisi data, potensi interferensi pada teknologi yang menggunakan spektrum tidak berlisensi, serta aspek keamanan komunikasi dan interoperabilitas antarperangkat. Selain itu, pemilihan teknologi LPWAN harus mempertimbangkan kebutuhan aplikasi agar diperoleh keseimbangan antara biaya implementasi, konsumsi daya, kualitas layanan, dan cakupan jaringan (Alsharif et al., 2022).

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terdapat satu teknologi LPWAN yang paling unggul untuk seluruh jenis aplikasi IoT. LoRaWAN lebih sesuai untuk aplikasi dengan biaya rendah dan jaringan mandiri, sedangkan NB-IoT dan LTE-M lebih tepat diterapkan pada aplikasi yang membutuhkan keandalan komunikasi tinggi melalui infrastruktur seluler. Oleh karena itu, pemilihan teknologi LPWAN harus didasarkan pada karakteristik aplikasi, kebutuhan komunikasi, serta kondisi lingkungan implementasinya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi literatur, Low Power Wide Area Network (LPWAN) merupakan teknologi komunikasi yang mampu mendukung implementasi *Internet of Things* (IoT) melalui karakteristik konsumsi daya yang rendah, jangkauan komunikasi yang luas, serta kemampuan menghubungkan banyak perangkat. Karakteristik tersebut menjadikan LPWAN sesuai untuk berbagai aplikasi IoT, seperti *smart agriculture*, *smart city*, *smart metering*, dan pemantauan lingkungan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap teknologi LPWAN memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing. LoRaWAN lebih unggul dalam efisiensi biaya dan fleksibilitas jaringan, sedangkan NB-IoT dan LTE-M menawarkan keandalan komunikasi yang lebih baik melalui jaringan seluler. Oleh karena itu, pemilihan teknologi LPWAN perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, cakupan jaringan, konsumsi daya, dan biaya implementasi.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Alsharif, M. H., Kelechi, A. H., Yahya, K., & Chaudhry, S. A. (2022). *A survey on LoRaWAN technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions*. *Electronics*, 11(1), 164. <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>
- [2] Azzouz, M., Benbraika, M., Afifi, H., & Toumi, K. (2024). *A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things*. *ICT Express*, 10(3), 519–552.
- [3] Jouhari, M., Saeed, N., Alouini, M.-S., & Amhoud, E. M. (2022). *A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges*. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11082>
- [4] Kumar, A., Gupta, B. B., & Tripathi, G. (2022). *A systematic review of Internet of Things (IoT): Architectures, enabling technologies, security and privacy*. *Journal of Network and Computer Applications*. (Pastikan data volume, nomor edisi, dan halaman sesuai dengan artikel yang benar-benar digunakan.)
- [5] Mousavi, S. M., Khademzadeh, A., & Rahmani, A. M. (2022). *The role of low-power wide-area network technologies in Internet of Things: A systematic and comprehensive review*. *International Journal of Communication Systems*, 35(3), e5036. <https://doi.org/10.1002/dac.5036>
- [6] Rivas, J., et al. (2024). *Integration of wireless power transfer and low power wide area networks in IoT applications: A review*. *Sensors International*, 5, 100284.
- [7] Widianto, M. H., Sinaga, A., & Ginting, M. A. (2022). *A systematic review of LPWAN and short-range network using AI to enhance Internet of Things*. *Journal of Robotics and Control*, 3(4), 505–518.