

Studi Kinerja Jaringan LoRa: Optimalisasi dan Analisis Efisiensi Komunikasi Nirkabel

Liya Yuni Astutik

Fakultas Teknologi dan Bisnis, Informatika, Institut Teknologi Sains Dan Kesehatan Sugeng Hartono, Sukoharjo, Indonesia

Email: liya@sugenghartono.ac.id

Email Penulis Korespondensi: liya@sugenghartono.ac.id

Submitted: 14/12/2023; Accepted: 23/12/2023; Published: 26/12/2023

Abstrak—LoRa merupakan sebuah teknologi konektivitas nirkabel dengan jangkauan panjang, dianggap sebagai solusi inovatif dalam implementasi Internet of Things (IoT). Penelitian ini mencakup serangkaian uji kinerja yang dilakukan dalam berbagai kondisi, termasuk Line of Sight (terbuka) dan Non-Line of Sight (tertutup), dengan memanfaatkan frekuensi ISM 915 MHz. Pentingnya pengujian optimalisasi dan analisis efisiensi LoRa menjadi faktor utama dalam menjamin kinerja optimal dan keberlanjutan teknologi ini. Berikut adalah tahap-tahap pengujian yang dilakukan, pengujian pertama adalah pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1276 di dalam gedung, pengujian dilakukan untuk menentukan sejauh mana kemampuan komunikasi LoRa SX1276 di dalam gedung. Pengujian kedua pengujian maksimum jarak komunikasi, pengujian dilakukan untuk mengidentifikasi jarak maksimum di mana LoRa SX1276 dapat menjaga koneksi yang stabil dan handal. Pengujian ketiga adalah pengujian evaluasi kinerja transmisi data dalam lingkungan tertutup, pengujian dilakukan dalam kondisi Non-Los untuk mengevaluasi sejauh mana LoRa SX1276 dapat menjaga kinerja transmisi data dalam situasi dengan rintangan atau hambatan. Pengujian keempat adalah pengujian ketahanan LoRa SX1276 dalam pengoperasian jangka panjang, pengujian dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan dan kehandalan jaringan LoRa SX1276 dalam pengoperasian jangka panjang. Pengujian kelima adalah pengujian analisis kinerja sistem, pada pengujian analisis kinerja sistem data hasil pengujian dianalisis secara rinci untuk memahami kinerja sistem secara menyeluruh, termasuk aspek keterlambatan (delay), pengiriman data, dan kehilangan data. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang kemampuan LoRa SX1276 dalam konteks kondisi penggunaan yang berbeda. Hasilnya dapat memberikan kontribusi pada pengembangan dan penerapan teknologi LoRa SX1276 di berbagai aplikasi yang membutuhkan konektivitas nirkabel dengan jangkauan yang luas dan efisiensi tinggi.

Kata Kunci: LoRa; IoT; Frekuensi; Line of Sight; Non-Line of Sight

Abstract—LoRa is a long-range wireless connectivity technology, considered an innovative solution for implementing the Internet of Things (IoT). This research encompasses a series of performance tests conducted under various conditions, including Line of Sight (open) and Non-Line of Sight (closed), utilizing the ISM 915 MHz frequency. The importance of testing optimization and efficiency analysis of LoRa is a key factor in ensuring the optimal performance and sustainability of this technology. The testing process involves several stages. The first test assesses the communication range of LoRa SX1276 within a building, determining its communication capabilities indoors. The second test focuses on the maximum communication range, identifying the farthest distance at which LoRa SX1276 can maintain a stable and reliable connection. The third test evaluates the performance of data transmission in a closed environment, specifically Non-Line of Sight conditions, to assess how well LoRa SX1276 maintains data transmission performance in situations with obstacles or hindrances. The fourth test assesses the resilience of LoRa SX1276 in long-term operations, evaluating the network's durability and reliability over an extended period. The fifth test conducts a comprehensive analysis of the system's performance, including aspects such as delay, data delivery, and data loss. This research aims to provide a deeper understanding of the capabilities of LoRa SX1276 in various usage scenarios. The results are expected to contribute to the development and implementation of LoRa SX1276 technology in diverse applications requiring wireless connectivity with extensive range and high efficiency.

Keywords: LoRa; IoT; Frekuensi; Line of Sight; Non-Line of Sight

1. PENDAHULUAN

Dalam era transformasi digital yang semakin pesat, konektivitas nirkabel telah menjadi tulang punggung revolusi teknologi yang membentuk cara kita berinteraksi dengan lingkungan sekitar. Internet of Things (IoT) memainkan peran sentral dalam perubahan ini dengan memfasilitasi pertukaran data yang efisien dan terintegrasi antar berbagai perangkat. Di tengah pemandangan ini, teknologi konektivitas nirkabel menjadi krusial, dan salah satu inovasi yang menonjol adalah Long Range (LoRa). LoRa dikenal sebagai solusi konektivitas jarak jauh yang menawarkan cakupan area yang luas dengan konsumsi daya yang rendah, menjadikannya pilihan yang potensial untuk berbagai aplikasi IoT. Pentingnya pengujian optimalisasi dan analisis efisiensi LoRa menjadi faktor utama dalam menjamin kinerja optimal dan keberlanjutan teknologi ini. Penelitian mengenai LoRa SX1276 di luar negeri telah menjadi subjek penting dalam bidang teknologi konektivitas nirkabel dan Internet of Things (IoT). Berbagai penelitian ini melibatkan uji kinerja, optimalisasi, dan analisis efisiensi LoRa SX1276 dalam berbagai kondisi dan skenario penggunaan. Beberapa penelitian terkait antara lain: Analysis of Component Functions at the Physical and Data Link Layers through Simulation and Field Tests: Penelitian ini fokus pada analisis fungsi komponen pada lapisan fisik dan data link LoRa SX1276 melalui simulasi dan uji lapangan. Dengan menggabungkan pendekatan simulasi dan pengujian langsung, penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang performa LoRa SX1276 dalam skenario nyata [1]. Evaluation of LoRa-WAN Performance in Various Conditions in Spain: Penelitian ini mengevaluasi kinerja LoRa-WAN, termasuk LoRa SX1276, dalam berbagai kondisi menggunakan

frekuensi ISM 868 MHz. Uji dilakukan di lingkungan urban, suburban, dan rural, memberikan pemahaman tentang adaptabilitas LoRa dalam berbagai lingkungan geografis [2]. *Testing LoRa-WAN Performance in Terms of Doppler Effect, Scalability, and Coverage*: Fokus penelitian ini adalah menguji kinerja LoRa-WAN, termasuk SX1276, dalam hal efek Doppler, skalabilitas, dan cakupan. Aspek-aspek ini dievaluasi untuk menentukan sejauh mana LoRa dapat bersaing dalam skenario dengan perubahan cepat dan kebutuhan jaringan yang berkembang [3]. *International Studies on LoRa for Rural Development*: Penelitian ini berfokus pada bagaimana teknologi LoRa dapat digunakan untuk pengembangan daerah pedesaan. Ini melibatkan penggunaan LoRa SX1276 dalam mengatasi tantangan konektivitas di daerah yang terpencil dan mendorong pengembangan berkelanjutan [4]. *Performance Evaluation of LoRa in Urban Environments for Smart City Applications*: Penelitian ini mengevaluasi kinerja LoRa, termasuk SX1276, dalam lingkungan perkotaan untuk aplikasi Smart City. Pengujian dilakukan untuk mengukur efisiensi transmisi data dan ketahanan jaringan di tengah-tengah kompleksitas infrastruktur perkotaan [5]. *LoRa Communication System for Intelligent Agriculture*: Penelitian ini mengkaji penerapan sistem komunikasi LoRa, termasuk SX1276, dalam bidang pertanian pintar. Penelitian mencakup penggunaan LoRa untuk pengumpulan data sensor pertanian dan memberikan pemahaman tentang bagaimana teknologi ini mendukung sektor pertanian [6].

Dari ulasan penelitian LoRa SX1276 di luar negeri, dapat disimpulkan bahwa LoRa SX1276 memiliki aplikasi yang luas dan mampu mengatasi berbagai kondisi lingkungan. Uji kinerja melibatkan aspek-aspek seperti jarak transmisi, ketahanan terhadap gangguan, dan adaptabilitas terhadap perubahan lingkungan. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi berharga dalam pengembangan dan penerapan LoRa SX1276 di berbagai skenario dan membantu meningkatkan pemahaman kita tentang potensi serta batasan teknologi konektivitas nirkabel ini.

Berdasarkan klaim keunggulan LoRa SX1276 di luar negeri, maka pada penelitian ini membawa fokus pada studi kinerja jaringan LoRa, dengan tujuan utama untuk mengoptimalkan dan menganalisis efisiensi komunikasi nirkabelnya. Sebagai teknologi yang telah mendapatkan perhatian meluas, LoRa menjanjikan kemampuan untuk menyediakan koneksi yang andal di berbagai skenario, termasuk lingkungan perkotaan dan pedesaan. Melalui serangkaian uji kinerja yang cermat, penelitian ini akan mengeksplorasi berbagai aspek yang mempengaruhi kinerja LoRa, mulai dari kondisi lingkungan hingga parameter teknis yang dapat dioptimalkan.

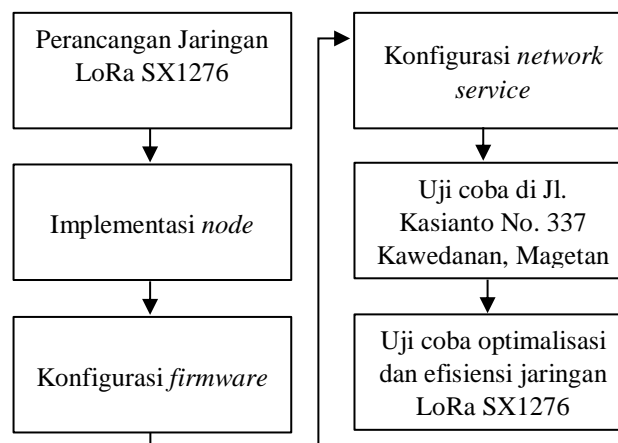
Penelitian ini akan mencakup pengujian dalam dua kondisi utama: Line of Sight (Los) dan Non-Line of Sight (Non-Los). Pengujian ini akan dilakukan dengan memanfaatkan frekuensi ISM 915 MHz sebagai basis frekuensi kerja, yang umumnya digunakan dalam implementasi LoRa. Pendekatan ini akan memberikan pemahaman holistik tentang kemampuan LoRa dalam menghadapi tantangan komunikasi di ruang terbuka dan tertutup. Selain itu, penelitian ini akan melibatkan pengukuran jarak komunikasi di dalam gedung, pengujian maksimum jarak komunikasi yang dapat dicapai, evaluasi kinerja transmisi data dalam lingkungan tertutup, dan uji ketahanan LoRa dalam pengoperasian jangka panjang.

Dengan melihat lebih dekat pada potensi dan batasan LoRa, penelitian ini berusaha memberikan wawasan yang mendalam tentang kinerja sistem, termasuk keterlambatan (delay), pengiriman data, dan kehilangan data. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan untuk pengembangan yang lebih lanjut dalam desain jaringan LoRa, memungkinkan penerapannya yang lebih efektif dalam berbagai konteks aplikasi. Keberhasilan penelitian ini akan membuka pintu bagi penerapan teknologi konektivitas nirkabel yang handal dan efisien, mempercepat perkembangan ekosistem IoT yang semakin berkembang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Alur Penelitian

Lokasi penelitian berada di Jl. Kasianto No. 337 Kawedanan, Magetan. Alur penelitian dapat digambarkan dengan tahapan-tahapan sebagaimana terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

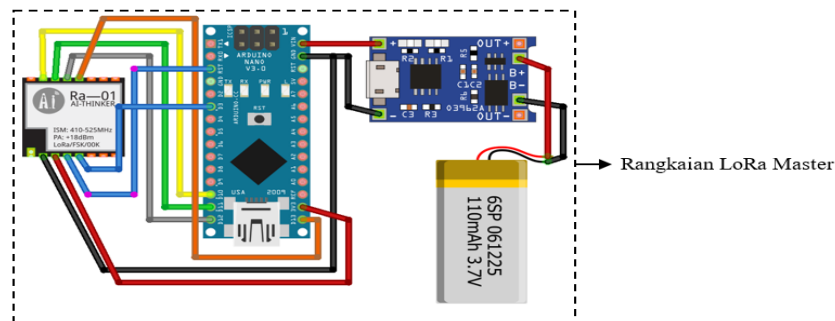
Berdasarkan Gambar 1, diketahui bahwa setelah sistem jaringan LoRa SX1276 terbentuk, maka akan dilakukan beberapa pengujian diantaranya pengujian jarak LoRa SX1276 di dalam gedung, pengujian jarak maksimum LoRa SX1276, jangkauan LoRa SX1276 di tempat tertutup, ketahanan LoRa SX1276, dan pengujian latensi LoRa SX1276. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui optimalisasi dan efisiensi kinerja jaringan LoRa SX1276 di beberapa kondisi, baik dalam kondisi Los (terbuka) dan Non-Los (tertutup).

2.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem pada penelitian ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu perancangan sistem master dan perancangan sistem slave. Perancangan sistem master dibuat dengan menggunakan 1 buah modul LoRa SX1276, 1 buah modul Arduino nano, 1 buah modul charging, dan 1 buah baterai. Sedangkan sistem slave dibuat dengan menggunakan 1 buah modul LoRa SX1276, 1 buah modul Arduino nano, 1 buah LCD OLED, 1 buah modul charging, dan 1 buah baterai [7]. Adapun konfigurasi pin komunikasi antara LoRa SX1276 dengan Arduino nano pada perancangan sistem master adalah sebagai berikut:

- a. Pin MISO terhubung ke port PB4
- b. Pin MOSI terhubung ke port PB3
- c. Pin NSS terhubung ke port PB2
- d. Pin SCK terhubung ke port PBS
- e. Pin DIO0 terhubung ke port PB0
- f. Pin Reset terhubung ke port PC6
- g. Pin VCC terhubung ke port VCC
- h. Pin GND terhubung ke port GND

Selain konfigurasi LoRa SX1276 dan Arduino nano, pada perancangan sistem master dan perancangan sistem slave juga dilengkapi dengan konfigurasi modul pengisian daya, sehingga jika kondisi baterai pada master maupun slave lemah, maka proses pengisian daya dapat dilakukan dengan cara mencolokkan usb charging ke modul charging sistem. Untuk detail desain perancangan LoRa master dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perancangan Sistem LoRa Master

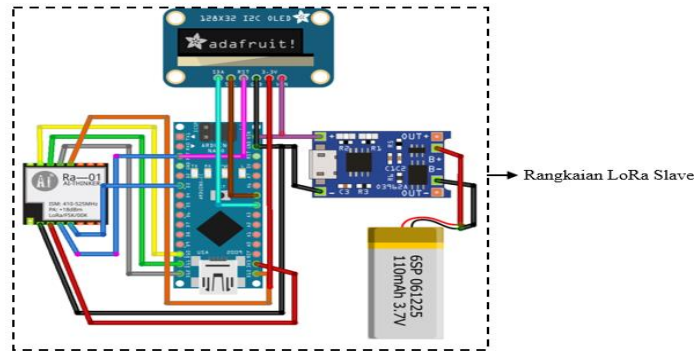
Sedangkan konfigurasi pin komunikasi antara LoRa SX1276 dengan Arduino nano pada perancangan sistem slave adalah sebagai berikut:

- a. Pin MISO terhubung ke port PB4
- b. Pin MOSI terhubung ke port PB3
- c. Pin NSS terhubung ke port PB2
- d. Pin SCK terhubung ke port PBS
- e. Pin DIO0 terhubung ke port PB0
- f. Pin Reset terhubung ke port PC6
- g. Pin VCC terhubung ke port VCC
- h. Pin GND terhubung ke port GND

Pada perancangan sistem master selain konfigurasi pin komunikasi antara LoRa SX1276 dengan Arduino nano, juga ada konfigurasi antara Arduino nano dengan LCD OLED. Adapun konfigurasi antara Arduino nano dengan LCD OLED adalah sebagai berikut:

- a. Pin SDA terhubung ke port PC4
- b. Pin SCL terhubung ke port PC5
- c. Pin RST terhubung ke port PB6
- d. Pin GND terhubung ke port GND
- e. Pin 3.3V terhubung ke port 3V3
- f. Pin Vin terhubung ke port Vin

Adapun detail desain perancangan LoRa slave dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perancangan Sistem LoRa Slave

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

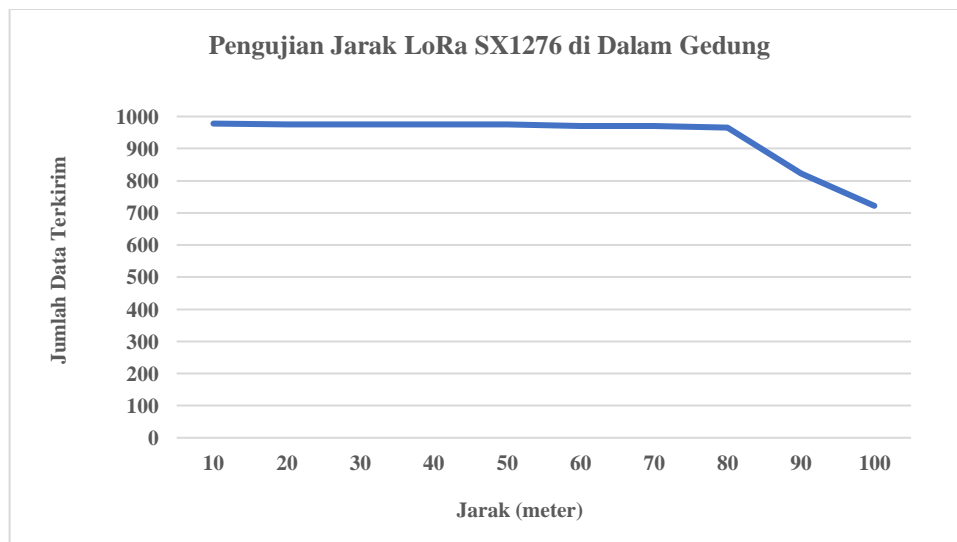
3.1 Pengujian Jarak LoRa SX1276 di Dalam Gedung

Penelitian ini digunakan untuk melakukan pembatasan transmisi data dan kapabilitas LoRa SX1276 dalam mengirimkan data pada jarak yang bervariasi dengan menggunakan helical antennas pada perangkat master dan slave. Proses transmisi data dilakukan menggunakan LoRa SX1276 dengan frekuensi 915MHz. Master dan slave ditempatkan pada lokasi yang berbeda dengan rentang jarak antara 10 hingga 100 meter. Jumlah total data yang dikirimkan mencapai 1000 data, yang terdiri dari urutan angka dari "0-1000". Hasil pengiriman data ditampilkan melalui terminal serial di PC. Dengan memperhitungkan perbedaan antara jumlah total data yang dikirim dan jumlah total data yang diterima, persentase error akan dihitung untuk menentukan rentang komunikasi terbaik LoRa SX1276. Tabel 1 merupakan informasi hasil pengujian jarak LoRa SX1276 di dalam gedung.

Tabel 1. Data Pengujian Jarak Komunikasi Pada LoRa SX1276

Pengujian Jarak Komunikasi Pada LoRa SX1276				
Jarak (meter)	Jumlah Data Total	Jumlah Data Terkirim	Porsentasi	
10	1000	978	97,8%	
20	1000	976	97,6%	
30	1000	976	97,6%	
40	1000	976	97,6%	
50	1000	976	93,5%	
60	1000	970	97%	
70	1000	970	97%	
80	1000	965	96,5%	
90	1000	822	82,2%	
100	1000	722	72,2%	

Gambar 4 merupakan informasi hasil pengujian jarak LoRa SX1276 di dalam Gedung.



Gambar 4. Grafik Pengujian Jarak Komunikasi Pada LoRa SX 1276

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 4 diketahui bahwa total transmisi data sebanyak 1000 data dengan 10 kali pengambilan pada jarak yang berbeda. Untuk transmisi LoRa SX1276 di dalam ruangan, dapat dilihat dari Tabel 1 bahwa 93,31% data dapat diterima. Pengiriman tidak mengalami masalah signifikan hingga jarak 80 meter. Namun, transmisi data mulai terganggu pada jarak 90 meter yang hanya dapat menerima data sebesar 82,2%, dan pada jarak 100 meter hanya dapat menerima data sebesar 72,2%. Dengan kegagalan pengiriman sebesar 27,8%, ini masih dapat diterapkan untuk aplikasi yang tidak memerlukan kondisi pengukuran secara real-time. Kegagalan pengiriman dapat terjadi akibat hambatan seperti dinding, pintu, dll. Sehingga semakin jauh jarak komunikasi dan semakin banyak rintangan antara master dan slave akan memengaruhi transmisi pada LoRa SX1276.

3.2 Pengujian Jarak Maksimum LoRa SX1276

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan jarak maksimum komunikasi LoRa SX1276 antara slave dan master. Pengujian ini menggunakan helical antennas pada slave dan master. Hasil pencarian jarak maksimum komunikasi LoRa SX1276 disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Pencarian Jarak Maksimum Komunikasi LoRa SX1276

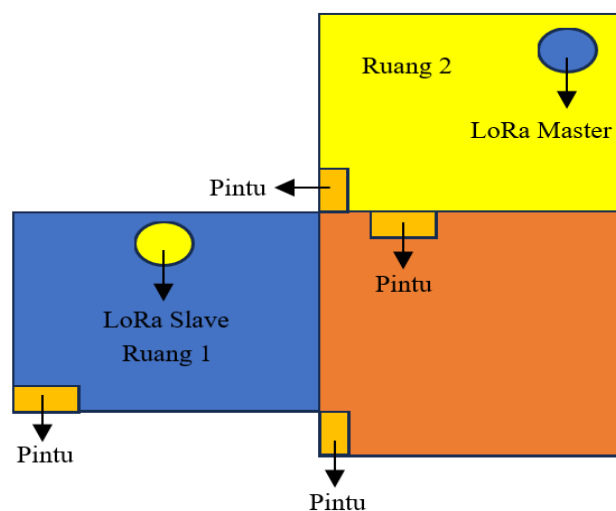
Start/ finish	Jarak (meter)	RSSI
Bank BRI Kawedanan	120	-110
Kawedanan Regency	1600	-118

Berdasarkan pengujian, untuk menemukan jarak maksimum komunikasi dari LoRa SX1276 dengan mencari titik terjauh dan memeriksa komunikasi melalui serial pada perangkat lunak Arduino IDE. Jarak komunikasi maksimum dari LoRa SX1276 adalah 1600meter antara slave dan master. Kondisi lingkungan untuk pengujian ini berada di Jl. Kasianto No. 337 Kawedanan, Magetan, dengan banyak area pemukiman, pohon, kendaraan, dan orang-orang yang lalu-lalang. Jarak maksimum ini tidak sesuai dengan spesifikasi LoRa SX 1276, yang mencapai hingga 5 km. Hal ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk:

1. Faktor kondisi LoS (Line of Sight), ini dapat terjadi karena master terletak di daerah pinggiran kota, di mana terdapat banyak hambatan seperti pohon besar atau rumah yang menyebabkan hambatan distribusi sinyal, faktor gangguan pada frekuensi kerja.
2. Frekuensi 915MHz berada pada batas atas uplink GSM, sehingga terjadi interferensi yang dapat melemahkan penerimaan.
3. Konfigurasi sistem antena kurang optimal (dalam pengujian menggunakan antena dengan gain 2dBi).

3.3 Jangkauan LoRa SX1276 di Tempat Tertutup

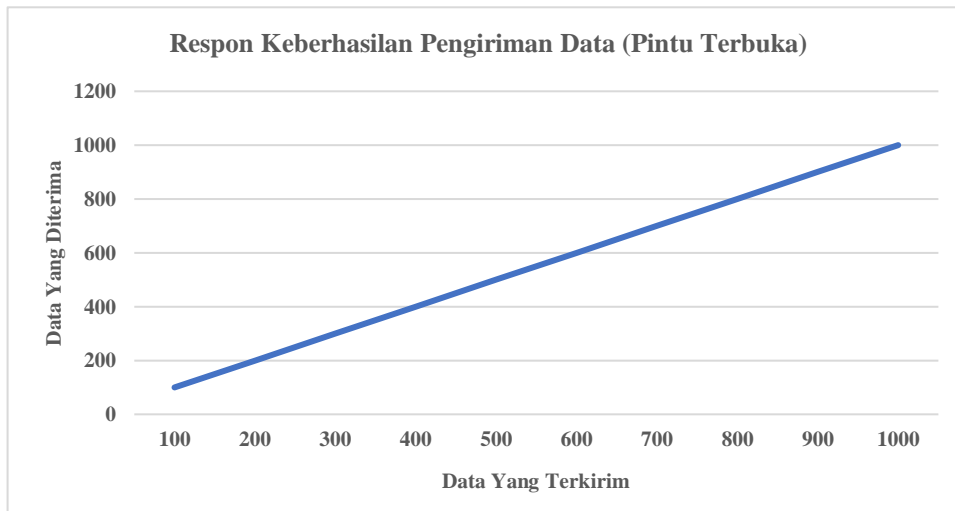
Pengujian ini bertujuan untuk menentukan keberhasilan transmisi data di dalam ruangan tertutup. Pengujian dilakukan di Jl. Kasianto No. 337 Kawedanan, Magetan. Pada pengujian master dan slave, keduanya ditempatkan di ruangan yang berbeda. Transmisi data dilakukan selama 60 menit, dengan mengirimkan 1000 paket data. Pengujian dilakukan di 2 ruangan, yaitu ruangan 1 dan ruangan 2, dengan luas masing-masing ruangan 3m x 4m. Slave ditempatkan di ruangan 1 sedangkan master ditempatkan di ruangan 2. Jarak antara slave dan master adalah 6m. Untuk informasi lebih lanjut tentang lokasi pengumpulan data, dapat dilihat melalui denah lantai pada Gambar 5.



Gambar 5. Denah Lokasi Pengumpulan Data di Tempat Tertutup

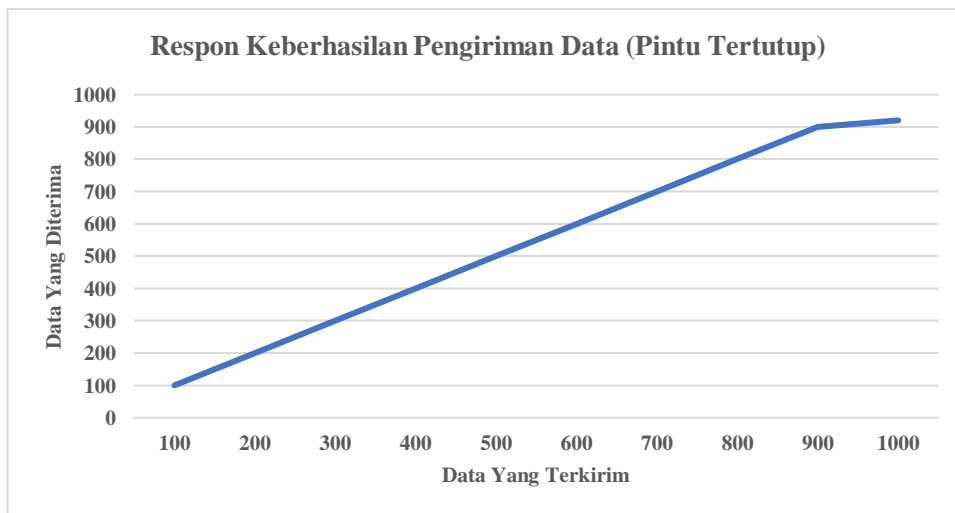
Pengujian pertama dilakukan dengan kondisi pintu terbuka. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 3. Untuk memperjelas hasil pengujian, data disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6. Transmisi data dilakukan selama 60 menit, dengan mengirimkan 1000 paket data. Selama waktu itu, 1000 data yang dikirim dapat diterima dengan

baik oleh penerima. Keberhasilan transmisi data mencapai 100% tanpa kegagalan. Oleh karena itu, dapat diterapkan pada aplikasi yang membutuhkan kondisi pengukuran secara real-time.



Gambar 6. Grafik Pengiriman Data Ruang 1 dan Ruang 2 Pintu Terbuka

Pengujian kedua dilakukan dengan kondisi pintu tertutup. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 3. Untuk memperjelas hasil pengujian, data disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 7. Transmisi data dilakukan selama 60 menit, dengan mengirimkan 1000 paket data. Selama waktu tersebut, 1000 data berhasil diterima dengan baik oleh master. Data dianggap gagal jika tidak terkirim atau terkirim namun tidak sesuai atau rusak. Keberhasilan pengiriman data mencapai 92% berhasil dan 8% gagal. Kegagalan ini disebabkan oleh hambatan seperti dinding, pintu, dll. Gambar 7 merupakan informasi respon keberhasilan pengiriman data dengan kondisi pintu tertutup.



Gambar 7. Grafik Pengiriman Data Ruang 1 dan Ruang 2 Pintu Tertutup

Tabel 3 merupakan informasi keberhasilan pengiriman data LoRa SX1276 di tempat tertutup.

Tabel 3. Pengiriman Data LoRa SX1276 di Tempat Tertutup

No	Tempat dan Kondisi	Data Dikirim	Data Berhasil	Data Gagal	Keberhasilan
1	Pintu terbuka	1000	1000	0	100%
2	Pintu Tertutup	1000	920	80	92%

Berdasarkan Tabel 3 diketahui bahwa keberhasilan pengiriman data LoRa SX1276 ditempat tertutup rata-rata sebesar 96%.

3.4 Ketahanan LoRa SX 1276

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan ketahanan LoRa SX 1276 jika dioperasikan dalam jangka waktu yang lama. Pengujian akan dilakukan dalam satu hari dengan durasi transmisi selama 10 detik dan jarak antara slave dan master adalah 1 meter. Kesesuaian data yang dikirimkan akan menjadi parameter untuk menentukan persentase kesalahan dari uji ini. Dari hasil uji, data diperoleh dalam Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Ketahanan LoRa SX1276

Jumlah Data	27.406
Data Yang Terkirim	27.064
Data Yang Gagal	342
Sampling Rate	10 second
%Error	1,01218643%
Lama Pengiriman	2 jam: 10 menit : 11 second

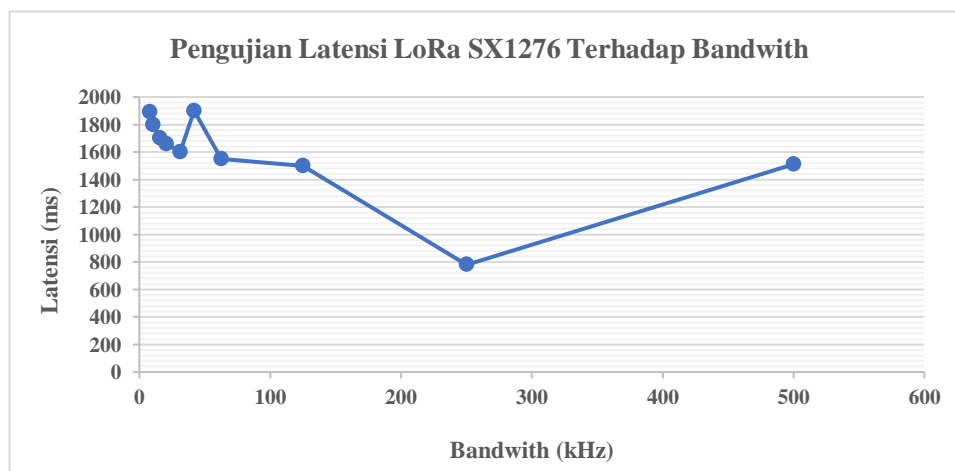
Hasil pengujian terdapat pada tabel 4 dengan durasi pengiriman selama 2 jam: 10 menit: 11 second, total data yang diperoleh adalah 27.406. Dari hasil pengiriman, ditemukan bahwa data yang berhasil terkirim sebanyak 27.064, sementara data yang gagal sebanyak 342. Data dianggap gagal terkirim jika tidak terkirim atau terkirim namun tidak sesuai atau rusak. Dengan demikian, dari 27.064 data yang terkirim, diperoleh tingkat kesalahan sebesar 1.01218643% dengan waktu pengiriman selama 2 jam: 10 menit: 11 second. Dengan tingkat kesalahan sebesar 1.01218643% dan waktu pengiriman selama 2 jam: 10 menit: 11 second, kekuatan sinyal dan ketahanan LoRa SX1276 masih relatif baik dan stabil, sehingga memungkinkan untuk diterapkan pada sistem yang membutuhkan kondisi real-time dan dapat dioperasikan dalam jangka waktu yang lama.

3.5 Pengujian Latensi LoRa SX 1276

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jeda keterlambatan atau latensi pada komunikasi data melalui LoRa SX1276 terhadap bandwidth, serta untuk mengetahui nilai optimal bandwidth berdasarkan jeda keterlambatan atau latensi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan pewaktu yang terdapat pada Arduino IDE dengan fitur timestamp di serial monitor untuk memonitoring master dan slave. Fitur timestamp berdasarkan waktu pada laptop. Pada pengujian kali ini menggunakan 2 laptop yang waktunya harus disamakan. Hasil pengurangan waktu pada master dan slave merupakan waktu kirim data. Yang mana waktu tersebut merupakan jeda keterlambatan atau latensi. Pada pengujian ini LoRa SX1276 menggunakan antenna 2dbi pada slave. Pengujiannya bertempat di Jl. Kasianto No. 337 Kawedanan, Magetan, dengan jarak antara master dan slave adalah 5meter dengan mengirimkan 25 data disetiap bandwidth. Data hasil pengujian disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Latensi Pada Lora SX1276

No	Bandwith (kHz)	Latensi (ms)
1.	7,8	1.890
2.	10,4	1.800
3.	15,6	1.700
4.	20,8	1.660
5.	31,2	1.600
6.	41,7	1.900
7.	62,5	1.550
8.	125	1.500
9.	250	780
10.	500	1.510



Gambar 7. Grafik Latensi Pada Lora SX1276

Bandwidth merupakan salah satu unsur terhadap kecepatan jaringan. Latensi merupakan unsur lain yang mempengaruhi kecepatan jaringan. Pada dasarnya semua komunikasi data melalui jaringan mengalami jeda keterlambatan atau latensi. Ada 3 pengelompokan dalam latensi:

1. Low network latency: jika latensinya kurang dari 10ms.
2. Medium network latency: jika latensinya diantara 10ms sampai 1000ms.
3. High network latency: jika latensinya lebih dari 1000ms.

Berdasarkan Gambar 7 hanya ada 1 titik yang berada di bawah 1 second. Berdasarkan pengelompokan latensi, 9 dari 10 bandwidth dapat dikategorikan High network latency. Latensi yang tinggi dapat menciptakan hambatan dalam komunikasi data. Berdasarkan Tabel V, bandwidth yang dikategorikan Medium network latency adalah 250 kHz. Berdasarkan pengujian Latensi pada LoRa SX1276 terhadap Bandwidth untuk mendapatkan bandwidth yang optimal, yang dilakukan di Jl. Kasianto No. 337 Kawedanan, Magetan pada jarak 5m dengan menggunakan antenna 2dbi pada slave adalah menggunakan bandwidth 250 kHz.

3.6 Pengujian Set Bandwith Yang Berbeda Lora SX 1276

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keberhasilan komunikasi pada LoRa SX1276 dengan set bandwidth yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan mengatur bandwidth master sebesar 500 kHz dan bandwidth slave sebesar 125 kHz. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan 10 pesan dari master ke slave. Hasil pengujian nya seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengiriman Data Jika Bandwith Berbeda

Data Yang Dikirim	Data Yang Diterima
10	0

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, jika antara master dan slave set bandwidthnya tidak sama, maka komunikasi datanya akan terputus. Karena dalam satu frame data, bandwidth dan spreading factor adalah konstan. Selain itu ketika set bandwidth berbeda, berarti lebar frekuensi dalam komunikasi data berbeda. Sinyal yang di transmisikan adalah paket sinyal yang konstan.

3.7 Pengujian Protocol Token Parsing

Pengujian ini bertujuan untuk menerapkan metode untuk mengontrol system agar tidak terjadi tabrakan data ketika pengiriman secara bersamaan. Serta mengetahui keefektifan dari metode. Motode yang digunakan adalah Token Passing namun dengan nilai bandwidth yang berbeda di setiap node. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Data Pengujian Protocol Token Parsing

	Total Data	Data Masuk	Data Hilang
Node 1	68	23	45
Node 2	61	25	36
Node 3	22	22	0

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada Tabel 7, pengiriman data secara bersama-sama tidak terdeteksi adanya tabrakan data ketika pengiriman. Namun permasalahannya adalah adanya data yang hilang. Hal ini dapat terjadi karena dalam pengaplikasiannya dengan menggunakan bandwidth, mekanisme token passing masih belum berjalan sesuai teori. Karena penggunaan bandwidth yang terkadang tidak terhubung. Pada pengujian ini, waktu pengiriman disamakan semua. Namun latensi atau jeda keterlambatan antar bandwidth nilainya berbeda-beda. Perlu adanya perhitungan latensi di setiap node disesuaikan dengan bandwidth yang digunakan.

3.8 Pengujian Lifetime Battery

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui lifetime battery keseluruhan sistem ketika penggunaan device secara realtime. Pengiriman dilakukan dengan protocol token passing. Pada pengujian dilakukan dengan mengamati satu device diantara 3 device. Pengiriman data setiap device setiap 3 second.

Tabel 8. Pengujian Lifetime Battery

Kapasitas battery	260mAh
Voltage battery	3.7 volt/ 1 cell/ ISIP
Discharge battery	25C Constant/ 70C Burst
Sampling rate	3 second
Lama Penggunaan	11,5 jam
Jumlah Data	6.384
Protocol	Token Passing

Pada pengujian keseluruhan system yang digunakan secara realtime yang mana setiap device melakukan pengiriman data setiap 3 detik. Waktu tersebut dirasa cukup karena setiap kondisi dapat terpantau, baik kondisi ideal maupun kondisi darurat. Berdasarkan Tabel 8 dimana battery yang digunakan adalah battery turnigy dengan kapasitas 260mAh yang mampu bertahan hingga 11,5 jam. Dalam waktu tersebut, dapat melakukan pengiriman data sejumlah 6.384 paket data.

4. KESIMPULAN

Studi kinerja LoRa SX1276 dalam penelitian ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang potensi dan karakteristik teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh ini. Dengan implementasi chip LoRa pada PCB yang dilengkapi dengan antena terintegrasi, serta penggunaan mikrokontroler Arduino nano sebagai prosesor inti dengan step-down switching regulator, hasil penelitian ini memberikan wawasan yang penting terkait dengan aplikabilitas dan kinerja LoRa SX1276. Pentingnya jangkauan transmisi LoRa SX1276 terbukti dalam hasil penelitian, dengan jarak transmisi data mencapai 100 meter di tempat tertutup dan mencapai maksimum 1600 meter dalam kondisi optimal. Keberhasilan transmisi data tanpa hambatan mencapai 100%, sementara di tempat tertutup dengan hambatan berhasil mencapai 92%, memberikan gambaran bahwa teknologi ini mampu mengatasi beberapa rintangan. Uji ketahanan LoRa juga memberikan hasil yang positif, dengan persentase kesalahan sebesar 1.01218643%. Keberhasilan transmisi data di tempat tertutup tanpa hambatan dan dengan hambatan menunjukkan bahwa LoRa SX1276 mampu menghadapi berbagai kondisi lingkungan dengan tingkat keberhasilan yang tinggi. Analisis keterlambatan atau latensi menjadi aspek penting dalam penelitian ini, dengan temuan bahwa bandwidth 250 kHz memberikan kinerja tercepat, mencapai waktu 786ms. Hal ini mengindikasikan bahwa LoRa SX1276 dapat memberikan respons cepat dalam mentransmisikan data, yang krusial untuk aplikasi yang memerlukan kecepatan dan efisiensi dalam pertukaran informasi. Meski demikian, penggunaan protocol token passing dengan mengatur bandwidth berbeda setiap node berhasil mengatasi tabrakan data, tetapi masih terdapat tantangan terkait dengan kehilangan data. Kesimpulannya, teknologi LoRa SX1276 menunjukkan potensi yang signifikan sebagai solusi komunikasi nirkabel jarak jauh. Dengan hasil positif dalam berbagai kondisi pengujian, LoRa SX1276 dapat diaplikasikan dalam berbagai skenario nyata yang memerlukan jangkauan luas, kehandalan, dan efisiensi komunikasi.

REFERENCES

- [1] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [2] A. Sharma, D. Singh Kapoor, A. Nayyar, B. Qureshi, K. Jot Singh, and K. Thakur, "Exploration of IoT Nodes Communication Using LoRaWAN in Forest Environment," *Computers, Materials & Continua*, vol. 71, no. 3, pp. 6239–6256, 2022, doi: 10.32604/cmc.2022.024639.
- [3] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, and J. Iinatti, "Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *Int J Distrib Sens Netw*, vol. 13, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.1177/1550147717699412.
- [4] E. Murdyantoro, A. W. W. Nugraha, A. W. Wardhana, A. Fadli, and M. I. Zulfa, "A review of LoRa technology and its potential use for rural development in Indonesia," 2019, p. 020011. doi: 10.1063/1.5097480.
- [5] Y. Li, J. Yang, and J. Wang, "DyLoRa: Towards Energy Efficient Dynamic LoRa Transmission Control," 2020.
- [6] V. Križanović, K. Grgić, J. Spišić, and D. Žagar, "An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using Lora-Based Wireless Sensor Networks," 2023, doi: 10.20944/preprints202306.1057.v1.
- [7] L. Y. Astutik and R. Yusuf, "Performance Study of LoRa IoT Technology," in 2022 12th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), IEEE, Oct. 2022, pp. 31–35. doi: 10.1109/ICSET57543.2022.10011110.
- [8] A. R. Zain, S. Azka, R. Hudi, and I. Neforawati, "Analisis Pengiriman Data Dari Gateway LoRa ke," 2021.
- [9] H. Zhong, L. Ning, J. Wang, S. Suo, and L. Chen, "Optimization of LoRa SF Allocation Based on Deep Reinforcement Learning," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/1690667.
- [10] G. Callebaut, G. Ottoy, and L. Van Der Perre, Cross-Layer Framework and Optimization for Efficient Use of the Energy Budget of IoT Nodes. [Online]. Available: <https://github.com/thethingsnetwork> (accessed Dec. 01, 2023).
- [11] L. García, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "WiFi and LoRa Energy Consumption Comparison in IoT ESP 32/SX1278 Devices." [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/180545><https://www.iaria.org/conferences2019/SMART19.html> (accessed Dec. 01, 2023).
- [12] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?," in *MSWiM 2016 - Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Association for Computing Machinery, Inc, Nov. 2016, pp. 59–67. doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [13] D. Sallyna, U. Kurniawan Usman, and M. A. Murti, "PERENCANAAN JARINGAN LONG RANGE (LORA) PADA FREKUENSI 920 MHz-923 MHz DI KOTA BANDUNG LONG RANGE (LORA) NETWORK PLANNING WITH FREQUENCY 920 MHz-923 MHz IN BANDUNG CITY," vol. 7, no. 1, 2020.
- [14] E. F. Silva et al., "Adaptive Parameters for LoRa-Based Networks Physical-Layer," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4597, May 2023, doi: 10.3390/s23104597.
- [15] Y. Yazid, A. Guerrero-González, I. Ez-Zazi, A. El Oualkadi, and M. Arioua, "A Reinforcement Learning Based Transmission Parameter Selection and Energy Management for Long Range Internet of Things," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5662, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22155662.
- [16] A. Djoudi, R. Zitouni, N. Zangar, and L. George, Genetic Algorithm For LoRa Transmission Parameter Selection. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-specification-> (accessed Dec. 03, 2023).
- [17] "An evaluation of LoRa transmission parameter selection for indoor positioning," 2022.
- [18] M. Bor and U. Roedig, "LoRa Transmission Parameter Selection," in 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), IEEE, Jun. 2017, pp. 27–34. doi: 10.1109/DCOSS.2017.10.
- [19] K.-H. Ke et al., "Demo Abstract: A LoRa Wireless Mesh Networking Module for Campus-Scale Monitoring." [Online]. Available: <https://www.lora-alliance.org/> (accessed Dec. 03, 2023).



- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers Indonesia Section, 2022 International Conference on Information Technology Research and Innovation (ICITRI) virtual conference, November 10, 2022\$d.
- [21] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, M.-D. Cano, and A. Skarmeta, “Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions,” *Sensors*, vol. 18, no. 3, p. 772, Mar. 2018, doi: 10.3390/s18030772.