

Perbandingan Teknologi Komunikasi Nirkabel LoRa, ZigBee, Wi-Fi, dan Bluetooth untuk Sistem IoT Jarak Jauh

Ranu Abiyyu Ramadhani*, Lela Nurpulaela, Sulthon Muakhor Arifn

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361
E-mail: 2210631160018@student.unsika.ac.id

Naskah Masuk: 22 April 2026; Diterima: 06 Agustus 2026; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak - Kebutuhan komunikasi nirkabel pada sistem Internet of Things (IoT) jarak jauh terus meningkat pada aplikasi pemantauan lingkungan, pertanian cerdas, industri, dan smart city. Penelitian ini bertujuan membandingkan teknologi LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi, ZigBee, dan Bluetooth Low Energy (BLE) berdasarkan parameter jangkauan komunikasi, data rate, konsumsi daya, dan ketahanan gangguan. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan pendekatan PRISMA melalui tahapan identifikasi, seleksi, evaluasi, dan penentuan artikel terpilih. Dari 89 artikel yang teridentifikasi, diperoleh 19 artikel yang memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis secara deskriptif-komparatif menggunakan tabel spesifikasi dan grafik performa teknologi komunikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa LoRa/LoRaWAN memiliki jangkauan komunikasi paling luas, yaitu sekitar 2–15 km dengan data rate 0.3–50 kbps dan konsumsi daya rendah. Wi-Fi menawarkan throughput tertinggi hingga 147 Mbps dengan jangkauan sekitar 50–200 meter, namun membutuhkan daya lebih besar dan lebih rentan terhadap interferensi. ZigBee mendukung topologi mesh dengan jangkauan 10–100 meter dan data rate maksimum 250 kbps sehingga sesuai untuk jaringan sensor lokal. Sementara itu, Bluetooth BLE 5 mendukung komunikasi hingga ratusan meter dengan data rate 125 kbps–2 Mbps serta efisiensi daya yang baik. Hasil analisis menunjukkan adanya trade-off antara jangkauan komunikasi, data rate, dan ketahanan gangguan sehingga pemilihan teknologi perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi IoT.

Kata kunci: LoRaWAN; Wi-Fi HaLow; interferensi kanal 2,4 GHz ; jangkauan komunikasi IoT

ABSTRACT

Abstract - The need for wireless communication in long-range Internet of Things (IoT) systems continues to increase in environmental monitoring, smart agriculture, industry, and smart city applications. This study aims to compare LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi, ZigBee, and Bluetooth Low Energy (BLE) technologies based on parameters of communication range, data rate, power consumption, and interference resilience. The method used is a Systematic Literature Review (SLR) with the PRISMA approach through the stages of identification, selection, evaluation, and determination of selected articles. Of the 89 identified articles, 19 articles met the inclusion criteria for descriptive-comparative analysis using specification tables and performance graphs of communication technologies. The results show that LoRa/LoRaWAN has the widest communication range, which is around 2–15 km with a data rate of 0.3–50 kbps and low power consumption. Wi-Fi offers the highest throughput of up to 147 Mbps with a range of around 50–200 meters, but requires more power and is more susceptible to interference. ZigBee supports mesh topologies with a range of 10–100 meters and a maximum data rate of 250 kbps, making it suitable for local sensor networks. Meanwhile, Bluetooth BLE 5 supports communication up to hundreds of meters with data rates of 125 kbps–2 Mbps and good power efficiency. The analysis shows a trade-off between communication range, data rate, and interference resilience, so technology selection needs to be tailored to the needs of IoT applications.

Keywords: LoRaWAN; Wi-Fi HaLow; 2.4-GHz coexistence; long-range IoT connectivity

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) mendorong kebutuhan akan teknologi komunikasi nirkabel yang mampu bekerja secara stabil pada berbagai kondisi lingkungan. Beragam aplikasi seperti pemantauan lingkungan, pertanian cerdas, industri, dan kota cerdas memerlukan sistem komunikasi yang memiliki jangkauan memadai, kecepatan data yang sesuai, serta ketahanan terhadap gangguan sinyal agar proses pertukaran data dapat berlangsung tanpa hambatan [1]. LoRa, ZigBee, Wi-Fi, dan Bluetooth termasuk

teknologi yang sering digunakan pada sistem IoT dan memiliki karakteristik teknis yang berbeda, terutama dalam hal jangkauan, kecepatan data, dan ketahanan terhadap interferensi frekuensi [2]. Oleh karena itu, pemilihan teknologi yang tepat menjadi hal penting untuk memastikan sistem IoT jarak jauh dapat berfungsi dengan baik.

Beberapa penelitian menunjukkan adanya perbedaan performa yang cukup jelas di antara keempat teknologi tersebut. LoRa dikenal memiliki jangkauan yang lebih luas berkat penggunaan modulasi chirp spread spectrum, sehingga dapat mencapai jarak beberapa kilometer dengan konsumsi daya rendah [3]. ZigBee menawarkan kinerja yang stabil pada jaringan sensor berskala kecil hingga menengah. Wi-Fi menyediakan kecepatan data tinggi, tetapi performanya dapat menurun pada lingkungan dengan kepadatan perangkat yang tinggi. Sementara itu, Bluetooth Low Energy (BLE) lebih sesuai untuk jarak dekat dengan kebutuhan daya yang sangat rendah [4]. Meski demikian, sebagian studi hanya membahas parameter tertentu, seperti throughput atau konsumsi daya, tanpa menilai aspek ketahanan gangguan maupun kemampuan komunikasi jarak jauh secara keseluruhan.

Kajian lain menyoroti bagaimana masing-masing teknologi merespons interferensi pada frekuensi 2.4 GHz dan sub-GHz. Tuan et al. melaporkan bahwa ZigBee dan Bluetooth mengalami penurunan stabilitas pada lingkungan dengan interferensi tinggi, sedangkan LoRa menunjukkan performa yang lebih tahan terhadap gangguan karena beroperasi pada frekuensi sub-GHz [5]. Wi-Fi meskipun memiliki kecepatan tinggi, masih cukup sensitif terhadap kepadatan kanal, terutama di wilayah perkotaan [6]. Meskipun sejumlah studi telah membahas karakteristik dan performa tiap teknologi, masih belum banyak penelitian yang melakukan evaluasi komprehensif dengan membandingkan ketiganya sekaligus berdasarkan jangkauan, kecepatan data, dan ketahanan gangguan.

Berdasarkan telaah literatur, penelitian sebelumnya mengenai teknologi komunikasi nirkabel pada Internet of Things (IoT) masih dilakukan secara parsial. Sebagian penelitian hanya membandingkan dua atau tiga teknologi komunikasi, seperti LoRa dengan ZigBee atau Wi-Fi dengan Bluetooth, tanpa melibatkan keempat teknologi dalam satu kerangka evaluasi yang sama [3], [6]. Selain itu, parameter pengujian yang digunakan juga belum komprehensif karena umumnya hanya berfokus pada aspek tertentu, seperti jangkauan transmisi atau kecepatan data, sementara ketahanan terhadap gangguan sinyal belum dianalisis secara bersamaan. Padahal, ketiga parameter tersebut saling berkaitan dalam menentukan efektivitas komunikasi pada aplikasi IoT jarak jauh. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian yang melakukan analisis komparatif secara terstruktur terhadap LoRa, ZigBee, Wi-Fi, dan Bluetooth berdasarkan jangkauan, kecepatan data, serta ketahanan gangguan dalam satu studi terpadu. Penelitian ini bertujuan memberikan rekomendasi teknis bagi pengembang IoT dalam menentukan teknologi komunikasi nirkabel yang paling sesuai untuk kebutuhan aplikasi jarak jauh.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Teknologi Komunikasi IoT

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat elektronik dengan jaringan internet sehingga dapat berinteraksi dengan sistem tertanam (*embedded system*) [7]. IoT memungkinkan perangkat untuk melakukan fungsi seperti penginderaan, pengendalian, aktuasi, dan pemantauan. Selain itu, perangkat IoT mampu berkomunikasi dan bertukar data dengan perangkat atau aplikasi lain, baik dengan memproses data secara lokal maupun mengirimkannya ke server berbasis cloud. Proses ini bergantung pada keterbatasan sistem seperti kapasitas memori, kemampuan pemrosesan, serta latensi komunikasi. Dalam implementasinya, perangkat IoT dapat menggunakan berbagai antarmuka komunikasi, baik secara kabel maupun nirkabel [8].

2.2. LoRa

LoRa (*Long Range*) merupakan teknologi komunikasi nirkabel dengan konsumsi daya rendah yang dirancang untuk jangkauan luas. Teknologi ini mampu mencakup area yang cukup besar, bahkan pada lingkungan perkotaan yang kompleks [9]. Berbagai keunggulan tersebut menjadikan LoRa cocok digunakan pada aplikasi berskala besar dengan biaya yang relatif rendah. LoRa merupakan teknologi konektivitas yang dikembangkan khusus untuk sistem IoT. Teknologi ini dipatenkan dan diproduksi oleh Semtech Corporation, namun pengembangan serta implementasinya bersifat terbuka dengan standar protokol yang ditetapkan oleh LoRa Alliance [10]. LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang memungkinkan komunikasi tetap berjalan pada kondisi sinyal lemah dengan konsumsi daya rendah [11]. Salah satu chipset yang banyak digunakan adalah Semtech SX1278 yang bekerja pada pita frekuensi 915 MHz dan mampu mencapai jangkauan hingga 15 km pada kondisi line-of-sight (LOS). Karakteristik tersebut menjadikan LoRa cocok diterapkan pada aplikasi IoT berskala luas seperti pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, dan smart city dengan biaya implementasi yang relatif rendah [12]. Namun, peningkatan spreading factor untuk memperoleh

sensitivitas dan jangkauan yang lebih tinggi menyebabkan penurunan data rate menjadi sekitar 0.3–5 kbps, sehingga LoRa lebih sesuai untuk transmisi data sensor berukuran kecil dan periodik [13].



Gambar 1. SX1278

2.3. Wi-Fi

Wi-Fi merupakan teknologi komunikasi nirkabel berbasis standar IEEE 802.11 yang menggunakan gelombang radio untuk menyediakan koneksi jaringan dan transmisi data berkecepatan tinggi. Teknologi ini banyak digunakan pada perangkat Internet of Things (IoT) karena mendukung interoperabilitas antar perangkat yang menggunakan standar komunikasi yang sama [14]. Salah satu modul Wi-Fi yang umum digunakan pada sistem IoT adalah ESP32 yang mendukung standar IEEE 802.11 b/g/n pada frekuensi 2.4 GHz. Modul ini mampu menyediakan throughput tinggi hingga ratusan Mbps sehingga sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan transmisi data besar dan komunikasi real-time. Namun, konsumsi daya Wi-Fi relatif lebih tinggi dibandingkan teknologi LPWAN seperti LoRa maupun jaringan sensor seperti ZigBee. Untuk mendukung implementasi IoT jarak jauh, dikembangkan teknologi Wi-Fi HaLow berbasis standar IEEE 802.11ah yang bekerja pada pita sub-GHz sehingga mampu meningkatkan cakupan komunikasi hingga lebih dari 1 km dengan efisiensi daya yang lebih baik dibandingkan Wi-Fi konvensional [15].



Gambar 2. Wi-Fi

2.4. ZigBee

Kbps ZigBee merupakan standar komunikasi nirkabel berbasis IEEE 802.15.4 yang dirancang untuk transmisi data berkecepatan rendah pada jaringan jarak pendek. Teknologi ini beroperasi pada beberapa pita frekuensi, yaitu 868 MHz, 915 MHz, dan 2,4 GHz dengan kecepatan data maksimum mencapai 250 kbps[16]. Dalam implementasi Internet of Things (IoT), ZigBee banyak menggunakan modul komunikasi seperti XBee Series 2 dan CC2530 yang mendukung komunikasi berdaya rendah dengan konsumsi energi yang relatif efisien. Selain itu, ZigBee mendukung topologi mesh sehingga cakupan jaringan dapat diperluas melalui node perantara untuk meningkatkan stabilitas komunikasi pada jaringan sensor. Karakteristik tersebut menjadikan ZigBee sesuai digunakan pada aplikasi smart home, monitoring lingkungan, dan jaringan sensor lokal, meskipun jangkauan komunikasinya masih lebih terbatas dibandingkan teknologi LPWAN seperti LoRa [17].



Gambar 2. XBee Series 2

2.5. Bluetooth

Bluetooth merupakan standar komunikasi nirkabel untuk jaringan area pribadi atau *Personal Area Network* (PAN) yang memungkinkan pertukaran data antar perangkat dalam jarak dekat. Teknologi ini dikembangkan oleh Bluetooth Special Interest Group dan beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz

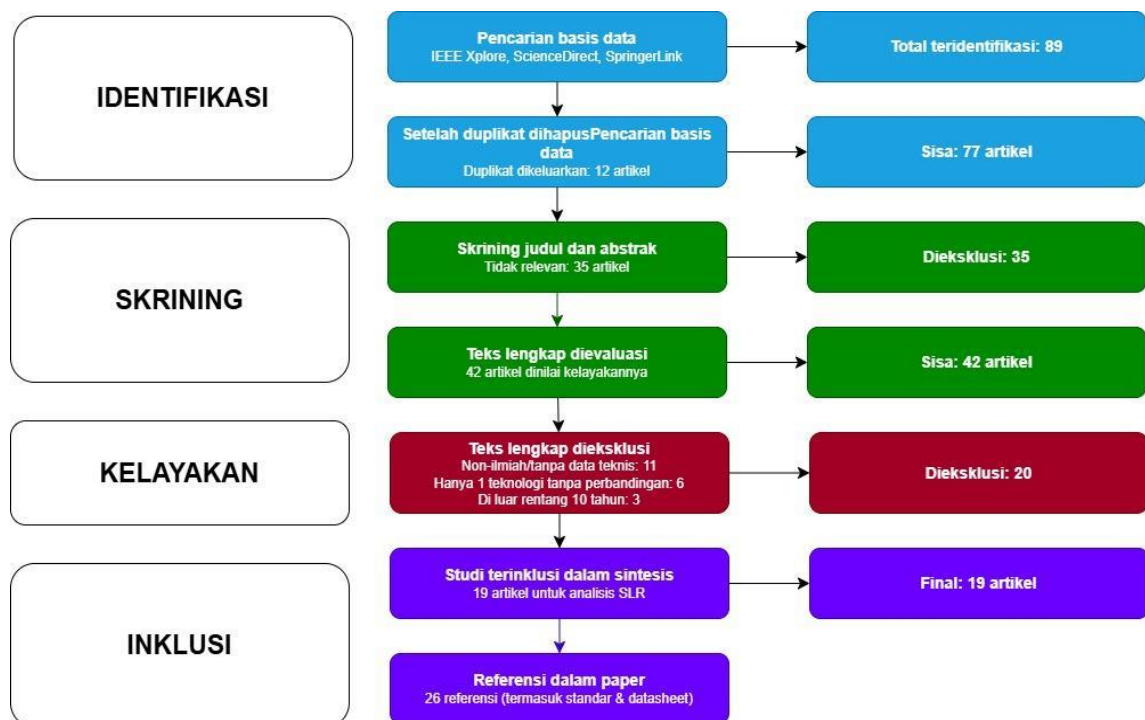
dengan teknik *frequency hopping* untuk mengurangi interferensi serta meningkatkan stabilitas komunikasi [18]. Dalam implementasi Internet of Things (IoT), Bluetooth Low Energy (BLE) banyak digunakan karena memiliki konsumsi daya yang rendah dan mendukung komunikasi antar perangkat sensor maupun perangkat bergerak. Salah satu implementasi BLE 5 menggunakan chipset CYW20829 yang mendukung fitur *LE Coded PHY* untuk komunikasi *long range* hingga ratusan meter melalui teknik *Forward Error Correction* (FEC). Namun, peningkatan jangkauan tersebut menyebabkan penurunan *data rate* menjadi sekitar 125 kbps pada mode S=8, sehingga BLE lebih sesuai untuk aplikasi IoT dengan kebutuhan data kecil dan efisiensi daya tinggi seperti wearable device dan monitoring sensor [19].



Gambar 3. BLE

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis dan membandingkan teknologi komunikasi nirkabel LoRa, ZigBee, Wi-Fi, dan Bluetooth pada penerapan *Internet of Things* (IoT) jarak jauh. Metode SLR dipilih karena menyediakan pendekatan yang terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi dalam proses pengumpulan, penilaian, dan penyusunan temuan dari berbagai penelitian sebelumnya [7]. Pelaksanaan SLR mengacu pada tahapan umum yang dijelaskan oleh Kitchenham, meliputi perumusan pertanyaan penelitian, penyusunan strategi pencarian literatur, penentuan kriteria inklusi dan eksklusi, ekstraksi data, serta analisis dan sintesis hasil [8].



Gambar 4. Metodologi

Proses seleksi literatur dilakukan menggunakan pendekatan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan proses identifikasi dan penyaringan artikel dilakukan secara sistematis. Berdasarkan proses pencarian pada database IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar menggunakan kata kunci seperti "*LoRa performance*", "*ZigBee IoT*", "*Wi-Fi IoT communication*", "*Bluetooth IoT long-range*", dan "*wireless communication comparison*", diperoleh sebanyak 89 artikel awal. Setelah dilakukan penghapusan duplikasi serta proses seleksi

berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaian topik, diperoleh 19 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan digunakan dalam proses analisis penelitian. Diagram alur proses seleksi artikel ditunjukkan pada Gambar X [9].

Kriteria inklusi dan eksklusi penelitian digunakan untuk memastikan artikel yang dipilih memiliki relevansi dan kualitas yang sesuai dengan tujuan penelitian. Artikel yang dipilih merupakan publikasi ilmiah terindeks pada rentang tahun 2015–2025 dan membahas performa teknologi LoRa, Wi-Fi, ZigBee, atau Bluetooth pada sistem IoT dengan parameter teknis yang dapat dibandingkan, seperti jangkauan komunikasi, *data rate*, konsumsi daya, dan ketahanan gangguan [10]. Sementara itu, artikel non-ilmiah, artikel tanpa hasil pengujian teknis, serta artikel yang tidak tersedia secara *full-text* dikeluarkan dari proses seleksi. Rincian kriteria inklusi dan eksklusi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

No	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
1	Artikel diterbitkan di jurnal atau prosiding terindeks seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, dan SpringerLink	Artikel berasal dari sumber non-ilmiah seperti blog atau laporan tidak terindeks
2	Artikel diterbitkan pada rentang tahun 2015–2025	Artikel diterbitkan sebelum tahun 2015
3	Membahas performa LoRa, ZigBee, Wi-Fi, atau Bluetooth dalam konteks IoT	Tidak membahas salah satu dari keempat teknologi tersebut
4	Memuat data teknis terukur seperti jangkauan, data rate, konsumsi daya, atau ketahanan gangguan	Tidak menyajikan hasil pengujian atau data teknis yang dapat dibandingkan
5	Ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris	Ditulis dalam bahasa lain tanpa terjemahan yang tersedia
6	Tersedia full-text dan dapat diakses	Hanya tersedia abstrak atau memiliki akses terbatas

Tahap berikutnya adalah ekstraksi data dari artikel yang telah lolos seleksi. Informasi yang dikumpulkan meliputi spesifikasi teknologi dan modul komunikasi, frekuensi kerja, jangkauan komunikasi, *data rate*, konsumsi daya, topologi jaringan, serta performa terhadap interferensi. Seluruh data kemudian disusun dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah proses analisis komparatif antar teknologi [10]. Daftar artikel yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar Artikel Yang Digunakan

No	Penulis	Tahun	Judul	Teknologi	Parameter Utama	Sumber
1	Semtech	2015	LoRa Modulation Basics AN1200.22	LoRa	Modulasi CSS, sensitivitas	IEEE / Semtech
2	Augustin et al.	2016	A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for IoT	LoRa	Jangkauan, konsumsi daya	Sensors (MDPI)
3	Adelantado et al.	2017	Understanding the Limits of LoRaWAN	LoRaWAN	Kapasitas, collision, data rate	IEEE Comm. Mag.
4	Tian, Hu & Han	2019	Research on Wi-Fi HaLow for the Internet of Things	Wi-Fi	Jangkauan sub-GHz, efisiensi daya	Chinese J. IoT
5	Rachman et al.	2016	Implementasi Jaringan Sensor Nirkabel Menggunakan ZigBee	ZigBee	Topologi, jangkauan	J. Nas. Tek. Elektro
6	Fitriawan et al.	2020	Pengukuran RSSI ZigBee pada Berbagai Topologi	ZigBee	RSSI, topologi mesh	J. Rekayasa Elektro
7	Misra et al.	2015	ZigBee Specification	ZigBee	Spesifikasi standar, data rate	O'Reilly / Wiley
8	Astarina et al.	2024	Implementasi Routing Static Multi Hop pada LoRa	LoRa	Multi-hop, jangkauan	J. Inform. Tek. Elektro
9	Pratama et al.	2021	Sistem Monitoring Listrik Berbasis WSN Menggunakan LoRa SX1278	LoRa	Jangkauan, konsumsi daya	Maj. Ilm. Teknol. Elektro

No	Penulis	Tahun	Judul	Teknologi	Parameter Utama	Sumber
10	Rahmansyah et al.	2025	Sistem Monitoring Pertanian Cerdas Berbasis LoRa	LoRa	Jangkauan real-time, data rate	PoliGrid
11	Fahriani	2024	Dari Kabel ke Nirkabel: Evolusi dan Inovasi Jaringan Modern	Wi-Fi	Evolusi standar, interoperabilitas	Buku / Monograf
12	Irawan et al.	2025	Optimalisasi Infrastruktur Jaringan Wi-Fi 7	Wi-Fi	Throughput, QoS	J. Nas. Komputasi
13	Sinaga et al.	2023	Optimalisasi Jaringan Wi-Fi sebagai Fasilitas Akademik	Wi-Fi	Throughput, interferensi	J. Komun. Media Pendidik.
14	Irwan et al.	2023	Bluetooth Helm dengan Modul HC-05	Bluetooth	Jangkauan, konsumsi daya	J. Pengabdi. Siliwangi
15	Anggy et al.	2022	Telemedicine Monitoring Detak Jantung Menggunakan BLE	Bluetooth BLE	Data rate, konsumsi daya	Jurnal Teknik
16	The LE S.	2024	Achieving Long Range Transmission Using CYW20829 BLE SoC	Bluetooth BLE 5	Jangkauan LR, Coded PHY, FEC	Infineon / App Note
17	Mamdiwar et al.	2021	Recent Advances on IoT-Assisted Wearable Sensor Systems	BLE / IoT	Arsitektur IoT, komunikasi sensor	Biosensors (MDPI)
18	Lame	2019	Systematic Literature Reviews: An Introduction	SLR (Metode)	Metodologi SLR, PRISMA	Proc. Des. Soc.
19	Kitchenham & Brereton	2013	A Systematic Review of SR Process Research in SE	SLR (Metode)	Proses SLR, panduan	Inf. Softw. Technol.

Analisis dilakukan secara deskriptif dan komparatif dengan membandingkan performa masing-masing teknologi berdasarkan parameter yang sama. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, serta kesesuaian penggunaan LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi, ZigBee, dan Bluetooth pada implementasi IoT jarak jauh. Selain itu, penelitian ini juga memberikan rekomendasi teknis mengenai pemilihan teknologi komunikasi berdasarkan kebutuhan aplikasi, kompromi antara jangkauan komunikasi, *data rate*, konsumsi daya, dan ketahanan gangguan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perbandingan Spesifikasi Teknologi Komunikasi

Tabel 3. Ringkasan kinerja LoRa

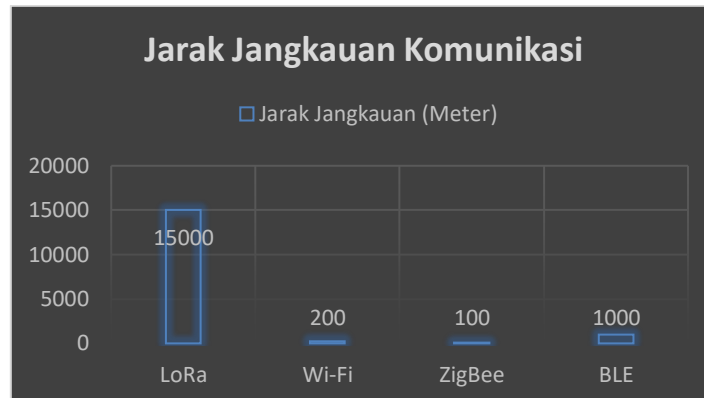
Teknologi	Modul/Chipset Referensi	Frekuensi Kerja	Jangkauan	Data Rate	Konsumsi Daya	Topologi	Ketahanan Gangguan	Referensi
LoRa	Semtech SX1278 / SX1262	433/868/915 MHz	2–15 km	0.3–50 kbps	Sangat rendah	Star (LoRaWAN)	Sangat baik pada sinyal lemah	[20] [21] [22]
Wi-Fi	ESP8266, ESP32, IEEE 802.11ah	2.4 GHz / sub-GHz	50–200 m	Hingga 147 Mbps	Tinggi	Star	Rentan CCI & ACI	[23] [24]
ZigBee	XBee S2C, CC2530	2.4 GHz	10–100 m	Maks. 250 kbps	Rendah	Mesh	Cukup baik namun terpengaruh interferensi Wi-Fi	[16] [25]
Bluetooth BLE	HC-05, CYW20829 BLE 5	2.4 GHz	10–1000 m (BLE 5 LR)	125 kbps – 2 Mbps	Sangat rendah	Point-to-point / Mesh	Baik dengan Coded PHY	[18] [26]

Berdasarkan Tabel 3, setiap teknologi komunikasi menunjukkan karakteristik performa yang berbeda pada parameter jangkauan, data rate, konsumsi daya, dan ketahanan gangguan. LoRa memiliki keunggulan utama pada jangkauan komunikasi yang luas dengan konsumsi daya rendah sehingga sesuai untuk aplikasi

IoT area besar seperti pertanian cerdas dan pemantauan lingkungan. Sebaliknya, Wi-Fi unggul pada kemampuan throughput tinggi untuk komunikasi data real-time, namun membutuhkan konsumsi daya yang lebih besar dibandingkan teknologi lainnya [20].

ZigBee dan Bluetooth BLE berada pada kategori komunikasi jarak pendek hingga menengah dengan fokus utama pada efisiensi daya dan stabilitas komunikasi lokal. ZigBee lebih sesuai untuk jaringan sensor berbasis mesh, sedangkan BLE banyak digunakan pada perangkat wearable dan monitoring berbasis sensor karena mendukung komunikasi hemat energi. Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa pemilihan teknologi komunikasi IoT harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan kondisi implementasi sistem.

4.2. Analisis Jangkauan Komunikasi



Gambar 1. Jarak Jangkauan Komunikasi

Berdasarkan Gambar 1, LoRa memiliki jangkauan komunikasi paling luas dibandingkan teknologi lainnya, yaitu mencapai sekitar 15.000 meter. Kemampuan tersebut dipengaruhi oleh penggunaan modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS) pada chipset Semtech SX1278 yang bekerja pada pita frekuensi sub-GHz sehingga komunikasi tetap stabil pada kondisi sinyal lemah [20], [21]. Dengan karakteristik tersebut, LoRa sangat sesuai digunakan pada sistem monitoring jarak jauh, pertanian cerdas, dan pemantauan lingkungan dengan kebutuhan pengiriman data periodik berukuran kecil.

Wi-Fi berbasis ESP32 memiliki jangkauan sekitar 200-meter dengan keunggulan pada kecepatan transfer data yang tinggi. Namun, cakupan komunikasinya masih lebih rendah dibandingkan LoRa karena bekerja pada frekuensi 2.4 GHz yang lebih rentan terhadap redaman dan interferensi [24]. Sementara itu, ZigBee memiliki jangkauan sekitar 100-meter dan lebih difokuskan pada komunikasi jaringan sensor lokal berbasis *mesh*. Bluetooth BLE menunjukkan jangkauan hingga sekitar 1.000-meter pada mode *long range* BLE 5, sehingga lebih unggul dibandingkan ZigBee untuk komunikasi jarak menengah dengan konsumsi daya rendah.

4.3. Analisis Data Rate



Gambar 2. Data Rate

Grafik data rate menunjukkan bahwa Wi-Fi memiliki *data rate* tertinggi dibandingkan teknologi lainnya, yaitu mencapai sekitar 147.000 kbps atau 147 Mbps. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Wi-Fi sangat unggul untuk aplikasi IoT yang membutuhkan transmisi data besar dan komunikasi *real-time*, seperti monitoring video, sistem berbasis *cloud*, dan pertukaran data berkecepatan tinggi [23]. Namun, tingginya throughput tersebut juga menyebabkan konsumsi daya Wi-Fi menjadi lebih besar dibandingkan teknologi komunikasi lainnya.

Bluetooth BLE memiliki *data rate* sekitar 2.000 kbps (2 Mbps), sehingga masih cukup baik untuk komunikasi perangkat sensor dan wearable dengan kebutuhan daya rendah. ZigBee berada pada *data rate* sekitar 250 kbps yang sesuai untuk komunikasi jaringan sensor lokal dengan trafik data kecil namun stabil. Sementara itu, LoRa hanya memiliki *data rate* hingga sekitar 50 kbps karena sistem lebih difokuskan pada optimasi jangkauan komunikasi dan sensitivitas sinyal dibandingkan kecepatan transfer data [22]. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik performa pada setiap teknologi sesuai kebutuhan aplikasi IoT yang digunakan.

4.4. Analisis Ketahanan Gangguan

Dari sisi ketahanan gangguan, LoRa relatif lebih stabil pada kondisi sinyal lemah karena bekerja pada pita sub-GHz dan menggunakan modulasi CSS yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap penerimaan sinyal. Namun, peningkatan jumlah node pada jaringan LoRaWAN dapat meningkatkan kemungkinan collision sehingga mempengaruhi performa komunikasi [22].

Wi-Fi lebih rentan terhadap interferensi Co-Channel Interference (CCI) dan Adjacent Channel Interference (ACI) akibat kepadatan kanal pada frekuensi 2.4 GHz [24]. ZigBee memanfaatkan topologi mesh untuk meningkatkan reliabilitas komunikasi melalui jalur alternatif antar node, sedangkan Bluetooth BLE 5 menggunakan fitur LE Coded PHY berbasis Forward Error Correction (FEC) untuk meningkatkan ketahanan link pada komunikasi long range [26]. Perbedaan mekanisme tersebut menunjukkan bahwa setiap teknologi memiliki pendekatan berbeda dalam menjaga stabilitas komunikasi pada lingkungan dengan interferensi tinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perbandingan dan analisis terhadap teknologi komunikasi nirkabel LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi, ZigBee, dan Bluetooth BLE pada sistem IoT jarak jauh, dapat disimpulkan bahwa setiap teknologi memiliki karakteristik performa yang berbeda pada parameter jangkauan komunikasi, data rate, konsumsi daya, dan ketahanan gangguan. LoRa/LoRaWAN menunjukkan jangkauan komunikasi paling luas, yaitu sekitar 2–15 km dengan konsumsi daya rendah, namun memiliki data rate relatif kecil sebesar 0.3–50 kbps sehingga lebih sesuai untuk aplikasi monitoring dan pengiriman data sensor secara periodik.

Wi-Fi memiliki throughput tertinggi hingga 147 Mbps sehingga cocok untuk aplikasi real-time dan transmisi data berukuran besar, tetapi membutuhkan konsumsi daya lebih tinggi dan lebih rentan terhadap interferensi kanal. ZigBee mendukung komunikasi berbasis mesh dengan data rate hingga 250 kbps dan jangkauan 10–100 meter sehingga sesuai untuk jaringan sensor lokal. Sementara itu, Bluetooth BLE 5 mendukung mode long range hingga ratusan meter dengan data rate 125 kbps–2 Mbps dan efisiensi daya yang baik untuk perangkat bergerak dan wearable sensor.

Hasil penelitian menunjukkan adanya trade-off antara jangkauan komunikasi, data rate, dan ketahanan gangguan sehingga tidak terdapat satu teknologi yang unggul pada seluruh parameter. Berdasarkan hasil analisis, LoRa lebih direkomendasikan untuk aplikasi IoT area luas seperti pertanian cerdas dan pemantauan lingkungan, Wi-Fi sesuai untuk sistem dengan kebutuhan throughput tinggi, ZigBee efektif untuk jaringan sensor berbasis mesh, sedangkan BLE lebih optimal untuk perangkat berdaya rendah dan komunikasi jarak dekat–menengah. Selain itu, penggunaan arsitektur komunikasi hibrida antar teknologi berpotensi menjadi solusi yang lebih adaptif untuk meningkatkan efisiensi dan reliabilitas sistem IoT jarak jauh di masa mendatang.

REFERENSI

- [1] J. Leonard *et al.*, “A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle,” vol. 25, no. February, pp. 727–774, 2008, doi: 10.1002/rob.
- [2] M. Aria, “A Survey of Self-driving Urban Vehicles Development,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/662/4/042006.
- [3] S. M. Lavalley, J. J. Kuffner, S. M. Lavalley, and J. J. Kuffner, “The International Journal of Planning,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 378–400, 2001, doi: 10.1177/02783640122067453.
- [4] E. F. Frazzoli, Emilio, Munther A. Dahleh, “Real-Time Motion Planning for Agile Autonomous Vehicles,” *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 25, no. 1, 2002, doi: <https://doi.org/10.2514/2.4856>.
- [5] T. M. Howard, “Optimal Rough Terrain Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots,” *Int. J. Rob.*

- Res., vol. 26, no. 2, pp. 141–166, 2007, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364906075328>.
- [6] S. M., “Augmenting RRT-Planners with Local Trees,” *Proceedings. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2004, no. Vol.4, pp. 3258–3262, 2004, Accessed: Apr. 22, 2026, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1308756.
 - [7] G. Lame, “Systematic literature reviews: An introduction,” *Proc. Des. Soc. Int. Conf. Eng. Des.*, vol. 2019-Augus, no. AUGUST, pp. 1633–1642, 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.169.
 - [8] B. Kitchenham and P. Brereton, “A systematic review of systematic review process research in software engineering,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 55, no. 12, pp. 2049–2075, 2013, doi: 10.1016/j.infsof.2013.07.010.
 - [9] S. D. Mamdiwar, R. Akshith, Z. Shakruwala, U. Chadha, K. Srinivasan, and C. Y. Chang, “Recent advances on iot-assisted wearable sensor systems for healthcare monitoring,” *Biosensors*, vol. 11, no. 10, pp. 1–37, 2021, doi: 10.3390/bios11100372.
 - [10] A. Arsha Albar and M. A. Yaqin, “Systematic Literature Review untuk Mengidentifikasi dan Mengklasifikasi Metode Topic Mining,” *Ilk. J. Comput. Sci. Appl. Informatics E*, vol. 7, no. 2, pp. 156–171, 2025, doi: 10.28926/ilkomnika.v7i2.728.
 - [11] D. F. Astarina, Raditia and Akbar, Lalu A Syamsul Irfan and Budiman, “Implementasi Routing Static Multi Hop Pada Perangkat Lora,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.5228.
 - [12] D. C. Pratama, Aditya and Amrita, AA Ngurah and Khrisne, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Listrik Tiga Fasa Berbasis Wireless Sensor Network Menggunakan LoRa Ra-02 SX1278,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 20, no. 2, 2021, doi: 10.24843/MITE.2021.v20i02.P20.
 - [13] R. Faizal Rahmansyah, Pribadi Murdiyat, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Pertanian Cerdas Berbasis LoRa Untuk Pemantauan Kondisi Persawahan Secara Real-Time,” *PoliGrid*, vol. 6, no. 1, pp. 50–62, 2025, doi: 10.46964/poligrid.v6i1.62.
 - [14] N. Fahriani, *Dari Kabel Ke Nirkabel : (Evolusi Dan Inovasi Jaringan Modern)*. 2024.
 - [15] D. Irawan, S. Hastini, E. Ardius, A. Isroqmi, and A. Azis, “Optimalisasi Infrastruktur Jaringan Wi-Fi 7 untuk Peningkatan Kualitas Pelayanan Akses Mahasiswa pada Universitas PGRI Palembang,” *J. Nas. Komputasi dan Teknol. Inf.*, vol. 8, no. 4, pp. 1990–1998, 2025, doi: 10.32672/jnkti.v8i4.9371.
 - [16] F. Z. Rachman, “Implementasi Jaringan Sensor Nirkabel Menggunakan,” *J. Nas. Tek. Elektro*, no. 2, 2016, doi: 10.20449/jnte.v5i2.221.
 - [17] S. Fitriawan, Helmy and Rohman, Roviq Cholifatul and Herlinawati, Herlinawati and Purwiyanti, “Pengukuran RSSI jaringan sensor nirkabel berbasis ZigBee pada berbagai topologi,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 36, pp. 15–21, 2020, doi: 10.17529/jre.v16i2.15750.
 - [18] A. Irwan, A. Kiswantono, P. Bluetooth, and T. Kabel, “Membuat Speaker Bluetooth Helm Dengan Modul Penerima Bluetooth 4.1,” *J. Pengabd. Siliwangi*, vol. 9, pp. 15–19, 2023, doi: 10.37058/jsppm.v9i1.6483.
 - [19] M. and others ANGGY, “Telemedicine Monitoring Detak Jantung Menggunakan Bluetooth Low Energy (BLE),” pp. 7–28, 2022.
 - [20] Semtech, “LoRa Modulation Basics AN1200.22,” *App Note*, no. May, pp. 1–26, 2015, [Online]. Available: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
 - [21] 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 (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–18, 2016, doi: 10.3390/s16091466.
 - [22] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
 - [23] N. Sinaga, Anisa Paujiah, Inal Syahputra, Melati, “Optimalisasi Jaringan Wifi (Wireless Fidelity) sebagai Fasilitas Pendukung Akademik Mahasiswa (Studi Kasus di UINSU),” *J. Komun. dan Media Pendidik.*, vol. 2, no. 4, pp. 18–25, 2023, doi: 10.61292/cognoscere.244.
 - [24] L. Tian, Y. Hu, and W. Han, “Research on Wi-Fi HaLow for the Internet of things,” *Chinese J. Internet Things*, vol. 3, no. 3, pp. 50–61, 2019, doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00119.
 - [25] S. Misra et al., “ZigBee Specification,” *Stand. Oct*, 2015, [Online]. Available: <https://learning.oreilly.com/library/view/zigbee-network-protocols/9781439816028/%0Ahttps://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.2893>
 - [26] L. E. S. The, “Achieving long range transmission using AIROC™ CYW20829 Bluetooth® LE SoC,” 2024.