

EVALUASI KINERJA DAN EFISIENSI JARINGAN LORAWAN UNTUK APLIKASI IOT DI LINGKUNGAN SUBURBAN

Rengga Surya Saputra, I Nyoman Pramaita², Nyoman Gunantara²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl Raya Kampus Unud Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali 80631

suryasaputra@student.unud.ac.id, pramaita@unud.ac.id, gunantara@unud.ac.id

ABSTRAK

Digitalisasi pada era saat ini sangat berkembang pesat, terutama dalam pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) untuk berbagai keperluan, termasuk di sektor transportasi dan penyewaan kendaraan. Penelitian ini berfokus pada penerapan jaringan LoRaWAN dalam mendukung sistem penyewaan skuter listrik di lingkungan suburban, khususnya di wilayah Kintamani. Sistem yang dirancang memungkinkan pemantauan lokasi skuter listrik secara real-time melalui integrasi modul GPS, serta memberikan fitur keamanan tambahan dengan adanya tombol darurat untuk situasi mendesak. Sistem ini juga dilengkapi dengan pengaturan waktu penyewaan, guna memaksimalkan efisiensi dalam pengelolaan penyewaan skuter listrik. LoRaWAN dipilih karena kemampuannya dalam transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, yang sangat cocok untuk wilayah suburban dengan cakupan area luas dan infrastruktur terbatas. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kinerja jaringan dalam aspek komunikasi, tetapi juga meninjau efisiensi sistem dari segi jumlah perangkat yang dapat dihubungkan secara bersamaan. Fokus dari evaluasi adalah melihat seberapa optimal sistem ini dapat digunakan dalam skala yang lebih besar, terutama dalam mendukung kebutuhan IoT yang terus berkembang. Studi ini memberikan gambaran mengenai potensi pengembangan sistem penyewaan sepeda berbasis IoT yang lebih aman dan efisien di lingkungan suburban.

Kata kunci : Internet of Things, LoRaWAN, Delay, Suburban, Skuter Listrik

ABSTRACT

The current era of digitalization is rapidly advancing, especially in the utilization of Internet of Things (IoT) technology for various purposes, including in the transportation and vehicle rental sectors. This research focuses on the application of the LoRaWAN network in supporting the electric scooter rental system in suburban environments, particularly in the Kintamani area. The designed system allows real-time monitoring of electric scooter locations through the integration of GPS modules, and also provides additional security features with an emergency button for urgent situations. The system is also equipped with rental time settings to maximize efficiency in managing electric scooter rentals. LoRaWAN was chosen for its ability to transmit data over long distances with low power consumption, which is highly suitable for suburban areas with wide coverage and limited infrastructure. This research not only evaluates the network's performance in terms of communication but also reviews the system's efficiency in terms of the number of devices that can be connected simultaneously. The evaluation focuses on how optimally this system can be used on a larger scale, especially in supporting the growing needs of IoT. This study provides insights into the potential development of a safer and more efficient IoT-based bike rental system in suburban environments.

Key Words : Internet of Things, LoRaWAN, Delay, Suburban, Electric Scooter

1. PENDAHULUAN

Transformasi digital saat ini memainkan peran penting dalam kemajuan berbagai sektor, termasuk pariwisata. Salah satu bentuk digitalisasi yang sedang

diterapkan di sektor ini adalah penggunaan Internet of Things (IoT) dalam penyewaan kendaraan, seperti skuter listrik. Penerapan teknologi ini tidak hanya memudahkan operasional penyewaan, tetapi juga

meningkatkan efisiensi dan keamanan layanan yang ditawarkan kepada wisatawan. Namun, tantangan utama dalam mengimplementasikan sistem berbasis IoT di daerah pariwisata, khususnya di wilayah suburban seperti Kintamani, terletak pada keterbatasan infrastruktur jaringan yang masih belum merata. Karakteristik geografis Kintamani, yang meliputi area berbukit, jalanan yang naik turun, serta kepadatan vegetasi, menambah kerumitan dalam proses transmisi data.

Dalam mengatasi tantangan tersebut, teknologi LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) menjadi solusi yang tepat. LoRaWAN dikenal sebagai sistem komunikasi nirkabel dengan konsumsi daya rendah dan biaya yang efisien, yang memungkinkan transmisi data jarak jauh tanpa memerlukan infrastruktur jaringan yang rumit. Teknologi ini sangat sesuai untuk wilayah suburban yang mengalami keterbatasan akses jaringan, seperti di Kintamani. Selain itu, LoRaWAN memiliki keunggulan dalam daya tahan baterai yang lama, memungkinkan perangkat IoT beroperasi lebih efisien dengan kebutuhan penggantian daya yang minimal. Kemampuannya untuk menjangkau area luas yang terisolasi menjadikan LoRaWAN sebagai pilihan terbaik untuk menghubungkan berbagai perangkat IoT di lingkungan dengan kondisi geografi yang memiliki kekurangan dalam infrastruktur jaringan.

Penelitian ini bertujuan untuk menilai kinerja dan efisiensi jaringan LoRaWAN dalam konteks penerapan IoT di wilayah suburban, dengan penekanan pada pengukuran parameter kinerja seperti delay dan kemampuan sistem dalam mendukung konektivitas maksimal perangkat yang terhubung. Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan masukan teknis mengenai optimasi sistem IoT di daerah wisata suburban dengan keterbatasan infrastruktur, serta membuka jalan untuk pengembangan lebih lanjut dalam implementasi IoT di sektor pariwisata.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) adalah sebuah konsep di mana berbagai perangkat fisik dapat saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet, memungkinkan mereka untuk mengumpulkan, berbagi, dan memproses data secara otomatis. Perangkat yang terhubung dalam sistem IoT dapat berupa sensor, alat rumah tangga pintar, kendaraan, hingga perangkat industri, yang semuanya berfungsi untuk menciptakan ekosistem yang lebih cerdas dan efisien. Dengan teknologi IoT, berbagai sektor seperti kesehatan, transportasi, energi, dan manufaktur mendapatkan manfaat dalam hal pengelolaan sumber daya, efisiensi operasional, serta peningkatan pengalaman pengguna [1].

Dengan kata lain, IoT menciptakan kesempatan bagi perangkat untuk berkolaborasi serta bertindak atas dasar informasi baru yang diperoleh.

2.2 LoRaWAN

LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) adalah sebuah protokol komunikasi nirkabel yang dirancang untuk jaringan perangkat IoT dengan kebutuhan transmisi data jarak jauh dan konsumsi daya yang rendah. LoRaWAN menggunakan teknologi LoRa (*Long Range*) untuk berkomunikasi melalui frekuensi radio, memungkinkan perangkat untuk terhubung ke jaringan dengan jangkauan yang sangat luas tanpa memerlukan infrastruktur jaringan yang kompleks. Hal ini membuat LoRaWAN sangat cocok untuk digunakan di daerah yang memiliki infrastruktur jaringan terbatas, seperti wilayah pedesaan atau suburban.

Di Eropa, LoRaWAN beroperasi pada rentang frekuensi 433/868 MHz, sementara di Amerika Serikat, frekuensi yang digunakan untuk teknologi ini berada pada kisaran 915 MHz. Perbedaan frekuensi ini disesuaikan dengan regulasi yang berlaku di masing-masing wilayah [2].

Dalam jaringan LoRa, jumlah channel sangat penting untuk menentukan kapasitas jaringan dan jumlah perangkat yang dapat berkomunikasi secara bersamaan. Jumlah channel dapat dihitung berdasarkan rentang frekuensi yang tersedia dan bandwidth per channel. Persamaan untuk menghitung jumlah channel dijelaskan pada persamaan 1.

$$\text{Jumlah Channel} = \frac{\text{Rentang Frekuensi}}{\text{Bandwidth Per Channel}} \quad (1)$$

Rentang frekuensi mewakili keseluruhan spektrum frekuensi yang dapat digunakan, sedangkan bandwidth per channel menentukan lebar pita yang dipakai oleh satu channel.

2.3 Data Rate

Data rate merupakan ukuran jumlah informasi yang dapat ditransmisikan melalui suatu jaringan atau media komunikasi dalam kurun waktu tertentu. Pada jaringan LoRa, variasi data rate sangat dipengaruhi oleh Spreading Factor (SF) yang digunakan. Meningkatnya spreading factor akan menyebabkan penurunan data rate, namun jangkauan sinyal akan meningkat. Parameter komunikasi, seperti data rate, dapat dihitung menggunakan persamaan [3]:

$$\text{Data Rate} = \frac{\text{Spreading Factor} \times \text{Bandwidth}}{2^{SF}} \quad (2)$$

Pada LoRa, bandwidth (BW) yang digunakan dapat bervariasi antara 125, 250, hingga 500 kHz, sementara spreading factor berkisar antara 7 hingga 12. Parameter-parameter ini dibagikan antara transmitter dan receiver untuk memungkinkan proses modulasi dan demodulasi [4].

2.4 Time on Air

Time on Air (ToA) adalah waktu yang diperlukan oleh sebuah sinyal untuk melakukan perjalanan dari pemancar ke penerima. Perhitungan ToA menjadi penting untuk memastikan bahwa batasan desain sistem terkait ToA serta sensitivitas

penerima dapat dikelola dengan baik. Dalam penelitian ini ToA dapat dihitung dengan persamaan 3.

$$\text{ToA} = \frac{\text{Ukuran Data dalam bit}}{\text{Data Rate (bps)}} \quad (3)$$

2.5 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems, sebuah perusahaan teknologi yang berbasis di Shanghai, China. Mikrokontroler ini menawarkan solusi jaringan WiFi terintegrasi, berfungsi sebagai jembatan yang memungkinkan perangkat mikrokontroler lainnya untuk terhubung ke jaringan WiFi secara mandiri. ESP32 dilengkapi dengan prosesor dual-core yang menggunakan arsitektur Xtensa LX16, yang memberikan performa komputasi yang kuat dan efisien untuk aplikasi IoT [5]. ESP32 dapat digunakan sebagai alternatif untuk rangkaian Arduino, dengan keunggulan mampu terhubung langsung ke jaringan WiFi tanpa memerlukan modul tambahan.

2.6 NEO6MV2 GPS Module

Salah satu perangkat yang sering digunakan untuk mendapatkan data lokasi dari sinyal satelit GPS adalah modul GPS NEO-6MV2. Modul ini berfungsi sebagai penerima GPS yang mampu menentukan posisi dengan cara menangkap dan memproses sinyal dari satelit navigasi. Selain kemampuan navigasi dasar, modul GPS NEO-6MV2 juga dapat diaplikasikan pada berbagai sistem seperti keamanan perangkat mobile, pengumpulan data untuk pemetaan, pelacakan lokasi, serta banyak kegunaan lainnya dalam berbagai bidang [6].

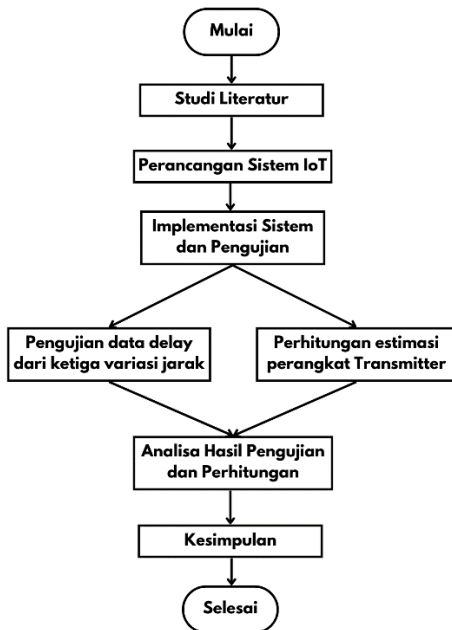
2.7 Delay

Delay atau latensi adalah waktu yang dibutuhkan untuk mentransmisikan data dari pengirim ke penerima. Dalam sistem komunikasi nirkabel seperti LoRaWAN, delay bergantung pada jarak antara pemancar dan penerima serta jumlah pemancar yang digunakan. Semakin jauh

jarak yang harus ditempuh sinyal, semakin besar delay yang terjadi. Multipath fading dapat memperpanjang delay dalam sistem OFDM, yang berkaitan dengan peningkatan jarak dalam komunikasi. Selain jarak, jumlah pemancar juga berpengaruh terhadap delay dalam sistem komunikasi nirkabel [7].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi kinerja jaringan LoRaWAN pada aplikasi Internet of Things (IoT) di area suburban, khususnya di wilayah Kintamani. Evaluasi ini melibatkan analisis parameter delay yang terjadi dalam kondisi lingkungan suburban serta menghitung estimasi jumlah perangkat transmitter maksimal yang dapat terhubung ke satu receiver pada frekuensi LoRa 433 MHz. Studi literatur menjadi langkah awal untuk memahami konsep IoT, jaringan LoRaWAN, dan cara kerja setiap modul yang terlibat. Pada tahap ini juga dilakukan perancangan skema kerja alat, yang bertujuan untuk mempermudah pemahaman alur keseluruhan perangkat. Tahapan dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.

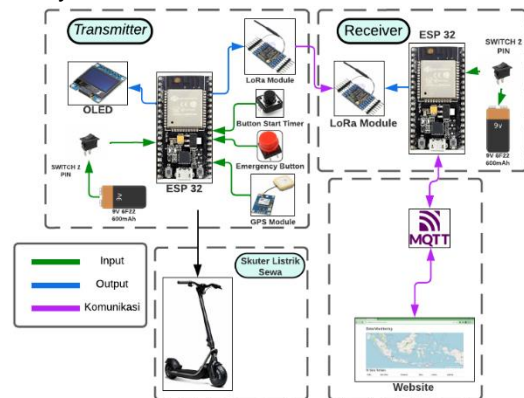


Gambar 1. Diagram Alir

Aplikasi IoT dalam penelitian ini berfokus pada sistem pengelolaan kontrol penyewaan skuter listrik, yang terdiri dari dua komponen utama, yaitu transmitter dan receiver. Transmitter pada jaringan LoRaWAN berperan penting dalam mengirimkan data yang diperlukan, dengan implementasinya ditempatkan pada skuter listrik. Sementara itu, receiver berfungsi sebagai gerbang ke jaringan LoRaWAN, yang mengirimkan data dari transmitter ke server jaringan, dan secara fisik diimplementasikan di lokasi penyewaan skuter listrik.

3.1 Perancangan Sistem IoT pada Aplikasi Penyewaan Skuter Listrik

Sistem IoT yang dirancang untuk penyewaan skuter listrik di lingkungan suburban menggunakan teknologi LoRaWAN sebagai jembatan komunikasi utama antara transmitter dan receiver. Konfigurasi perangkat keras terdiri dari transmitter dan receiver, yang masing-masing telah diintegrasikan dengan komponen elektronika yang sesuai. Transmitter bertugas mengirimkan data lokasi dan informasi keselamatan pengguna, sementara receiver berfungsi untuk menerima dan memproses informasi yang dikirimkan oleh transmitter. Setiap komponen dalam perangkat telah dikonfigurasi secara mendalam untuk memastikan kinerja sistem yang optimal. Gambar 2 adalah Mekanisme kerja keseluruhan sistem IoT pada Aplikasi Penyewaan Skuter Listrik.



Gambar 2. Mekanisme Kerja Keseluruhan

Selanjutnya, berikut adalah integrasi masing-masing komponen elektronika yang digunakan dalam perancangan kedua perangkat keras tersebut.

3.1.1 Transmitter

Transmitter adalah perangkat yang berada di ujung jaringan LoRaWAN yang bertugas mengumpulkan data dari berbagai sensor atau sumber, seperti sensor GPS dan tombol (*Button*). Proses perancangan transmitter melibatkan beberapa langkah, mulai dari mendefinisikan *library* yang diperlukan, menginisialisasi modul LoRa, hingga mengolah data yang diambil. Data tersebut mencakup informasi dari tombol, status baterai, *timer*, serta data GPS yang berisi lokasi dan kecepatan skuter listrik.

3.1.2 Receiver

Pada rangkaian perangkat *receiver*, ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler utama. Selain itu, modul LoRa beserta antenanya juga digunakan untuk berkomunikasi melalui frekuensi radio dengan perangkat *transmitter*. Data yang diterima dari transmitter akan diproses oleh perangkat receiver ini sebelum diteruskan ke web server.

3.2 Metode Evaluasi Kinerja Jaringan

Evaluasi ini dilakukan dengan memperhatikan waktu tunggu (*Delay*) pengiriman data berdasarkan jarak dan kondisi tertentu dari perangkat transmitter ke receiver. Waktu tunggu dihitung dengan menggunakan timestamp yang diambil dari setiap paket data yang dikirim dan diterima melalui serial monitor Arduino IDE. Data yang dikumpulkan mencakup posisi berupa longitude dan latitude, kecepatan, kondisi tombol darurat (*emergency button*), timer, serta waktu (*timestamp*). Semua informasi ini kemudian digunakan untuk menganalisis delay pengiriman data dari transmitter yang terpasang pada skuter listrik ke *receiver* yang berada di pusat penyewaan. Data yang diperoleh selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan

pengamatan, analisis, dan evaluasi kinerja sistem. Berikut adalah ketentuan penilaian untuk parameter uji delay.

Tabel 1. Kategori Delay

Sangat bagus, dengan besar <i>delay</i> kurang dari 150ms	
Bagus, dengan besar <i>delay</i> antara 150ms s/d 300ms	
Sedang, dengan besar <i>delay</i> antara 300ms s/d 450ms	
Jelek, dengan besar <i>delay</i> lebih dari 450ms	

Pengujian dilakukan dalam kondisi steady state menggunakan 4 kategori, yang membantu mengidentifikasi kekurangan purwarupa. Hasil pengujian diperoleh dengan menghitung rata-rata delay pada jarak 100 meter, 500 meter, dan 1 kilometer, dengan 50 data diambil pada setiap jarak.

3.3 Perhitungan Maksimal Transmitter

Perhitungan estimasi jumlah maksimal transmitter dalam cakupan satu *receiver* dilakukan dengan mempertimbangkan kapasitas frekuensi yang tersedia serta karakteristik lingkungan. Proses ini melibatkan analisis faktor-faktor seperti bandwidth, kekuatan sinyal, dan kapasitas jaringan LoRaWAN. Selain itu, rentang frekuensi, jumlah channel, data rate, dan waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan satu paket data melalui udara (*Time on Air*) juga diperhitungkan. Waktu transmisi ini dihitung berdasarkan *bandwidth* dan *spreading factor*. Dengan memperhitungkan semua faktor ini, kapasitas optimal jaringan dapat diidentifikasi untuk mendukung komunikasi IoT yang efisien.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan Sistem IoT pada Aplikasi Penyewaan Skuter Listrik

Setiap komponen pada perangkat telah dikonfigurasi secara cermat untuk menjamin kinerja sistem yang optimal. Berikut ini adalah foto prototipe yang telah dipasang pada skuter listrik.



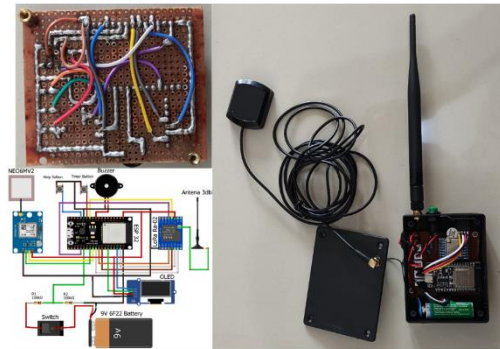
Gambar 3. Penempatan *Transmitter* pada Skuter

Dari gambar 3, terlihat bahwa *transmitter*, yang terdiri dari modul LoRa SX1278 Ra-02, GPS NEO6MV2, ESP32, dan beberapa komponen lain, dipasang dengan rapi dan minimalis di skuter listrik. Penempatan komponen tersebut dirancang agar tidak mengganggu kinerja skuter serta kenyamanan penyewa. Selanjutnya, berikut adalah hasil konfigurasi dan integrasi masing-masing komponen elektronika yang digunakan dalam perancangan perangkat *transmitter* dan *receiver* tersebut.

4.1.1 Perangkat *Transmitter*

Pada tahap konfigurasi transmitter, setiap komponen, seperti modul LoRa, GPS, dan tombol, dihubungkan dan diatur pin-nya ke ESP32 untuk menjamin fungsionalitas

yang optimal. Berikut adalah gambar rangkaian *transmitter* yang menunjukkan cara setiap komponen terhubung.

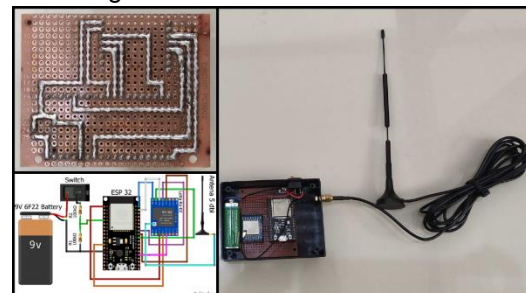


Gambar 4. Rangkaian Perangkat *Transmitter*

Rangkaian ini menampilkan hubungan antara GPS, tombol, OLED, modul LoRa, dan sumber daya dengan ESP32. Penempatan dan pengaturan pin yang tepat sangat penting untuk menjaga komunikasi yang stabil dan akurat antara setiap komponen. Ini mencakup pengelolaan sinyal dari sensor GPS untuk pelacakan posisi hingga tombol darurat (*emergency button*) yang terintegrasi dengan sistem.

4.1.2 Perangkat *Receiver*

Pada sisi *receiver*, modul LoRa digunakan untuk menerima data yang dikirim secara nirkabel dari transmitter. Setelah data diterima, perangkat Arduino memprosesnya sebelum mengirimkannya ke web server melalui koneksi WiFi. Jaringan WiFi memungkinkan perangkat terhubung ke internet, di mana data dikirimkan ke server menggunakan protokol MQTT. Protokol ini penting karena mendukung pengiriman data secara ringan dan efisien, terutama dalam komunikasi IoT. Gambar di bawah ini menunjukkan bagaimana komponen receiver dihubungkan satu sama lain.



Gambar 5. Rangkaian Perangkat *Receiver*
Keseluruhan rangkaian ini memperlihatkan bagaimana sistem komunikasi IoT dapat dioptimalkan melalui pemanfaatan teknologi LoRa dan WiFi, yang bersama-sama mendukung pengolahan dan transmisi data dengan efisien, serta menjaga stabilitas jaringan meski dalam kondisi lingkungan yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan.

4.2 Analisis Pengujian Delay

Pengujian delay dilakukan dengan mengirimkan data dari transmitter ke receiver pada tiga jarak berbeda: 100 meter, 500 meter, dan 1 kilometer yang setiap jaraknya diuji sebanyak 50 kali. Berikut adalah hasil pengukuran delay untuk jarak setiap jarak.

Tabel 2. Pengujian Delay Jarak 100 meter

No	Timestamp Transmitter	Timestamp Receiver	Delay (s)
1.	15:36:14,58	15:36:14,69	0,11
2.	15:36:16,75	15:36:16,88	0,13
3.	15:36:18,94	15:36:19,06	0,12
4.	15:36:21,13	15:36:21,24	0,11
5.	15:36:23,31	15:36:23,42	0,11
6.	15:36:25,51	15:36:25,63	0,12
7.	15:36:27,71	15:36:27,82	0,11
8.	15:36:29,88	15:36:30,01	0,13
9.	15:36:32,06	15:36:32,17	0,11
10.	15:36:34,23	15:36:34,35	0,12
11.	15:36:36,41	15:36:36,53	0,12
12.	15:36:38,58	15:36:38,69	0,11
13.	15:36:40,75	15:36:40,87	0,12
14.	15:36:42,92	15:36:43,03	0,11
15.	15:36:45,12	15:36:45,24	0,12
16.	15:36:47,29	15:36:47,40	0,11
17.	15:36:49,49	15:36:49,61	0,12
18.	15:36:51,67	15:36:51,80	0,13
19.	15:36:53,85	15:36:53,97	0,12
20.	15:36:56,02	15:36:56,15	0,13
21.	15:36:58,21	15:36:58,34	0,13
22.	15:37:00,39	15:37:00,51	0,12
23.	15:37:02,58	15:37:02,69	0,11
24.	15:37:04,74	15:37:04,87	0,13
25.	15:37:06,92	15:37:07,05	0,13
26.	15:37:09,08	15:37:09,20	0,12
27.	15:37:11,25	15:37:11,36	0,11
28.	15:37:13,45	15:37:13,56	0,11
29.	15:37:15,65	15:37:15,76	0,11
30.	15:37:17,82	15:37:17,94	0,12
31.	15:37:19,99	15:37:20,12	0,13
32.	15:37:22,16	15:37:22,29	0,13
33.	15:37:24,34	15:37:24,46	0,12
34.	15:37:26,50	15:37:26,63	0,13
35.	15:37:28,69	15:37:28,81	0,12
36.	15:37:30,87	15:37:30,99	0,12
37.	15:37:33,04	15:37:33,17	0,13
38.	15:37:35,20	15:37:35,32	0,12
39.	15:37:37,39	15:37:37,50	0,11
40.	15:37:39,56	15:37:39,69	0,13
41.	15:37:41,76	15:37:41,88	0,12
42.	15:37:43,94	15:37:44,05	0,11
43.	15:37:46,13	15:37:46,25	0,12
44.	15:37:48,31	15:37:48,43	0,12
45.	15:37:50,48	15:37:50,59	0,11
46.	15:37:52,65	15:37:52,78	0,13
47.	15:37:54,81	15:37:54,93	0,12
48.	15:37:56,99	15:37:57,12	0,13
49.	15:37:59,15	15:37:59,28	0,13
50.	15:38:01,32	15:38:01,43	0,11
Total Delay			5,99
Rata – rata			0,11980
Standar Deviasi Sampel			0,00795

Tabel 3. Pengujian Delay Jarak 500 meter

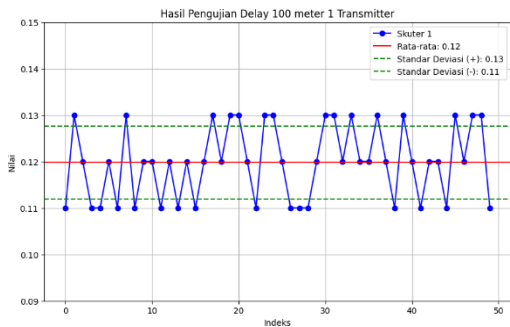
No.	Timestamp Transmitter	Timestamp Receiver	Delay (s)
1.	15:46:25.94	15:46:26.07	0,14
2.	15:46:28.13	15:46:28.27	0,15
3.	15:46:30.32	15:46:30.45	0,13
4.	15:46:32.48	15:46:32.62	0,14
5.	15:46:34.67	15:46:34.81	0,15
6.	15:46:36.84	15:46:36.99	0,15
7.	15:46:39.02	15:46:39.16	0,14
8.	15:46:41.18	15:46:41.32	0,14
9.	15:46:43.35	15:46:43.48	0,14
10.	15:46:45.52	15:46:45.67	0,16
11.	15:46:47.71	15:46:47.84	0,13
12.	15:46:49.88	15:46:50.01	0,14
13.	15:46:52.04	15:46:52.18	0,15
14.	15:46:54.23	15:46:54.37	0,14
15.	15:46:56.40	15:46:56.53	0,13
16.	15:46:58.59	15:46:58.72	0,13
17.	15:47:00.76	15:47:00.91	0,15
18.	15:47:02.92	15:47:03.06	0,14
19.	15:47:05.11	15:47:05.26	0,15
20.	15:47:07.28	15:47:07.43	0,15
21.	15:47:09.47	15:47:09.62	0,15
22.	15:47:11.64	15:47:11.77	0,13
23.	15:47:13.81	15:47:13.94	0,13
24.	15:47:15.97	15:47:16.11	0,14
25.	15:47:18.14	15:47:18.28	0,14
26.	15:47:20.31	15:47:20.44	0,14
27.	15:47:22.49	15:47:22.63	0,14
28.	15:47:24.68	15:47:24.81	0,14
29.	15:47:26.86	15:47:26.99	0,13
30.	15:47:29.02	15:47:29.16	0,14
31.	15:47:31.21	15:47:31.34	0,13
32.	15:47:33.39	15:47:33.54	0,15
33.	15:47:35.58	15:47:35.71	0,13
34.	15:47:37.75	15:47:37.88	0,13
35.	15:47:39.91	15:47:40.06	0,16
36.	15:47:42.08	15:47:42.21	0,14
37.	15:47:44.26	15:47:44.39	0,14
38.	15:47:46.43	15:47:46.57	0,15
39.	15:47:48.59	15:47:48.74	0,16
40.	15:47:50.78	15:47:50.92	0,14
41.	15:47:52.95	15:47:53.10	0,16
42.	15:47:55.13	15:47:55.27	0,15
43.	15:47:57.30	15:47:57.44	0,15
44.	15:47:59.46	15:47:59.59	0,14
45.	15:48:01.62	15:48:01.76	0,15
46.	15:48:03.80	15:48:03.95	0,15
47.	15:48:05.96	15:48:06.11	0,15
48.	15:48:08.12	15:48:08.25	0,13
49.	15:48:10.28	15:48:10.43	0,16
50.	15:48:12.44	15:48:12.58	0,14
Total Delay			7,14
Rata – rata			0,14280
Standar Deviasi Sampel			0,00928

Tabel 4. Pengujian Delay Jarak 1000 meter

No.	Timestamp Transmitter	Timestamp Receiver	Delay (s)
1.	15:57:42.59	15:57:42.77	0,18
2.	15:57:44.75	15:57:44.92	0,17
3.	15:57:46.95	15:57:47.13	0,18
4.	15:57:49.11	15:57:49.28	0,17
5.	15:57:51.28	15:57:51.48	0,21
6.	15:57:53.45	15:57:53.63	0,18
7.	15:57:55.62	15:57:55.79	0,17
8.	15:57:57.81	15:57:57.99	0,18
9.	15:58:00.00	15:58:00,19	0,19
10.	15:58:02.19	15:58:02.36	0,17
11.	15:58:04.38	15:58:04.57	0,19
12.	15:58:06.55	15:58:06.73	0,18
13.	15:58:08.71	15:58:08.92	0,21
14.	15:58:10.90	15:58:11.08	0,19
15.	15:58:13.09	15:58:13.29	0,21
16.	15:58:15.25	15:58:15.46	0,21
17.	15:58:17.44	15:58:17.61	0,17
18.	15:58:19.60	15:58:19.78	0,18
19.	15:58:21.79	15:58:21.99	0,20
20.	15:58:23.98	15:58:24.17	0,19
21.	15:58:26.15	15:58:26.36	0,21
22.	15:58:28.32	15:58:28.51	0,19
23.	15:58:30.49	15:58:30.66	0,17
24.	15:58:32.68	15:58:32.89	0,20
25.	15:58:34.88	15:58:35.07	0,19
26.	15:58:37.06	15:58:37.24	0,18
27.	15:58:39.24	15:58:39.43	0,19
28.	15:58:41.42	15:58:41.59	0,17
29.	15:58:43.59	15:58:43.78	0,19
30.	15:58:45.76	15:58:45.95	0,20
31.	15:58:47.94	15:58:48.15	0,21
32.	15:58:50.13	15:58:50.30	0,18
33.	15:58:52.31	15:58:52.50	0,18
34.	15:58:54.51	15:58:54.69	0,18
35.	15:58:56.67	15:58:56.85	0,18
36.	15:58:58.85	15:58:59.03	0,17
37.	15:59:01.05	15:59:01.22	0,17
38.	15:59:03.24	15:59:03.42	0,17
39.	15:59:05.43	15:59:05.63	0,20
40.	15:59:07.59	15:59:07.77	0,18
41.	15:59:09.78	15:59:09.98	0,20
42.	15:59:11.95	15:59:12.13	0,19
43.	15:59:14.14	15:59:14.34	0,20
44.	15:59:16.31	15:59:16.51	0,20
45.	15:59:18.50	15:59:18.69	0,19
46.	15:59:20.69	15:59:20.89	0,20
47.	15:59:22.85	15:59:23.04	0,18
48.	15:59:25.02	15:59:25.22	0,20
49.	15:59:27.18	15:59:27.36	0,18
50.	15:59:29.35	15:59:29.55	0,20
Total Delay			9,38
Rata – rata			0,18760
Standar Deviasi Sampel			0,01318

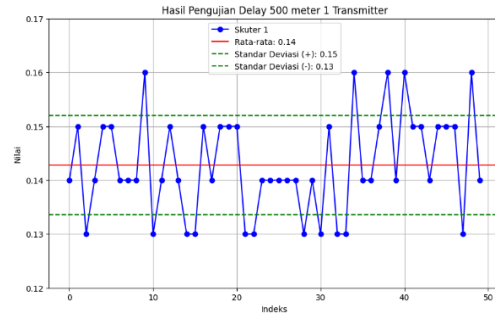
Berdasarkan hasil pengujian, delay dalam transmisi data pada jaringan LoRaWAN meningkat seiring bertambahnya jarak antara transmitter dan receiver. Pada jarak 100 meter, rata-rata delay tercatat sebesar 0,1198 detik dengan standar deviasi yang rendah, menunjukkan stabilitas yang baik dalam pengiriman data. Ketika jarak diperpanjang hingga 500 meter dan 1000 meter, rata-rata delay meningkat menjadi 0,1428 detik dan 0,1876 detik, dengan standar deviasi yang juga meningkat. Peningkatan delay ini disebabkan oleh faktor jarak yang memperpanjang waktu tempuh sinyal, serta kondisi lingkungan seperti interferensi sinyal dan multipath fading di wilayah Kintamani yang berbukit. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun LoRaWAN mampu berfungsi dengan baik di jarak menengah hingga jauh, performa jaringan tetap dipengaruhi oleh kondisi geografis dan lingkungan sekitarnya.

Analisis ini juga mengacu pada Tabel 1 Kategori Delay. Berikut merupakan data hasil pengujian yang divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan pengamatan dan analisis lebih lanjut.



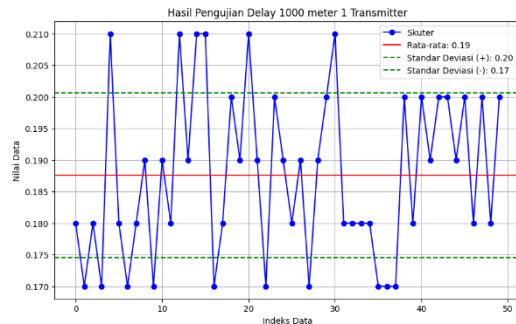
Gambar 6. Hasil Pengujian Delay Jarak 100 meter

Pada pengujian jarak 100 meter, delay rata-rata yang dihasilkan adalah 0,1198 detik dengan standar deviasi 0,00795 detik. Ini masuk dalam kategori "Sangat Bagus" sesuai dengan Tabel 1, menunjukkan bahwa delay kurang dari 150 ms/milidetik.



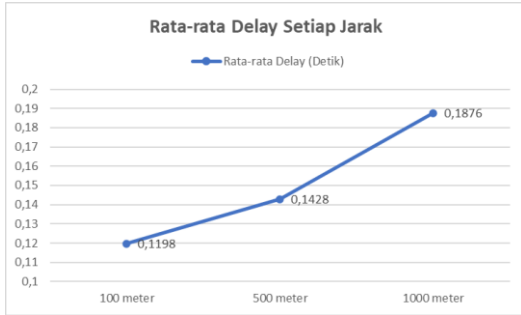
Gambar 7. Hasil Pengujian Delay Jarak 500 meter

Pada pengujian jarak 500 meter, delay rata-rata dengan satu transmitter adalah 0,1428 detik dengan standar deviasi 0,00928 detik. Delay ini juga masih dalam kategori "Sangat Bagus".



Gambar 8. Hasil Pengujian Delay Jarak 1000 meter

Dalam pengujian pada jarak 1000 meter, rata-rata delay yang didapat adalah 0,18760 detik dengan standar deviasi 0,01318 detik, yang tergolong dalam kategori "Bagus". Hasil ini menunjukkan bahwa sistem masih dapat diandalkan untuk komunikasi jarak jauh. Meskipun demikian, optimasi mungkin diperlukan jika sistem diterapkan pada aplikasi yang membutuhkan latensi sangat rendah, terutama pada jarak yang lebih jauh, agar kinerja tetap optimal dan responsif.



Gambar 9. Rata-rata Delay Pada Setiap Jarak

Gambar 9 menunjukkan grafik hasil pengujian delay yang meningkat seiring bertambahnya jarak. Grafik ini mengilustrasikan bahwa semakin jauh jarak antara transmitter dan receiver, semakin besar delay yang terjadi. Temuan ini konsisten dengan kajian yang dijelaskan pada referensi [7], yang juga menunjukkan bahwa peningkatan jarak dalam sistem komunikasi berbanding lurus dengan bertambahnya delay. Fenomena ini terjadi karena sinyal memerlukan waktu lebih lama untuk menjangkau receiver di lokasi yang lebih jauh, sehingga menyebabkan penundaan yang lebih besar dalam transmisi data.

4.3 Perhitungan Estimasi Perangkat Transmitter

Perancangan sistem IoT pada penyewaan skuter listrik, perlu dilakukan perhitungan untuk menentukan jumlah channel yang tersedia serta jumlah maksimum transmitter yang dapat beroperasi tanpa terjadi *collision* atau tabrakan data sehingga memberikan gambaran bagi penyedia sewa skuter listrik dalam mengestimasi perangkat transmitter yang bisa digunakan pada 1 channel.

4.3.1 Perhitungan Jumlah Channel LoRa

Dalam sistem LoRa, jumlah *channel* dihitung berdasarkan rentang frekuensi yang tersedia dan bandwidth yang digunakan per channel. Berdasarkan data penelitian, rentang frekuensi yang digunakan adalah dari 410 MHz hingga 525 MHz, memberikan total rentang frekuensi sebesar 115 MHz.

Sebuah LoRa beroperasi pada bandwidth 500 kHz, 250 kHz atau 125 kHz [8]. Pada penelitian ini menggunakan bandwidth standar di 125 kHz per channel, sehingga jumlah channel yang bisa digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan 1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Channel} &= \frac{115 \text{ MHz}}{125 \text{ KHz}} = \frac{115.000 \text{ KHz}}{125 \text{ KHz}} \\ &= 920 \text{ Channel} \end{aligned}$$

Sehingga, sistem LoRa pada frekuensi ini dapat mendukung hingga 920 channel. Setiap channel dapat digunakan oleh beberapa perangkat tergantung pada pengaturan *spreading factor* (SF) dan *bandwidth* (BW) yang digunakan.

4.3.2 Perhitungan Data Rate LoRa

Data rate pada LoRa dipengaruhi oleh *spreading factor* dan *bandwidth*. Pada penelitian ini menggunakan SF 7 dan BW 125 kHz, perhitungan *data rate* berdasarkan persamaan 2 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Data Rate} &= \frac{7 \times 125.000}{2^7} = \frac{875.000}{128} \\ &= 6.835.9375 \text{ bps} \end{aligned}$$

Sehingga data rate yang dihasilkan untuk SF 7 dan BW 125 kHz adalah sekitar 6,835.9375 bps atau sekitar 6.84 kbps

4.3.3 Perhitungan Time on Air (ToA) dan Jumlah Transmitter Maksimal

Dengan menggunakan konsep *Time on Air* (ToA), yang menghitung waktu transmisi sebuah paket data, jumlah maksimum *transmitter* yang dapat beroperasi pada satu *receiver* dapat dihitung sebagai berikut:

Perhitungan *Time on Air*

Dengan ukuran data yang dikirim adalah 90 byte atau 720 bit dan data rate 6.84 kbps, ToA dihitung menggunakan persamaan 3 sebagai berikut:

$$\text{ToA} = \frac{720}{6840} = 0.1053s$$

Dengan asumsi satu siklus waktu adalah 0,3 detik, jumlah maksimal transmitter yang dapat mengirimkan data tanpa collision adalah:

$$Tr \text{ Maximum} = \frac{0,3s}{0,1053s} = 3,13$$

Dengan demikian, dalam satu siklus waktu 0,3 detik, dapat didukung hingga 3 transmitter.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, evaluasi terhadap kinerja dan efisiensi jaringan LoRaWAN pada aplikasi IoT di lingkungan suburban dapat disimpulkan seperti berikut:

1. Kinerja jaringan LoRaWAN dalam hal delay menunjukkan bahwa jarak antara *transmitter* dan *receiver* secara signifikan memengaruhi waktu pengiriman data, dengan peningkatan delay yang konsisten seiring bertambahnya jarak, dari pengujian di jarak 100 meter hingga 1000 meter. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi geografis suburban seperti Kintamani, yang memiliki hambatan alam seperti bukit dan pepohonan, turut berperan dalam memperpanjang waktu tunda transmisi data. Namun, hasil dari analisa delay masih tetap dalam kategori "Bagus" sesuai dengan tabel kategori delay.
2. Perhitungan estimasi jumlah *transmitter* yang dapat didukung oleh satu *receiver* menunjukkan bahwa pada *spreading factor* (SF) 7 dengan bandwidth 125 kHz dan frekuensi 433 MHz, satu receiver hanya mampu menangani sekitar 3 *transmitter* per channel tanpa *collision*.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arafat, M. K. (2016). SISTEM PENGAMANAN PINTU RUMAH BERBASIS Internet Of Things (IoT) Dengan ESP8266. Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik "Technologia," 7(4), 262–268.
- [2] Andrei, M. L., Radoi, L. A., & Tudose, D. S.(2017). Measurement of node mobility for the lora protocol. 2017 16th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet). <https://doi.org/10.1109/roedunet.2017.8123763>
- [3] Devalal, S., & Karthikeyan, A. (2018). LoRa Technology - An Overview. 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). doi:10.1109/iceca.2018.8474715
- [4] Turcinovic, F., Vukovic, J., Bozo, S., & Sisul, G. (2020). Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication. 2020 International Symposium ELMAR. doi:10.1109/elmar49956.2020.9219028
- [5] Maulida, H., Syifa, F., dan Afandi, M. (2022). Analisis dan Perancangan Prototipe untuk Memonitoring Lahan Perkebunan Teh Menggunakan LoRa. Journal of Telecommunication, Electronics, and Control Engineering (JTECE), 4(2), hal. 117-127. <https://doi.org/10.20895/jtece.v4i2.538>
- [6] Simbolon, R., Saragih, Y., Sirait, P., dan Waluyo, P. (2022). Perancangan dan Penerapan Sistem Deteksi dan Pelaporan Kecelakaan Berbasis SMS. Jurnal Teknovasi, 9(2), hal. 67-76. <https://doi.org/10.55445/jt.v9i02.45>
- [7] Firdaus, M., dan Moegiharto, Y. (2022). Performance of OFDM system against different cyclic prefix lengths on multipath fading channels. arXiv.
- [8] M. Bor and U. Roedig, "LoRa transmission parameter selection," Proc. - 2017 13th Int. Conf. Distrib. Comput. Sens. Syst. DCOSS 2017, vol. 2018-Janua, pp. 27–34, 2018.