

Rancang Bangun Repeater LoRa Berbasis Ebyte E220-400T22D untuk Memperluas Jangkauan Komunikasi

Chandrasena Setiadi*¹, Isa Mahfudi²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, 65141, Indonesia

*Corresponding Author: chandrasenasetiadi@polinema.ac.id

Riwayat Artikel

Diserahkan: 27 Oktober 2025

Direvisi: 17 November 2025

Diterima: 27 November 2025

Dipublikasi: 30 November 2025

Abstrak

Keterbatasan jaringan seluler di daerah terpencil seperti jalur pendakian dan wilayah pegunungan menuntut adanya sistem komunikasi alternatif yang andal, berdaya rendah, dan mudah diterapkan. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan Repeater LoRa berbasis modul Ebyte E220-400T22D untuk memperluas jangkauan komunikasi data pada kondisi *Line-of-Sight* (LOS) dan *Non-Line-of-Sight* (NLOS). Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang mengendalikan dua modul LoRa melalui mekanisme *store-and-forward*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi LOS, jangkauan komunikasi meningkat dari 400 meter menjadi 800 meter, sedangkan pada kondisi NLOS meningkat dari 100 meter menjadi 200 meter dengan nilai RSSI berkisar antara -93 hingga -97 dBm. Pengujian *delay* menunjukkan peningkatan waktu tunda dari 2,019 detik menjadi 4,033 detik akibat proses penerusan data. Keseluruhan hasil membuktikan bahwa sistem repeater ini efektif dalam memperluas jangkauan komunikasi tanpa mengorbankan stabilitas dan efisiensi transmisi, sehingga potensial diterapkan pada aplikasi komunikasi jarak jauh di wilayah yang minim infrastruktur telekomunikasi.

Kata kunci: Delay, Ebyte E220-400T22D, *Line-of-Sight*, LoRa, Repeater.

Abstract

The limitations of cellular networks in remote areas such as mountain trails and highland regions demand a reliable, low-power, and easily deployable alternative communication system. This study designs and implements a LoRa Repeater based on the Ebyte E220-400T22D module to extend data communication range under both Line-of-Sight (LOS) and Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions. The system is built using an ESP32 microcontroller that controls two LoRa modules through a store-and-forward mechanism. Experimental results show that under LOS conditions, the communication range increased from 400 meters to 800 meters, while under NLOS conditions it improved from 100 meters to 200 meters, with RSSI values ranging between -93 and -97 dBm. The delay test indicated an increase from 2.019 seconds to 4.033 seconds due to the forwarding process. Overall, the results demonstrate that the proposed repeater system effectively extends the communication range without compromising signal stability and transmission efficiency, making it a potential solution for long-range communication applications in areas with limited telecommunication infrastructure.

Keywords: Delay, Ebyte E220-400T22D, *Line-of-Sight*, LoRa, Repeater.

1. Pendahuluan

Aktivitas rekreasi luar ruang dan operasi keselamatan di area terpencil, seperti jalur pendakian dan wilayah pegunungan, menuntut

sistem komunikasi yang andal meskipun berada di luar jangkauan jaringan seluler[1][2]. Di kawasan dengan infrastruktur telekomunikasi terbatas, perangkat berbasis seluler sering kali

gagal menjaga konektivitas, terutama pada skenario *non-line-of-sight* (NLOS) akibat kontur medan yang berbukit dan vegetasi lebat [3][4][5]. Kondisi geografis Indonesia yang didominasi pegunungan dan hutan tropis memperbesar tantangan tersebut, khususnya bagi petugas SAR, pendaki, maupun pengelola kawasan konservasi yang membutuhkan komunikasi berkelanjutan dalam situasi darurat. Hal ini menimbulkan kebutuhan akan solusi nirkabel jarak jauh yang berdaya rendah, mudah diimplementasikan, dan dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan operator.

Teknologi LoRa (*Long Range*) merupakan salah satu alternatif komunikasi jarak jauh yang semakin banyak diadopsi dalam sistem *Internet of Things* (IoT) [6][7][8] karena kemampuannya dalam mentransmisikan data pada jarak beberapa kilometer dengan konsumsi daya yang sangat rendah [9][10][11][12][13][14]. LoRa beroperasi pada pita frekuensi sub-GHz (termasuk 433 MHz dan 868 MHz) [15], yang memiliki kemampuan penetrasi lebih baik terhadap hambatan fisik dibandingkan frekuensi tinggi [16]. Sifat *chirp spread spectrum* (CSS) yang dimiliki LoRa juga memberikan ketahanan terhadap interferensi dan peningkatan sensitivitas penerimaan hingga -137 dBm, sehingga memungkinkan komunikasi tetap berlangsung meskipun pada kondisi *non-line-of-sight* (NLOS) [2][15][17].

Dengan karakteristik tersebut, LoRa telah banyak diterapkan pada berbagai sistem, seperti *remote telemetry* [18], pelacakan posisi [2], *environmental monitoring* [19], serta jaringan komunikasi darurat di daerah tanpa infrastruktur seluler [20]. Berbagai studi menunjukkan bahwa LoRa mampu menjaga konektivitas pada jarak 300 – 800 m di area perkotaan dan dapat mencapai lebih dari 1 km di area terbuka [21][22]. Namun demikian, performa LoRa sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi, densitas vegetasi, dan refleksi permukaan tanah

yang menyebabkan *path loss* meningkat secara signifikan [23][24][25].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengusulkan mekanisme *multi-hop* dan *relay node* untuk memperluas jangkauan komunikasi LoRa di lingkungan dengan kondisi topografi yang kompleks [24][26][27]. Pendekatan ini terbukti dapat meningkatkan reliabilitas komunikasi. Leenders dkk. (2023), misalnya, mengusulkan protokol energy-efficient relay node yang mampu memperluas jangkauan hingga 45 % dibandingkan single-hop konvensional [26]. Sementara itu, Shida dkk. (2024) menunjukkan bahwa penerapan komunikasi multi-hop pada LoRaWAN memang dapat memperluas cakupan transmisi, tetapi menimbulkan tantangan seperti penurunan throughput, masalah sinkronisasi, dan peningkatan konsumsi daya. Mereka kemudian mengusulkan metode alokasi sumber daya dan kompensasi sinkronisasi yang dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 50 % dibandingkan sistem konvensional [27]. Penelitian Alhomyani dkk. (2024) juga memodelkan kinerja jaringan sensor linear berbasis multi-hop LoRaWAN untuk sistem pemantauan pipa minyak di Arab Saudi, dan hasilnya menunjukkan peningkatan throughput hingga 38 % serta efisiensi energi hingga 59 % melalui konfigurasi hop optimal. Namun, peningkatan jumlah hop juga menimbulkan trade-off berupa kenaikan trafik data dan potensi kongesti jaringan [24].

Meskipun pendekatan multi-hop terbukti efektif dalam memperluas jangkauan komunikasi, tantangan dari sisi efisiensi energi, latensi, serta kompleksitas implementasi membuatnya kurang ideal untuk digunakan di medan dengan akses terbatas. Oleh karena itu, pembangunan sistem repeater berbasis modul Ebyte E220-400T22D menjadi alternatif yang lebih sederhana, efisien, dan adaptif terhadap kondisi NLOS serta kontur geografis berbukit. Repeater ini dirancang untuk memperluas jangkauan komunikasi secara langsung tanpa membentuk jaringan mesh yang

kompleks, sekaligus menjaga stabilitas sinyal dan efisiensi daya di lingkungan yang sulit dijangkau.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian tentang perluasan jangkauan komunikasi LoRa sebagian besar masih berfokus pada optimalisasi topologi dan protokol jaringan, sementara pengembangan solusi perangkat keras yang sederhana dan siap diterapkan di lapangan masih terbatas. Celah penelitian (research gap) ini menjadi dasar bagi penelitian ini, yakni perlunya inovasi perangkat repeater LoRa [28] yang mampu memperluas

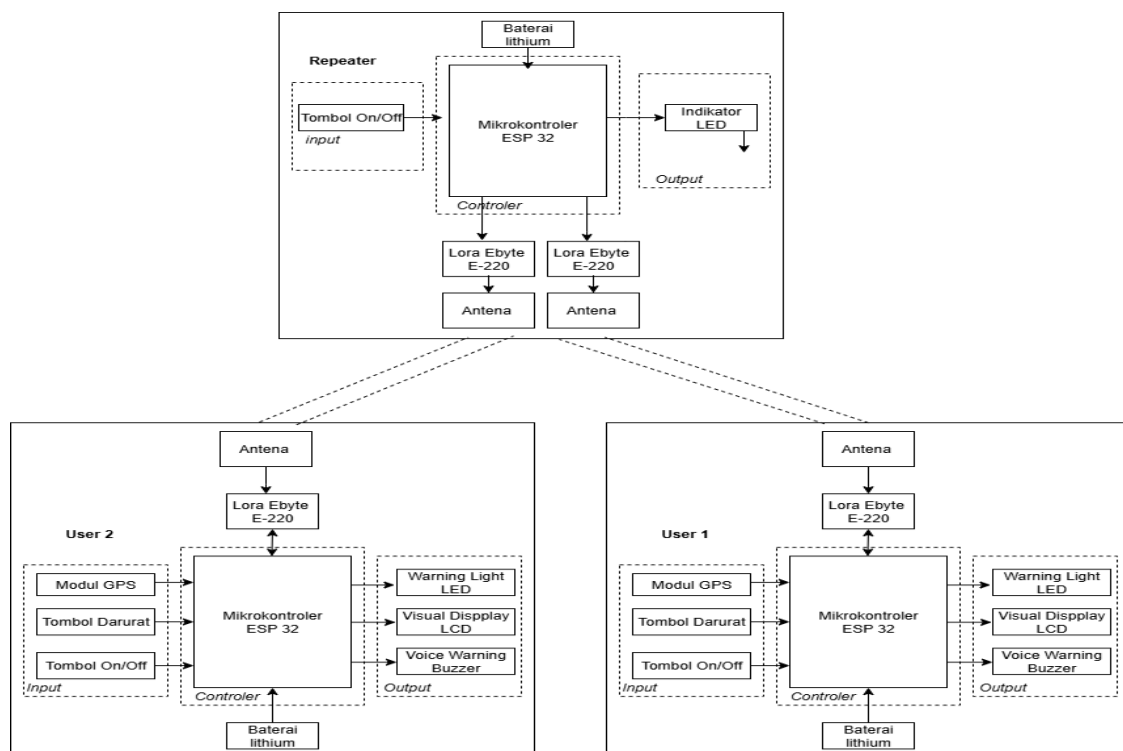
jangkauan secara langsung dengan efisiensi daya tinggi dan kemudahan operasional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem Repeater LoRa berbasis modul Ebyte E220-400T22D dengan transceiver Semtech LLCC68, yang berfungsi memperkuat dan meneruskan sinyal komunikasi pada area berbukit dan kondisi NLOS. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat meningkatkan jangkauan transmisi, menjaga kestabilan sinyal, serta menjadi solusi efektif dan praktis untuk mendukung komunikasi data di wilayah terpencil yang minim infrastruktur telekomunikasi.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen rekayasa (experimental engineering research), yang bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji kinerja sistem Repeater LoRa berbasis modul Ebyte E220-400T22D. Pendekatan ini menekankan pada proses perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian performa untuk menilai efektivitas sistem dalam memperluas jangkauan komunikasi nirkabel.

2.1. Desain dan Blok Diagram Sistem

Sistem Repeater LoRa dirancang untuk memperluas jangkauan komunikasi antara dua node pengguna dengan cara menerima paket data dari node pengirim (RX) dan meneruskannya kembali ke node penerima (TX) secara otomatis. Repeater ini bekerja tanpa memerlukan konfigurasi jaringan kompleks, melainkan hanya dengan mekanisme *store-and-forward* sederhana menggunakan dua modul transceiver LoRa. Gambar 1. Menunjukkan diagram blok sistem



Gambar 1. Blok diagram sistem repeater LoRa berbasis Ebyte E220-400T22D

Berdasarkan Gambar 1, sistem repeater terdiri atas tiga bagian utama:

- a. Repeater Node, berfungsi sebagai penguat sinyal yang terdiri atas dua modul LoRa E220-400T22D untuk kanal penerimaan dan transmisi, mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali logika penerusan data, catu daya berbasis baterai lithium, serta indikator LED sebagai status operasi sistem.
- b. User Node 1 dan User Node 2, masing-masing menggunakan ESP32 dan satu modul LoRa E220-400T22D sebagai transceiver. Node ini dilengkapi modul GPS untuk pelacakan lokasi, tombol darurat sebagai input pengguna, serta warning light LED, LCD *display*, dan *buzzer* sebagai keluaran visual dan audio.
- c. Antena omnidirectional, digunakan pada setiap node untuk memperluas area cakupan komunikasi dan meningkatkan kestabilan sinyal pada kondisi NLOS.

2.2. Perancangan Sistem

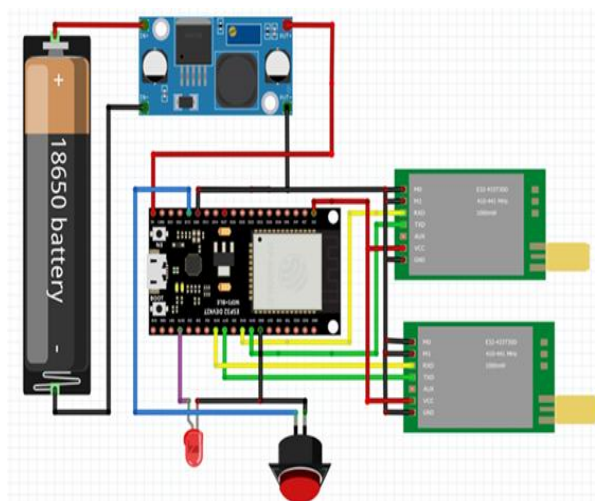
Repeater LoRa yang dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama yang mengatur proses penerimaan dan pengiriman ulang data antar dua modul Ebyte E220-400T22D. Kedua modul LoRa dihubungkan melalui antarmuka UART ke ESP32, masing-masing berfungsi sebagai kanal penerima (RX module) dan kanal pemancar (TX module). Koneksi pin ESP32 dengan Lora Ebyte E220-400T22D ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. koneksi PIN ESP32 dengan Pin LoRa Ebyte E220-400T22D

No	Pin ESP32	Pin LoRa	Keterangan
1	GND	GND LoRa	Ground LoRa
2	VIN	VCC LoRa	Catu daya 5V LoRa
3	GPIO17 (TX2)	RX LoRa (Modul 1)	Transmisi data Modul LoRa 1

No	Pin ESP32	Pin LoRa	Keterangan
4	GPIO16 (RX2)	TX LoRa (Modul 1)	Penerimaan data dari Modul LoRa 1
5	GPIO18	RX LoRa (Modul 2)	Transmisi data Modul LoRa 2
6	GPIO19	TX LoRa (Modul 2)	Penerimaan data dari Modul LoRa 2
7	GPIO13	Data Button	Input tombol on/off
8	GND	GND Button	Ground tombol
9	GPIO15	Data LED	Output indikator status
10	GND	GND LED	Ground LED

Sumber daya sistem berasal dari baterai 18650 yang distabilkan menggunakan DC-DC step-up converter untuk memberikan tegangan sesuai kebutuhan ESP32 dan modul LoRa. Selain itu, sistem dilengkapi dengan tombol on/off sebagai input untuk mengaktifkan perangkat dan LED indikator sebagai penanda status operasi. Rangkaian lengkap sistem repeater ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema rangkai dari sistem repeater LoRa berbasis LoRa Ebyte E220-400T22D

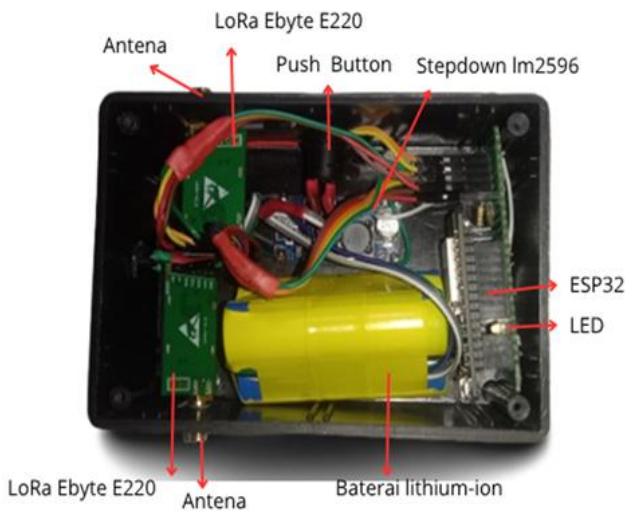
3. Hasil dan Pembahasan

Setelah tahap perancangan dan perakitan selesai, sistem repeater LoRa berbasis modul Ebyte E220-400T22D berhasil direalisasikan dalam bentuk prototipe seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil implementasi Repeater LoRa LoRa Ebyte E220-400T22D

Selain bentuk fisik luar perangkat repeater yang ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4 memperlihatkan struktur komponen pada sistem Repeater LoRa yang telah berhasil dirakit. Rangkaian utama ditempatkan di dalam *enclosure* berbahan plastik ABS untuk melindungi komponen dari kelembaban dan getaran selama pengujian lapangan.



Gambar 4. Komponen penyusun Repeater LoRa.

Pengujian pada sistem repeater, dilakukan dalam dua skenario utama, yaitu tanpa repeater

Rancang Bangun Repeater LoRa Berbasis LoRa... sebagai kondisi pembanding, dan dengan repeater sebagai sistem usulan. Pengujian dilakukan di dua lokasi berbeda: area terbuka (Lapangan Rampal, Malang) yang merepresentasikan kondisi LOS, serta area berbukit dengan vegetasi padat (Gunung Pucung, Batu) yang mewakili kondisi NLOS. Pada kedua lokasi tersebut, setiap pengujian dilakukan dengan variasi jarak tertentu untuk mengamati perubahan nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) terhadap jarak transmisi.

3.1. Hasil Pengujian LOS Tanpa dan Dengan Repeater

Pengujian pada kondisi LOS dilakukan untuk mengevaluasi kinerja komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D dalam mentransmisikan data pada medan terbuka tanpa penghalang fisik. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk menganalisis perubahan RSSI terhadap jarak serta menilai pengaruh penambahan repeater terhadap perluasan jangkauan komunikasi. Uji coba dilakukan dalam dua skenario, yaitu tanpa repeater sebagai kondisi pembanding (baseline) dan dengan repeater sebagai sistem penguat jangkauan. Pengukuran dilakukan secara bertahap dari 5 hingga 400 meter tanpa repeater, dan hingga 800 meter dengan repeater, menggunakan parameter modul LoRa yang sama pada frekuensi 400 MHz, *spreading factor* 12, *bandwidth* 125 kHz, dan daya pancar 22 dBm. Parameter yang diamati meliputi RSSI (dBm) dan status komunikasi (berhasil/gagal) untuk menilai kekuatan dan kestabilan sinyal. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Line-of-Sight* (LOS) Sistem LoRa Tanpa dan Dengan Repeater

No	Kondisi	Segmen	Jarak (m)	Status	RSSI (dBm)	Keterangan
1	Tanpa Repeater	User 1 – User 2	5	Berhasil	-11	Komunikasi sangat stabil
2			10	Berhasil	-16	Komunikasi sangat stabil
3			15	Berhasil	-24	Komunikasi sangat stabil
4			50	Berhasil	-32	Komunikasi sangat stabil
5			100	Berhasil	-45	Komunikasi sangat stabil
6			200	Berhasil	-70	Komunikasi sangat stabil

No	Kondisi	Segmen	Jarak (m)	Status	RSSI (dBm)	Keterangan
7			300	Berhasil	-95	Komunikasi mulai melemah
8			400	Berhasil	-102	Batas jangkauan kestabilan komunikasi
Rata-rata RSSI			—	—	-49.4	Jarak maksimum 400 m
9	Dengan	User 1 – Repeater	400	Berhasil	-94	—
10	Repeater	Repeater – User 2	400	Berhasil	-97	—
Total Jarak Efektif			800			Komunikasi stabil hingga 800 m

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 1, sistem komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D menunjukkan performa transmisi yang stabil pada kondisi LOS hingga jarak 400 meter tanpa menggunakan repeater. Nilai RSSI mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak, dari -11 dBm pada jarak 5 meter menjadi -102 dBm pada 400 meter. Penurunan ini menunjukkan adanya redaman propagasi sinyal yang meningkat secara logaritmik terhadap jarak, sesuai dengan model rugi lintasan (*path loss model*) yang umum terjadi pada komunikasi nirkabel frekuensi sub-GHz.

Setelah sistem repeater diaktifkan, jangkauan komunikasi meningkat secara signifikan menjadi 800 meter, atau dua kali lipat dibandingkan sistem tanpa repeater. Nilai RSSI pada masing-masing segmen, yaitu -94 dBm untuk jarak 400 meter pertama (User 1–

Repeater) dan -97 dBm untuk segmen berikutnya (Repeater–User 2), masih berada di atas ambang sensitivitas penerima LoRa, sehingga komunikasi tetap dapat dipertahankan dengan baik.

3.2. Hasil Pengujian NLOS

Pengujian pada kondisi NLOS dilakukan untuk mengetahui performa komunikasi LoRa ketika sinyal radio mengalami hambatan fisik seperti vegetasi dan kontur tanah berbukit. Uji coba dilakukan di kawasan Gunung Pucung, Batu, dengan jarak pengujian bertahap antara node pengirim dan penerima. Pengujian dibagi menjadi dua skenario, yaitu tanpa repeater sebagai pembandingan dasar dan dengan repeater sebagai sistem usulan. Parameter utama yang diamati meliputi RSSI dan status komunikasi (berhasil/gagal) untuk setiap jarak pengukuran. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Non-Line-of-Sight* (NLOS) Sistem LoRa Tanpa dan Dengan Repeater

No	Kondisi	Segmen	Jarak (m)	Status	RSSI (dBm)	Keterangan
1			5	Berhasil	-25	Komunikasi stabil
2			10	Berhasil	-30	Komunikasi stabil
3			15	Berhasil	-36	Komunikasi stabil
4	Tanpa Repeater	User 1 – User 2	50	Berhasil	-85	Mulai terpengaruh hambatan vegetasi
5			100	Berhasil	-95	Kualitas sinyal menurun
6			200	Tidak Berhasil	-	Tidak bisa berkomunikasi
7			300	Tidak Berhasil	-	Tidak bisa berkomunikasi
8			400	Tidak Berhasil	-	Tidak bisa berkomunikasi
Rata-rata RSSI			—	—	-54.2	Komunikasi terputus > 100 m
9	Dengan	User 1 – Repeater	100	Berhasil	-93	Sinyal stabil
10	Repeater	Repeater – User 2	100	Berhasil	-97	Sinyal stabil
Total Jarak Efektif			200	—	—	Komunikasi stabil hingga 200 m

Hasil pengujian pada kondisi NLOS yang disajikan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa sistem komunikasi LoRa berbasis Ebyte E220-400T22D mengalami degradasi sinyal yang signifikan akibat hambatan fisik di lintasan transmisi. Pada kondisi tanpa repeater, komunikasi hanya dapat dipertahankan hingga jarak 100 meter dengan nilai RSSI -95 dBm, dan gagal berfungsi pada jarak di atas 200 meter. Fenomena ini disebabkan oleh redaman tinggi (*attenuation*) serta efek hamburan dan pantulan (*multipath fading*) yang umum terjadi di area dengan vegetasi lebat dan kontur berbukit.

Setelah penambahan repeater, jangkauan komunikasi meningkat dua kali lipat menjadi 200 meter total (dua segmen @100 meter) dengan nilai RSSI -93 dBm hingga -97 dBm,

yang masih berada di atas ambang sensitivitas penerima LoRa. Hal ini menunjukkan bahwa repeater berfungsi efektif sebagai penguat jangkauan tanpa menurunkan kualitas sinyal secara signifikan.

3.3. Hasil Pengujian *Delay* Komunikasi LoRa Tanpa dan Dengan Repeater pada LOS

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur dan membandingkan waktu tunda transmisi (*delay*) pada sistem komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D, baik tanpa repeater maupun dengan repeater pada kondisi LOS. *Delay* dihitung dari selisih waktu antara pengiriman dan penerimaan data, yang dipengaruhi oleh parameter jarak. Hasil rata-rata *delay* dari beberapa kali pengujian pada kedua kondisi tersebut disajikan pada Tabel 3

Tabel 3. Hasil Pengujian *Delay* Komunikasi LoRa Tanpa dan Dengan Repeater pada LOS

No	Kondisi	Waktu Kirim	Waktu Terima	Delay (s)	Keterangan
1	Tanpa Repeater	21:17:07.949	21:17:09.965	2.016	Komunikasi stabil
2		21:17:20.071	21:17:22.083	2.012	Komunikasi stabil
3		21:17:24.082	21:17:26.051	2.028	Komunikasi stabil
4		21:17:36.793	21:17:38.821	2.028	Komunikasi stabil
5		21:17:40.810	21:17:42.822	2.012	Komunikasi stabil
Rata-rata Delay (tanpa repeater)				2.019 s	
6	Dengan Repeater	21:18:02.100	21:18:06.150	4.050	Delay meningkat karena proses <i>forwarding</i>
7		21:18:10.080	21:18:14.122	4.042	Delay meningkat karena proses <i>forwarding</i>
8		21:18:18.200	21:18:22.230	4.030	Delay meningkat karena proses <i>forwarding</i>
9		21:18:30.180	21:18:34.202	4.022	Delay meningkat karena proses <i>forwarding</i>
10		21:18:38.220	21:18:42.243	4.023	Delay meningkat karena proses <i>forwarding</i>
Rata-rata Delay (dengan repeater)				4.033 s	
Deviasi Standar (σ)				± 0.015 s	Delay sistem stabil

Berdasarkan Tabel 3, menunjukkan bahwa sistem LoRa Ebyte E220-400T22D memiliki *delay* rata-rata 2.019 detik pada komunikasi langsung (tanpa repeater) dan meningkat menjadi 4.033 detik ketika menggunakan repeater. Peningkatan *delay* sekitar 2 detik disebabkan oleh proses *store-and-forward* pada node repeater yang memerlukan waktu tambahan untuk menerima, memproses, dan mengirim ulang paket data ke node penerima.

Meskipun terjadi peningkatan waktu tunda, *delay* total masih berada dalam kategori wajar untuk sistem LoRa dengan *spreading factor* (SF) 12, *bandwidth* 125 kHz, dan ukuran payload 20–50 byte, di mana *delay* transmisi normal berkisar antara 1,5–5 detik. Nilai deviasi standar sebesar ± 0.015 s menunjukkan bahwa sistem repeater bekerja secara stabil dan konsisten dalam meneruskan data tanpa anomali waktu yang signifikan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem Repeater LoRa berbasis modul Ebyte E220-400T22D berhasil memperluas jangkauan komunikasi secara signifikan pada kondisi LOS maupun NLOS). Pada kondisi LOS, jangkauan meningkat dari 400 meter menjadi 800 meter, sedangkan pada kondisi NLOS jangkauan bertambah dari 100 meter menjadi 200 meter dengan kualitas sinyal yang tetap stabil (RSSI -93 hingga -97 dBm). Meskipun terjadi peningkatan waktu tunda dari 2,019 detik menjadi 4,033 detik akibat proses *store-and-forward* pada repeater. Secara keseluruhan, penggunaan repeater terbukti efektif dalam memperluas area cakupan komunikasi tanpa mengorbankan kestabilan dan efisiensi sistem, sehingga layak diter

Daftar Pustaka

- [1] L. Sciallo, A. Trotta, and M. Di Felice, "Design and performance evaluation of a LoRa-based mobile emergency management system (Locate)," *Ad Hoc Networks*, vol. 96, 2020.
- [2] G. M. Bianco, R. Giuliano, G. Marrocco, F. Mazzenga, and A. Mejia-Aguilar, "LoRa System for Search and Rescue: Path-Loss Models and Procedures in Mountain Scenarios," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1985–1999, 2021.
- [3] S. Phaiboon and P. Phokharatkul, "A Tree Attenuation Factor Model for a Low-Power Wide-Area Network in a Ruby Mango Plantation," *sensors*, vol. 24, pp. 1–17, 2024.
- [4] B. Myagmardulam *et al.*, "Performance evaluation of lora 920 mhz frequency band in a hilly forested area," *Electron.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–13, 2021.
- [5] M. O. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, "Experimental evaluation of a Lora wildlife monitoring network in a forest vegetation area," *Futur. Internet*, vol. 13, no. 5, pp. 1–22, 2021.
- [6] B. Babayigit and F. Dogan, "LoRa Communication Evaluation Based Building Density in Ankara City," *HORA 2022 - 4th Int. Congr. Human-Computer Interact. Optim. Robot. Appl. Proc.*, 2022.
- [7] L. Xuan, Z. Hesheng, and L. Lei, "Research on LoRa Communication Performance in Manhole Cover Monitoring," *I2MTC 2019 - 2019 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 1–6, 2019.
- [8] M. O. Ojo, I. Viola, S. Miretti, E. Martignani, S. Giordano, and M. Baratta, "A Deep Learning Approach for Accurate Path Loss Prediction in LoRaWAN Livestock Monitoring," *Sensors*, vol. 24, no. 10, 2024.
- [9] V. Torres-Sanz, J. A. Sanguesa, F. Serna, F. J. Martinez, P. Garrido, and C. T. Calafate, *Analysis of the Influence of Terrain on LoRaWAN-based IoT Deployments*, vol. 1, no. 1. Association for Computing Machinery, 2023.
- [10] W. G. Lima *et al.*, "LoRa Technology Propagation Models for IoT Network Planning in the Amazon Regions," *Sensors*, vol. 24, no. 5, pp. 1–23, 2024.
- [11] H. Azwar, M. Diono, and R. S. Darwis, "Sistem Telemetri Nirkabel Menggunakan Long Range (LoRa) untuk Deteksi Dini Kebakaran Hutan," *J. Elem. (Elektro dan Mesin Ter.)*, vol. 9, no. 1, 2023.
- [12] M. Al Mojamed, "LTM-LoRaWAN: A Multi-Hop Communication System for LoRaWAN," *Electron.*, vol. 12, no. 20, 2023.
- [13] R. Choi, S. Lee, and S. Lee, "Reliability Improvement of LoRa with ARQ and Relay Node," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, 2020.
- [14] M. González-Palacio, D. Tobón-Vallejo, L. M. Sepúlveda-Cano, S. Rúa, G. Pau, and L. B. Le, "LoRaWAN Path

- Loss Measurements in an Urban Scenario including Environmental Effects,” *Data*, vol. 8, no. 1, pp. 1–22, 2023.
- [15] L. Moiroux-Arvis, C. Cariou, and J. P. Chanet, “Evaluation of LoRa technology in 433-MHz and 868-MHz for underground to aboveground data transmission,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 194, pp. 1–20, 2022.
- [16] T. Xu, D. Ma, W. Fang, and Y. Huang, “Experimental Study on the Propagation Characteristics of LoRa Signals in Maize Fields,” *Electron.*, vol. 14, no. 11, 2025.
- [17] J. A. Azevedo and F. Mendonça, “A Critical Review of the Propagation Models Employed in LoRa Systems,” *Sensors*, vol. 24, no. 12, pp. 1–41, 2024.
- [18] Z. Khan, A. H. Mansoori, and T. Porje, “Design and Implementation of a LoRa Communication System for Off-Grid Applications,” *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 180–188, 2025.
- [19] D. R. Sharma, R. R. Raghuwanshi, T. Chandak, and D. Ramdasi, “LoRa-based IoT system for emergency assistance and safety in mountaineering,” *Int. J. Saf. Secur. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 491–500, 2023.
- [20] Z. Li, X. Li, and J. Shang, “Forest Fire Monitoring and Energy Optimization Based on LoRa-Mesh Wireless Communication Technology,” *Electronics*, vol. 14, pp. 1–21, 2025.
- [21] M. R. Ansah, R. A. Sowah, J. Melià-Seguí, F. A. Katsriku, X. Vilajosana, and W. O. Banahene, “Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment,” *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 10, no. 5, pp. 181–197, 2020.
- [22] G. Kaur, V. Balyan, and S. H. Gupta, “Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology,” *Results Eng.*, vol. 23, no. September, p. 102844, 2024.
- [23] M. Rademacher, H. Linka, T. Horstmann, and M. Henze, “Path Loss in Urban LoRa Networks: A Large-Scale Measurement Study,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2021-Sept, pp. 1–6, 2021.
- [24] H. Alhomyani, M. Fadel, N. Dimitriou, H. Bakhsh, and G. Aldabbagh, “Modeling the Performance of a Multi-Hop LoRaWAN Linear Sensor Network for Energy-Efficient Pipeline Monitoring Systems,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 20, 2024.
- [25] A. R. Askhedkar, B. S. Chaudhari, M. Abdelhaq, R. Alsaqour, R. Saeed, and M. Zennaro, “LoRa Communication Using TVWS Frequencies: Range and Data Rate,” *Futur. Internet*, vol. 15, no. 8, 2023.
- [26] G. Leenders, G. Callebaut, G. Ottoy, L. Van der Perre, and L. De Strycker, “An Energy-Efficient LoRa Multi-Hop Protocol through Preamble Sampling for Remote Sensing,” *sensors*, vol. 23, 2023.
- [27] H. Shida, A. Kaburaki, and K. Adachi, “Transmission Timing and Synchronization Control for Energy-Efficient Multi-Hop LoRaWAN,” *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, 2024.
- [28] H. Azwar, “Rancang Bangun Repeater Untuk Komunikasi LoRa,” *J. Elem. (Elektro dan Mesin Ter.)*, vol. 10, no. 1, pp. 88–96, 2024.