

Pengembangan Mesh Network Sebagai Ekspansi Protokol LoRaWAN di Politeknik Negeri Malang

Noprianto¹, Reynaldi Fakhri Pratama², Habibie Ed Dien³, Muhammad Hasyim Ratsanjani⁴, dan Muhammad Afif Hendrawan⁵

- ¹ Politeknik Negeri Malang; noprianto@polinema.ac.id
- ² Politeknik Negeri Malang; reynaldifp2000@gmail.com
- ³ Politeknik Negeri Malang; habibie@polinema.ac.id
- ⁴ Politeknik Negeri Malang; hsy@polinema.ac.id
- ⁵ Politeknik Negeri Malang; afif.hendrawan@polinema.ac.id

Sitasi: N, Noprianto; Pratama, R. F.; Dien, H. E.; Ratsanjani, M. H.; dan Hendrawan, M. A. (2024). Pengembangan Mesh Network Sebagai Ekspansi Protokol LoRaWAN di Politeknik Negeri Malang. *JTIM: Jurnal Teknologi Informasi Dan Multimedia*, 6(3), 296-306. <https://doi.org/10.35746/jtim.v6i3.594>

Diterima: 21-08-2024

Direvisi: 26-09-2024

Disetujui: 10-10-2024



Copyright: © 2024 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Abstract: In realizing a smart campus, Politeknik Negeri Malang (Polinema) has implemented digital technology in its learning and administrative processes with the goal of improving efficiency, speed, and operational ease. One of the key areas being developed is the Internet of Things (IoT), which is expected to function autonomously to support various campus activities. However, the main challenges in IoT implementation are the limitations in communication range and device power consumption, which cause issues in sensor and actuator data transmission, especially when data cannot be optimally received between nodes. To address these challenges, Polinema is exploring the application of LoRaWAN technology. Although LoRaWAN is effective, it experiences a decline in data transmission quality when the sender and receiver are located in multi-story buildings, which can lead to delays, packet loss, or other disruptions. As a solution, the use of a Mesh Network is proposed to enhance the range and stability of data transmission. This study collected data using RSSI, SNR, and delay parameters in the civil engineering building at Polinema, with sensor data visualized through Grafana. The results show that the system can be well-integrated without conflicts between WiFi and LoRa. The average transmission time was approximately 29 seconds, with no packet loss detected. Additionally, changing the transmission method to confirmed uplink was necessary to maintain data integrity, while adjusting transmission intervals was crucial to avoid scheduling issues. These findings indicate that implementing a Mesh Network as an extension of the LoRaWAN protocol can significantly improve the performance of IoT systems in Polinema's indoor environment.

Keywords: Mesh Network, LoRaWAN, Indoor, IoT, Grafana

Abstrak: Dalam mewujudkan kampus cerdas, Politeknik Negeri Malang (Polinema) menerapkan teknologi digital dalam proses pembelajaran dan administrasi dengan tujuan meningkatkan efisiensi, kecepatan, dan kemudahan operasional. Salah satu bidang yang tengah dikembangkan adalah Internet of Things (IoT), yang diharapkan dapat berfungsi secara otomatis untuk mendukung berbagai aktivitas kampus. Namun, tantangan utama dalam implementasi IoT adalah keterbatasan jangkauan komunikasi dan konsumsi daya perangkat, yang menyebabkan pengiriman data sensor dan aktuator mengalami kendala, terutama ketika data tidak dapat diterima antar node secara optimal. Untuk mengatasi tantangan ini, Polinema mengeksplorasi penerapan teknologi LoRaWAN. Meskipun LoRaWAN efektif, teknologi ini mengalami penurunan kualitas transmisi data ketika pengirim dan penerima berada di dalam gedung bertingkat, yang dapat menyebabkan penundaan, kehilangan paket, atau gangguan lainnya. Sebagai solusi, penggunaan Mesh Network

diusulkan untuk meningkatkan jangkauan dan stabilitas transmisi data. Penelitian ini mengumpulkan data menggunakan parameter RSSI, SNR, dan delay di gedung sipil Polinema, dengan hasil sensor ditampilkan secara visual melalui Grafana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat diintegrasikan dengan baik tanpa adanya konflik antara WiFi dan LoRa. Rata-rata waktu transmisi mencapai sekitar 29 detik, dengan tidak terdeteksi adanya packet loss. Selain itu, perubahan metode pengiriman ke confirmed uplink diperlukan untuk menjaga integritas data, sementara penyesuaian interval transmisi sangat penting untuk menghindari masalah penjadwalan. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan Mesh Network sebagai perluasan protokol LoRaWAN dapat secara signifikan meningkatkan kinerja sistem IoT di lingkungan *indoor* Polinema.

Kata kunci: Mesh Network, LoRaWAN, *indoor*, IoT

1. Pendahuluan

Politeknik Negeri Malang (Polinema) berkomitmen untuk mewujudkan konsep kampus cerdas dengan mengadopsi teknologi digital dalam proses pembelajaran dan administrasi. Salah satu langkah strategis yang diambil adalah mengembangkan inisiatif yang memungkinkan berbagai proses berjalan secara otomatis, dengan tujuan meningkatkan kemudahan, kecepatan, dan efisiensi. Salah satu area fokus utama adalah penerapan teknologi Internet of Things (IoT), yang menghubungkan perangkat fisik ke internet untuk mengumpulkan dan mengirimkan data, seperti sensor dan aktuator[1]. Namun, penerapan IoT tidak lepas dari tantangan, terutama terkait dengan jangkauan komunikasi dan konsumsi daya. Jangkauan merujuk pada sejauh mana perangkat IoT dapat berkomunikasi secara efektif[2], sementara konsumsi daya yang tinggi menjadi kendala dalam menjaga kinerja perangkat dalam jangka panjang[3]. Untuk itu, diperlukan desain perangkat IoT yang efisien dalam penggunaan daya, agar dapat berfungsi optimal dalam waktu yang lebih lama[4].

Salah satu solusi yang sedang dieksplorasi Polinema untuk mengatasi masalah ini adalah penerapan teknologi Low Power Wide Area Network (LPWAN), khususnya protokol LoRaWAN, yang dirancang untuk komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah[5], [6]. Walaupun LoRaWAN efektif dalam lingkungan yang relatif dekat, seperti dalam satu gedung[7], [8], tantangan muncul ketika perangkat berada di dalam gedung bertingkat. Hal ini dapat menyebabkan penurunan kualitas transmisi data, termasuk penundaan dan kehilangan paket.

Dalam jurnal hasil penelitian oleh Noprianto dkk[7], modul LoRa dapat melakukan pengiriman data dengan baik dari lantai 4 sampai lantai 7 dengan posisi LoRa penerima (*concentrator*) terletak di lantai 6. Data dapat diterima dengan baik adalah ketika data dapat dilakukan deserialisasi oleh LoRa penerima untuk mengetahui isi dari data yang dikirimkan oleh LoRa pengirim dari masing-masing lantai. Jarak lantai yaitu 3 meter dengan ketebalan lantai 10-15 cm. Nilai RSSI dan SNR pada lantai 5 menunjukkan nilai minus yang paling tinggi dibandingkan dengan lantai 4, lantai 6, dan lantai 7 hal tersebut menunjukkan lokasi banyak mengalami pathloss sehingga kurang ideal ketika dipasang modul LoRa walaupun masih dapat mengirimkan data. Data yang dikirimkan tidak dapat diterima dengan baik ketika melakukan pengujian di lantai 3 dan lantai 8.

Dalam jurnal hasil penelitian oleh Zourmand dkk[9], Teknologi LoRa menunjukkan keunggulan dalam mengatasi gangguan kebisingan dan memfasilitasi komunikasi jarak jauh berkat teknik modulasinya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jaringan LoRa, yang terdiri dari gateway saluran tunggal berbiaya rendah dan aplikasi jaringan pribadi, dapat mencakup seluruh bangunan hanya dengan satu gateway atau penerima. Pengaturan Faktor Penyebaran dan Bandwidth yang optimal memungkinkan jangkauan komunikasi yang lebih panjang dan ketebalan kebisingan yang lebih tinggi,

menunjukkan keunggulan LoRa dibandingkan protokol nirkabel lainnya. Meskipun lingkungan penerapan dan penghalang padat dapat mempengaruhi kualitas sinyal, teknologi LoRa masih mampu memberikan kinerja yang baik. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa dengan pengaturan parameter LoRa yang optimal, perangkat di jaringan LoRa dapat bekerja selama beberapa tahun dengan pasokan off-grid seperti baterai. Ini membuka peluang untuk analisis konsumsi daya di masa mendatang, semakin menegaskan potensi teknologi LoRa dalam IoT.

Dalam jurnal hasil penelitian oleh Jiang dkk[10], penelitian ini mengusulkan desain jaringan mesh LPWAN hybrid untuk aplikasi IoT yang mampu memberikan jangkauan beberapa kilometer hanya dengan node berdaya rendah sambil memberikan QoS yang sangat baik. Node sensor yang dirancang dan diproduksi sendiri digunakan dalam penelitian ini, yang mengintegrasikan mikrokontroler, antarmuka komunikasi nirkabel, dan jaringan hybrid dengan tautan komunikasi jarak pendek (2,4 GHz) dan jarak jauh (915 MHz). Hasilnya menunjukkan peningkatan signifikan dalam konsumsi daya dan jangkauan komunikasi dibandingkan dengan jaringan single hop tradisional seperti LoRaWAN. Eksperimen skala penuh menunjukkan bahwa jaringan yang diusulkan secara signifikan meningkatkan kualitas layanan sambil mempertahankan stabilitas jangka panjang.

Dalam jurnal hasil penelitian oleh Mullick dkk[11], Penelitian ini menguji transmisi data nirkabel dan peningkatan kinerja jaringan untuk DAQM. Penelitian ini mempertimbangkan beberapa skenario kritis dan membandingkan kinerja menggunakan arsitektur jaringan berbasis dua node LoRa dan jaringan mesh. Jaringan mesh yang diusulkan terdiri dari empat node dan dua node pengulang yang dapat menjangkau seluruh testbed DAQM untuk mengirimkan data terukur DAQM ke node akhir secara nirkabel untuk analisis akhir. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan jaringan mesh dalam percobaan ini meningkatkan PDR sebesar 237% dan meningkatkan luas cakupan lima kali lipat dibandingkan dengan jaringan berbasis dua node. Sebuah jaringan mesh kecil diimplementasikan, termasuk hanya satu node master dan dua node pengulang. Hasil penelitian ini memberikan dasar untuk implementasi di lingkungan yang lebih besar dengan mempertimbangkan pengaruh jumlah node.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Cilfone dkk[12], Wireless mesh network (WMN) telah terbukti menjadi teknologi yang sangat efektif dan efisien untuk implementasi Internet of Things (IoT). Dengan kemampuannya untuk mendukung komunikasi antara banyak perangkat tanpa memerlukan infrastruktur kabel atau sentralisasi, WMN menawarkan fleksibilitas dan skalabilitas yang luar biasa. Teknologi ini juga dapat menyesuaikan diri dengan kebutuhan dan karakteristik IoT, seperti heterogenitas, skalabilitas, fleksibilitas, dan efisiensi energi. Dengan demikian, WMN memiliki potensi besar untuk mendukung berbagai aplikasi IoT, mulai dari smart city hingga smart agriculture dan smart health. Kesimpulannya, WMN adalah teknologi kunci yang akan memainkan peran penting dalam masa depan IoT.

Jurnal selanjutnya yaitu jurnal penelitian yang dilakukan oleh Kashyap dkk[13], Jaringan mesh yang dapat diwujudkan dengan mengintegrasikan kemampuan routing mesh ke dalam semua perangkat IoT (aktif maupun pasif). Hal ini akan sangat bermanfaat untuk Smart Home, Smart City, dan bidang aplikasi komersial atau perusahaan serupa lainnya. Konektivitas dan cakupan jangkauan akan meningkat tanpa memerlukan peningkatan infrastruktur.

Berdasarkan penelitian sebelumnya Noprianto dkk[7], [8], telah melakukan analisis LoRa dalam komunikasi NodeMCU di lingkungan Politeknik Negeri Malang. Mereka menemukan bahwa modul LoRa dapat mengirim data dengan baik dari lantai 4 sampai lantai 7 dengan posisi LoRa penerima (concentrator) terletak di lantai 6. Namun, data tidak dapat diterima dengan baik di lantai 3 dan lantai 8 karena banyak mengalami pathloss. Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam mengirimkan data sensor dan aktuator dari lantai dasar sampai lantai paling atas (*roof top*). Hal tersebut terjadi karena

perangkat LoRa (*node*) ketika akan mengirimkan data sensor dan aktuator ke perangkat gateway terhalang oleh lantai atau tembok.

Sebagai solusi, penerapan Mesh Network dipertimbangkan untuk meningkatkan kinerja LoRaWAN. Mesh Network memungkinkan setiap perangkat IoT terhubung melalui beberapa node, sehingga data dapat bergerak melalui jalur alternatif yang lebih stabil dan andal. Ini tidak hanya memperluas jangkauan jaringan tetapi juga membuatnya lebih tahan terhadap gangguan dan mampu mendukung lebih banyak perangkat IoT [14], [15].

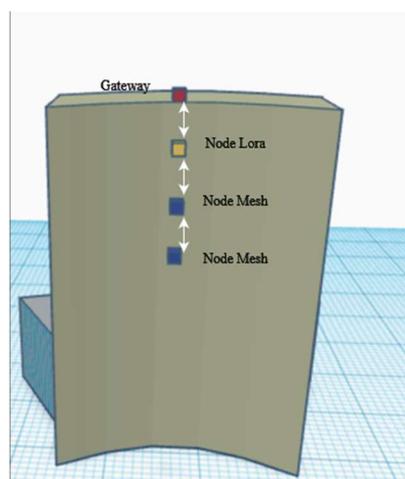
Penelitian ini bertujuan mengembangkan penerapan Mesh Network pada teknologi LoRaWAN untuk meningkatkan efisiensi pengumpulan data di lingkungan gedung. Pengembangan ini diharapkan dapat mengatasi kendala spesifik LoRaWAN, seperti penurunan kualitas komunikasi di gedung Politeknik Negeri Malang, serta meningkatkan konservasi energi dan efisiensi transmisi data.

2. Bahan dan Metode

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Politeknik Negeri Malang, khususnya di lantai 1-8 jurusan Teknologi Informasi yang diilustrasikan di Gambar 1. Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari berbagai sensor. Sensor DHT11 digunakan untuk mengumpulkan data suhu dan kelembaban, sensor LDR digunakan untuk mengumpulkan data tentang intensitas cahaya, dan sensor HC-SR04 digunakan untuk mengumpulkan data tentang jarak.

Data ini dikumpulkan dari beberapa titik lantai tertentu dari gedung Sipil dan gedung Mesin menggunakan ESP32 sebagai Node. Data tersebut kemudian dikirim menuju LILYGO Ttgo lora32 yang berperan sebagai LoRa Pengirim dan parent node esp32 yang berada di gedung tersebut. Ketika data tersebut sampai ke LoRa pengirim, data tersebut akan dikirim menuju LoRa Gateway yang berada di *roof top*, kemudian setelah data tersebut sampai data tersebut akan diproses untuk disimpan ke dalam database. Gambar 1 menunjukkan proses pengiriman data antar *node* menggunakan jaringan Mesh ke *gateway*.

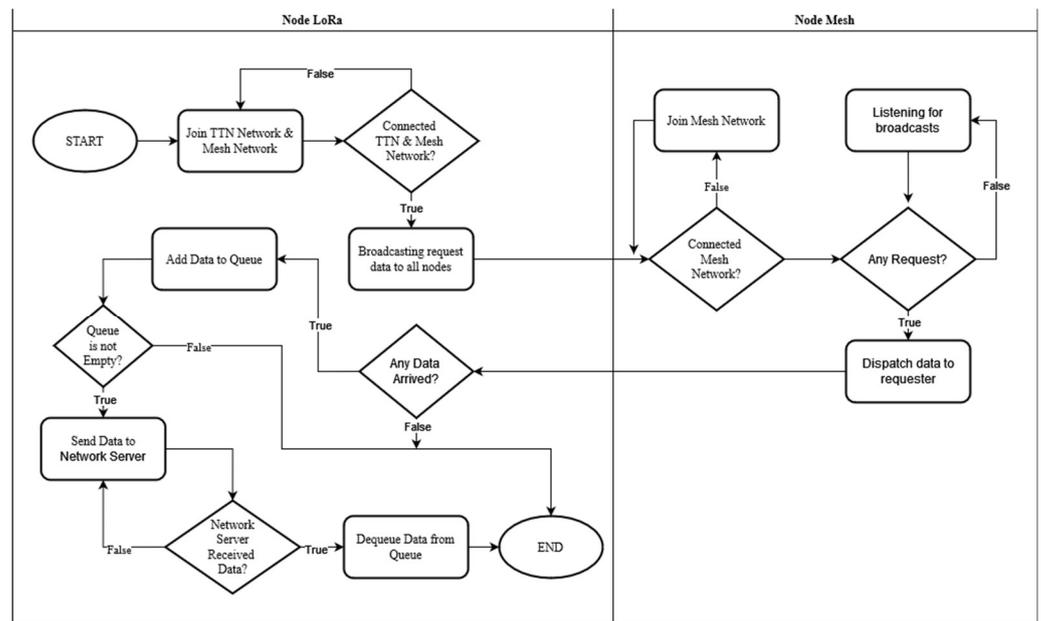


Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.1 Flowchart Node LoRa dan Node Mesh

Gambar 2 menjelaskan alur kerja dari Node LoRa dan Node Mesh dalam sistem. Saat Node LoRa menyala, akan terhubung ke server The Things Network (TTN) dan jaringan mesh. TTN merupakan sebuah platform berbasis *cloud* khusus untuk protokol LoRaWAN. Jika koneksi berhasil, Node LoRa akan mendapatkan alamat perangkat dan melakukan pengiriman (*broadcast*) ke seluruh node dalam jaringan *mesh*. Sementara itu,

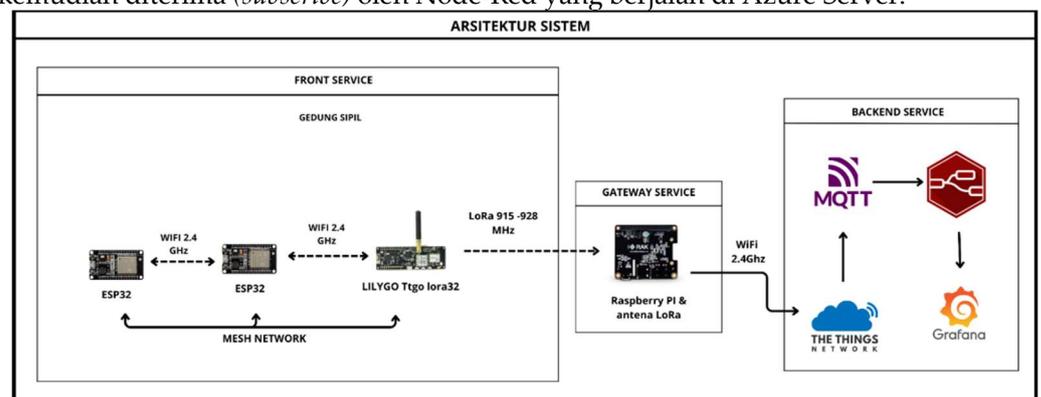
Node Mesh terus mendengarkan (*subscribe*) siaran dalam jaringan. Ketika Node LoRa menerima data dari Node Mesh, data tersebut dimasukkan ke dalam antrian (Queue). Jika Queue tidak kosong, data disiapkan sebagai bentuk data (*payload*) untuk dikirim ke server TTN dengan permintaan konfirmasi. Jika pengiriman gagal, Node LoRa akan mengirim ulang *payload* sampai mendapat konfirmasi. Setelah konfirmasi diterima, data dihapus (*dequeue*) dari Queue. Di sisi lain, jika ada permintaan data sensor ke Node Mesh, node akan mengirimkan data tersebut kepada peminta. Setelah menyelesaikan tugasnya, kedua jenis node kembali ke mode siaga mereka masing-masing Node LoRa siap menerima data baru, dan Node Mesh kembali mendengarkan siaran, siap untuk permintaan berikutnya. Proses ini menggambarkan bagaimana kedua jenis node beroperasi secara terintegrasi dalam sistem, mulai dari pengecekan koneksi hingga pengiriman dan penerimaan data.



Gambar 2 Flowchart Node LoRa & Node Mesh

2.2. Arsitektur Sistem

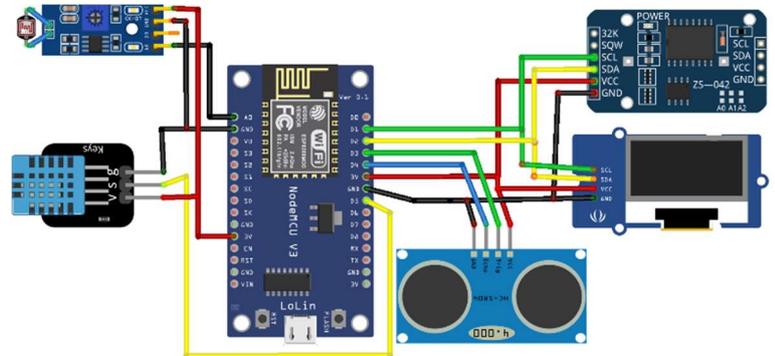
Gambar 3 menjelaskan sistem ini menggunakan dua ESP32 NodeMCU dengan sensor LDR, DHT11, HC-SR04, dan RTC DS3231. Data dari sensor dikirim ke Node Lilygo LoRa32, yang kemudian mentransmisikannya ke LoRaWAN gateway menggunakan antena 10 dBi. Gateway ini terdiri dari Raspberry Pi dengan modul RAK2247 dan antena LoRa fiberglass 902-930 MHz. Data yang diterima diteruskan ke The Things Network sebagai *server cloud*. Selanjutnya, MQTT mengirimkan (*publish*) data tersebut, yang kemudian diterima (*subscribe*) oleh Node-Red yang berjalan di Azure Server.



Gambar 3 Arsitektur Sistem

2.2 Desain Perangkat

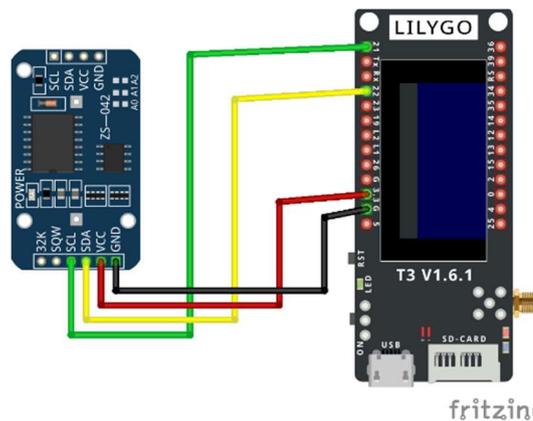
Rancangan perangkat menggambarkan rangkaian pada Node Mesh yang terpasang sensor-sensor yang telah disebutkan sebelumnya.



fritzing

Gambar 4 Desain Node Mesh

Gambar 4 menunjukkan terdapat esp32 sebagai *microcontroller* yang dihubungkan pada setiap module yaitu DHT11, HC-SR04, LDR, RTC, dan Oled. Setiap module dihubungkan melalui pin yang berbeda di *microcontroller*.



fritzing

Gambar 5 Desain Node LoRa

Gambar 5 menunjukkan perancangan Node LoRa sebagai pengirim (*transmitter*) ke Gateway LoRa, yang akan menerima data dari Node Mesh dilengkapi dengan modul RTC.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Sistem

Hasil pengujian sistem menunjukkan keberhasilan alur komunikasi dari Node Mesh hingga ke The Things Network. Mekanisme dilakukan dengan meletakkan 2 buah node pada 2 lantai menggunakan jaringan Mesh, selanjutnya lantai atasnya node LoRa menggunakan jaringan LoRa. Kemudian untuk gateway diletakkan pada lantai paling atas untuk menerima data dari node LoRa, semua node akan dipindah ke bawah secara terus menerus untuk mengecek keberhasilan pengiriman data sampai tidak bisa melakukan pengiriman data. Node LoRa, yang berfungsi sebagai penghubung antara mesh network dan LoRaWAN, berhasil terkoneksi ke network server sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 6. Data yang dikumpulkan oleh Node Mesh dari berbagai sensor berhasil diteruskan melalui Node LoRa ke network server. Keberhasilan transmisi ini dapat diverifikasi melalui catatan transaksi (log) yang ditampilkan pada The Things

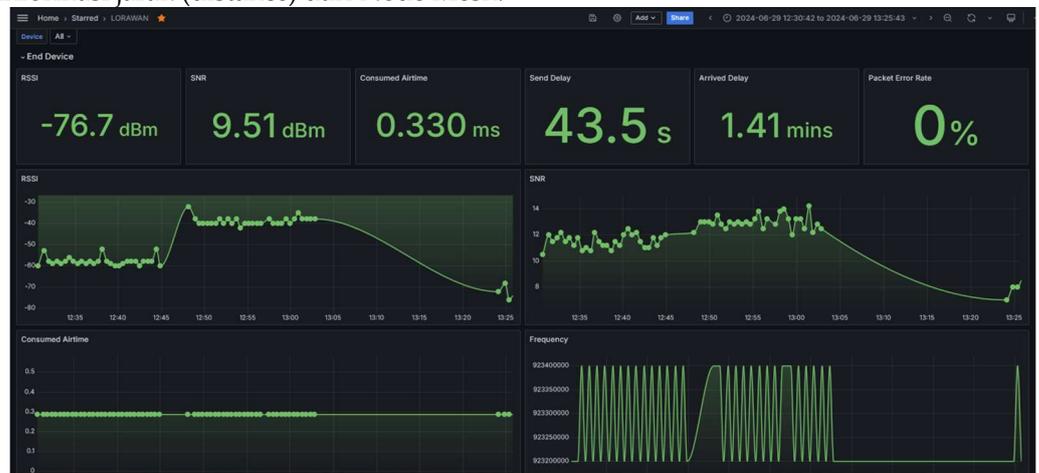
Network. Selanjutnya, data yang diterima tersebut berhasil disimpan ke dalam database dan divisualisasikan pada dashboard monitoring.

> loramsh-aldi > Application data

Entity ID	Type	DevAddr	Payload
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-002", "27.00", "70.00", "30.28"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-002", "27.90", "70.30", "30.51"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-002", "27.90", "70.30", "30.51"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-002", "28.60", "69.90", "31.86"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-002", "27.20", "63.00", "28.58"]
loranode-01	Forward uplink data message	27 FD 1E 65	data: ["DEV-001", "28.50", "47.00", "28.73"]

Gambar 6 Dashboard Network Server TTN

Gambar 7 merupakan hasil pembacaan grafik dari hasil pengiriman LoRa sehingga pengguna dapat membaca informasi-informasi parameter untuk protokol LoRaWAN mengenai RSSI, SNR, Consumed_airtime, Send_delay, Arrived_delay dan packet loss yang ditampilkan di dashboard Grafana yang bertujuan untuk pengguna dapat dengan mudah melihat dan memahami grafik-grafik yang menampilkan nilai yang mempengaruhi kinerja LoRa, serta data yang diperoleh dari Node LoRa. Kemudian Gambar 8 merupakan informasi mengenai temperature, humidity, intensitas cahaya dan informasi jarak (distance) dari Node Mesh.



Gambar 7 Tampilan Dashboard Node LoRa



Gambar 8 Tampilan Dashboard Node Mesh

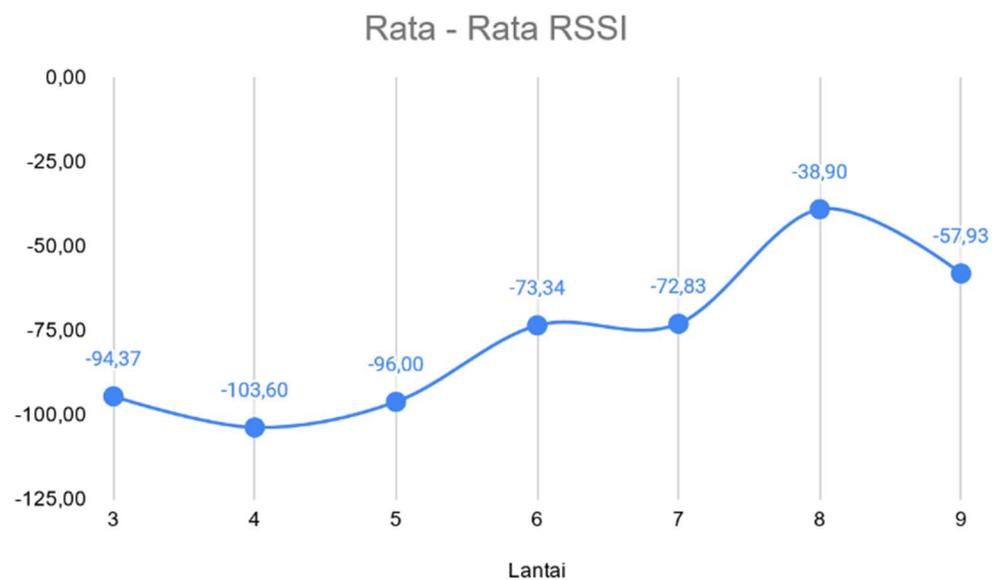
3.2. Hasil Pengujian LoRa

Hasil Pengujian LoRa yang telah dilaksanakan menghasilkan serangkaian data yang selanjutnya disimpan dalam database untuk dianalisis lebih lanjut. Untuk keperluan pengujian, digunakan sampel berupa 10 record data dari lantai 9, sebagaimana tercantum dalam tabel 1. Setiap lantai memiliki jarak vertikal sekitar 3 meter satu sama lain, dengan ketebalan lantai berkisar antara 10 sampai 15 cm.

Tabel 1. Pengujian RSSI dan SNR

Tempat	No	RSSI	SNR
Lantai 9	1	-60	-60
	2	-53	-53
	3	-58	-58
	4	-59	-59
	5	-58	-58
	6	-59	-59
	7	-58	-58
	8	-56	-56
	9	-58	-58
	10	-59	-59

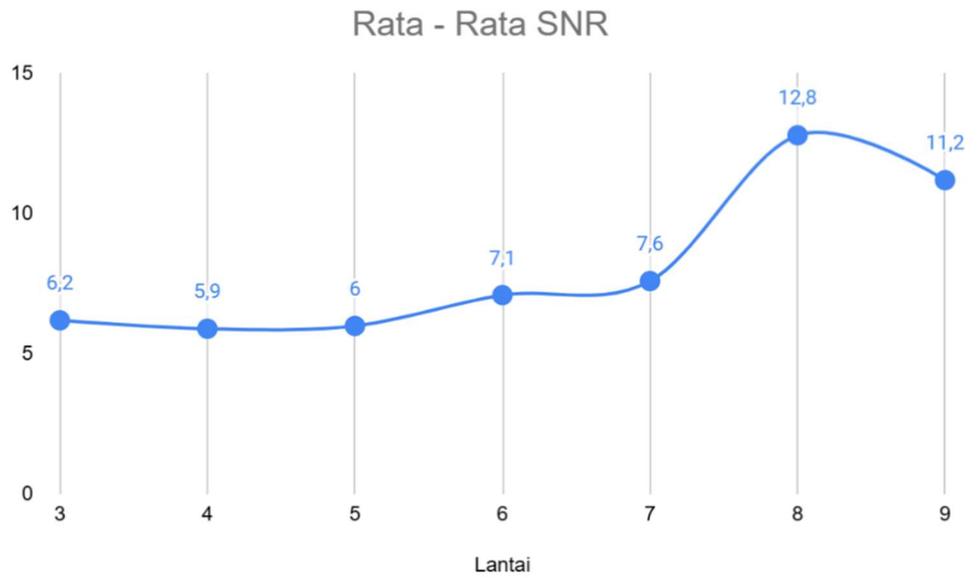
Berikut merupakan grafik nilai RSSI secara keseluruhan dari pengujian yang telah di rata-rata dengan jumlah banyak data yang ada di setiap lantai, dari hasil perhitungan rata-rata tersebut maka didapatkan nilai RSSI yang terbaik dengan nilai -30 dBm pada lantai 8 yang berjarak 3 meter dengan gateway, sedangkan RSSI terendah didapatkan dengan nilai -107 dBm pada lantai 4 yang berjarak sekitar 18 meter dari gateway.



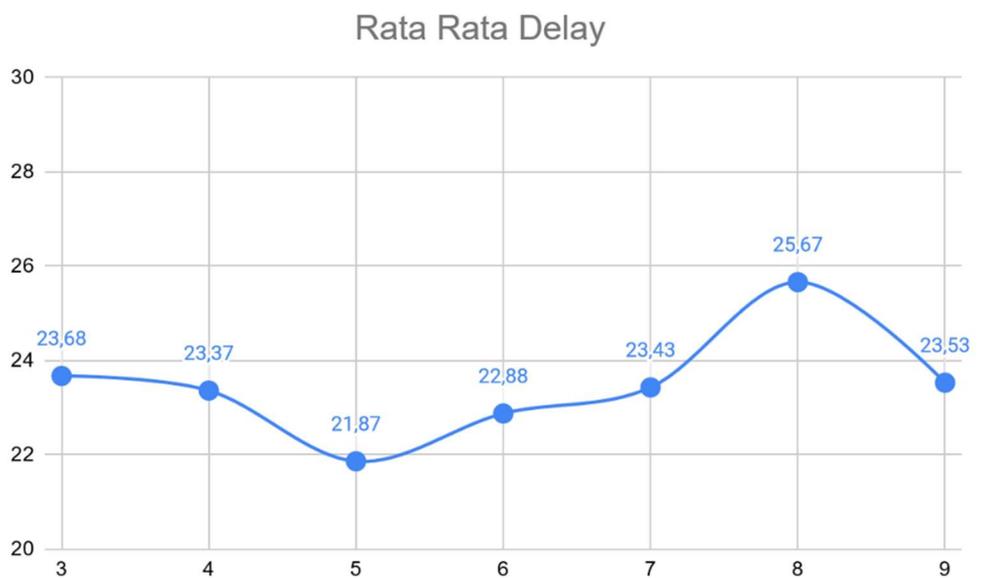
Gambar 9 Rata-Rata RSSI

Gambar 9 merupakan grafik nilai RSSI secara keseluruhan dari pengujian yang telah di rata-rata dengan jumlah banyak data yang ada di setiap lantai, dari hasil perhitungan rata-rata tersebut maka didapatkan nilai RSSI yang terbaik dengan nilai -30 dBm pada lantai 8 yang berjarak 3 meter dengan gateway, sedangkan RSSI terendah didapatkan dengan nilai -107 dBm pada lantai 4 yang berjarak sekitar 18 meter dari gateway.

Grafik pada Gambar 10 menunjukkan variasi nilai SNR rata-rata antar lantai. Lantai 8 mencatat SNR tertinggi (12,8 dB) dengan jarak node-gateway sekitar 3 meter, sementara lantai 4 memiliki SNR terendah (5,9 dB) pada jarak 15 meter. Perbedaan ini menggambarkan pengaruh jarak dan struktur bangunan terhadap kualitas sinyal LoRa, di mana faktor-faktor tersebut mempengaruhi perambatan dan kekuatan sinyal yang diterima.



Gambar 10 Rata-Rata SNR



Gambar 11 Rata-Rata delay

Kinerja sistem LoRa dipengaruhi oleh regulasi transmisi dari The Things Network, dengan batas 30 detik per data. Pengujian di lantai 6 menunjukkan dampak signifikan: setelah 115 record (total 33 detik time-on-air), server menginstruksikan perlambatan transmisi. Akibatnya, *delay* meningkat drastis dengan time-on-air mencapai 2.138.112 ms dan *spreading factor* naik ke 12. Interval transmisi meningkat dari 28 detik menjadi 211 detik. Setelah 5 record dengan limitasi baru, 90 data berikutnya diambil hari berikutnya untuk konfirmasi batas harian. Hasilnya membuktikan keberlakuan batasan tersebut. Tabel 2 menampilkan 10 data terakhir uji lantai 6 dan 5 data awal uji lantai 5 hari berikutnya, menggambarkan dampak Duty Cycle pada transmisi selanjutnya.

Tabel 2. perbedaan waktu antara transmisi

No	Waktu terima	Durasi waktu (detik)	Kirim selanjutnya
1	2024-06-29 6:52:39	28	2024-06-29 6:53:07
2	2024-06-29 6:53:08	28	2024-06-29 6:53:36

No	Waktu terima	Durasi waktu (detik)	Kirim selanjutnya
3	2024-06-29 7:06:52	211	2024-06-29 7:10:23
4	2024-06-29 7:10:26	195	2024-06-29 7:13:41
5	2024-06-29 7:13:44	211	2024-06-29 7:17:15
6	2024-06-29 7:17:17	195	2024-06-29 7:20:32
7	2024-06-29 7:20:34	211	2024-06-29 7:24:05

Penelitian ini menunjukkan kompleksitas dalam mengoptimalkan sistem LoRa untuk penggunaan dalam gedung. Batasan transmisi yang diterapkan oleh The Things Network, meskipun bertujuan untuk menjaga penggunaan jaringan, menciptakan tantangan signifikan dalam pengumpulan data real-time. Peningkatan spreading factor dari 9 ke 12 sebagai respons terhadap batasan ini memang meningkatkan jangkauan dan kehandalan transmisi dalam gedung, namun dengan konsekuensi penurunan kecepatan data dan peningkatan konsumsi energi. Hal ini menunjukkan perlunya perubahan dalam desain sistem LoRa, di mana parameter transmisi dapat disesuaikan secara dinamis berdasarkan kondisi jaringan dan batasan regulasi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pengujian Mesh Network sebagai perluasan protokol LoRaWAN di lingkungan indoor Politeknik Negeri Malang (Polinema), beberapa temuan utama dapat disimpulkan. Perubahan metode pengiriman LoRa dari unconfirmed uplink ke confirmed uplink diperlukan untuk menjaga integritas data yang dikirim, sehingga mengurangi risiko kehilangan data penting. Selain itu, penyesuaian interval antar transmisi sangat krusial untuk menghindari masalah penjadwalan yang dapat mempengaruhi kinerja jaringan. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa frekuensi WiFi 2,4 GHz tidak mengganggu komunikasi LoRa pada frekuensi 923 MHz, memungkinkan kedua teknologi beroperasi berdampingan tanpa menurunkan kualitas transmisi. Lebih lanjut, LoRa memiliki keunggulan dalam penetrasi sinyal antar lantai dibandingkan dengan WiFi, berkat panjang gelombangnya yang lebih panjang, sehingga lebih efektif dalam menjangkau area yang lebih luas di dalam gedung.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan berbagai keuntungan dalam mengintegrasikan Mesh Network dengan LoRaWAN, beberapa tantangan tetap perlu diperhatikan. Salah satunya adalah pembatasan airtime 30 detik per hari oleh The Things Network, yang mengharuskan pertimbangan cermat terhadap ukuran payload untuk memaksimalkan jumlah pesan harian yang dikirim tanpa melanggar aturan. Selain itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan konfigurasi Mesh Network agar dapat beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan yang berbeda, serta untuk mengeksplorasi metode yang lebih efisien dalam mengelola energi perangkat IoT. Peningkatan dalam desain dan implementasi jaringan ini diharapkan dapat lebih meningkatkan kinerja dan keandalan sistem IoT di lingkungan indoor yang kompleks seperti Polinema.

Ucapan Terima Kasih: Terima kasih peneliti sampaikan kepada Unit Pelayanan Teknis Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Malang pada skema Penelitian DIPA Swadana Reguler Kompetisi (Reguler Kompetisi) dengan Nomor SP DIPA: 023.18.2.677606/2024 yang telah memberikan pendanaan

Referensi

- [1] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022–23040, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [2] F. Hamid, E. Ratuloli, A. Setia Budi, and A. Bhawiyuga, "Implementasi Skema Anti-Collision Menggunakan Metode TDMA dan TPSN pada Sistem WSN Berbasis LoRa," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 1, pp. 283–290, Jan. 2021, Accessed: Jul. 05, 2023. [Online]. Available: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/8463>

- [3] N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, "Internet of Things (IoT) and the Energy Sector," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 494, vol. 13, no. 2, p. 494, Jan. 2020, doi: 10.3390/EN13020494.
- [4] K. K. Bhardwaj, A. Khanna, D. K. Sharma, and A. Chhabra, "Designing energy-efficient iot-based intelligent transport system: Need, architecture, characteristics, challenges, and applications," *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 206, pp. 209–233, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-7399-2_9.
- [5] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ICTE.2017.12.005.
- [6] N. Noprianto, Y. Syaifudin, V. Firdaus, M. Mentari, I. Siradjuddin, and M. Kusuma, "The Application of LoRa Module and Smart Card for A Large-Scale Area Attendance Monitoring System," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 815–826, Sep. 2023, doi: 10.12785/IJCDS/140163.
- [7] N. Noprianto, M. A. Hendrawan, and M. H. Ratsanjani, "ANALISIS LORA DALAM KOMUNIKASI NODEMCU DI LINGKUNGAN POLITEKNIK NEGERI MALANG," *Jurnal Sistem Informasi dan Bisnis Cerdas*, vol. 15, no. 2, pp. 1–8, Aug. 2022, doi: 10.33005/SIBC.V15I2.9.
- [8] E. D. H. Noprianto Noprianto *et al.*, "Analysis of LoRa with LoRaWAN Technology Indoors in Polytechnic of Malang Environment," *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi*, vol. 13, no. 2, pp. 698–712, Mar. 2024, doi: 10.32520/STMSI.V13I2.3884.
- [9] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, and M. Abdulrehman, "Internet of Things (IoT) using LoRa technology," *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2019 - Proceedings*, pp. 324–330, Jun. 2019, doi: 10.1109/I2CACIS.2019.8825008.
- [10] X. Jiang *et al.*, "Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT Applications," *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 2, pp. 901–915, Jan. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3009228.
- [11] A. Mullick, A. H. Abd Rahman, D. P. Dahnil, and N. M. R. Noraini, "Enhancing data transmission in duct air quality monitoring using mesh network strategy for LoRa," *PeerJ Comput Sci*, vol. 8, p. e939, Apr. 2022, doi: 10.7717/PEERJ-CS.939/SUPP-1.
- [12] A. Cilfone, L. Davoli, L. Belli, and G. Ferrari, "Wireless Mesh Networking: An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies," *Future Internet* 2019, Vol. 11, Page 99, vol. 11, no. 4, p. 99, Apr. 2019, doi: 10.3390/FI11040099.
- [13] R. Kashyap, M. Azman, and J. G. Panicker, "Ubiquitous Mesh: A Wireless Mesh Network for IoT Systems in Smart Homes and Smart Cities," *Proceedings of 2019 3rd IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2019*, Feb. 2019, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869482.
- [14] R. Berto, P. Napoletano, and M. Savi, "A LoRa-Based Mesh Network for Peer-to-Peer Long-Range Communication," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 4314, vol. 21, no. 13, p. 4314, Jun. 2021, doi: 10.3390/S21134314.
- [15] M. F. N. P. Ripto, P. H. Trisnawan, and R. Primananda, "Implementasi Wireless Mesh Network berbasis Protokol Routing BATMAN untuk Video Live Streaming dengan menggunakan Fitur Network Coding," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 11, pp. 4791–4798, Oct. 2021, Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/10106>