

## Evaluasi Kinerja Eksperimental Mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)* pada Jaringan LoRa *Multi-Node Single-hop* untuk Aplikasi *Internet of Things (IoT)*

Sahid Ridho\*, A Ahmad Dahlan, Yustini, Rusfandi, Ferdiansyah

Teknik Telekomunikasi Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang

\*E-mail: sahid@pnp.ac.id

### Abstract

---

#### Article history:

Received: 04-11-2025

Accepted: 08-12-2025

Published: 30-12-2025

#### Keywords:

evaluation;

gateway-polled sequential access;

internet of things;

LoRa;

performance.

This study presents the development and experimental evaluation of a single-hop multi-node LoRa communication system implementing the Gateway-Polled Sequential Access (GPSA) mechanism. The proposed GPSA scheme is a simplified form of Time Division Multiple Access (TDMA), where the gateway acts as the central controller that sequentially triggers each node via a START command, ensuring collision-free communication. The system was tested in four communication scenarios (1–4 nodes) at distances of 10 m, 50 m, 100 m, and 200 m in an open-field environment using E22-900T22D LoRa modules, INA219 current sensors, and a microSD-based logging system. The evaluated parameters included Received Signal Strength Indicator (RSSI), Round Trip Time (RTT), Packet Delivery Ratio (PDR), and the energy consumption of both the gateway and nodes. Experimental results show that the RSSI decreased reasonably from  $-51$  dBm to  $-82$  dBm as distance increased, while RTT remained stable between 760–820 ms. The PDR consistently achieved 100% across all test scenarios, confirming the reliability of the sequential polling mechanism in avoiding transmission collisions. Node energy consumption remained stable at 16–18 mJ per communication cycle and was independent of distance, while gateway energy consumption increased proportionally with the number of active nodes. With a 7.4 V / 1100 mAh Li-Po battery, each node can operate continuously for approximately 17 days. Overall, the LoRa-GPSA system demonstrated high energy efficiency, communication stability, and straightforward implementation, making it an effective solution for medium-range IoT field applications.

---

### 1. Pendahuluan

Perkembangan *Internet of Things (IoT)* menuntut teknologi komunikasi yang mampu menjangkau area luas dengan konsumsi daya rendah dan mendukung skala perangkat besar. *Long Range (LoRa)* merupakan salah satu teknologi *Low Power Wide Area Network (LPWAN)* yang menonjol karena menggunakan modulasi *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, sehingga mampu mencapai jangkauan beberapa kilometer dengan efisiensi energi tinggi[1-3]. Keunggulan jangkauan dan konsumsi daya rendah menjadikan LoRa banyak digunakan dalam aplikasi pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, logistik, serta kota pintar[4-6].

Meskipun demikian, protokol akses media LoRaWAN yang menggunakan *pure ALOHA* memiliki batas efisiensi kanal maksimum sekitar 18%, sehingga rentan terhadap *collision* terutama pada jaringan berkepadatan tinggi[7-9]. Hal ini berdampak pada meningkatnya *delay*, penurunan *Packet Delivery Ratio (PDR)*, dan menurunnya skalabilitas jaringan. Oleh sebab itu, berbagai penelitian mengusulkan mekanisme alternatif berbasis *Time Division*

*Multiple Access (TDMA)*, *slotted ALOHA*, *carrier sensing*, *queue-based access*, maupun *hybrid protocol* untuk meningkatkan deterministik waktu akses dan mengurangi *collision*[7, 10-12].

Beberapa penelitian menunjukkan peningkatan signifikan ketika LoRa dioperasikan menggunakan varian TDMA. Chasserat et al. menunjukkan bahwa TDMA di atas LoRaWAN dapat meningkatkan efisiensi energi serta *throughput*, terutama pada jaringan dengan jumlah perangkat tinggi[7]. Beltramelli et al. membuktikan bahwa metode akses di luar ALOHA, seperti *slotted ALOHA* dan CSMA, dapat meningkatkan keandalan serta efisiensi energi, terutama dalam kondisi trafik tinggi [10]. Wu et al. memperkenalkan *Distributed Queueing (DQ-LoRa)* yang mampu meningkatkan *throughput* hingga 2,6 kali dan mengurangi konsumsi energi hingga 48% dibandingkan *pure ALOHA*[11].

Nugraha et al. membuktikan bahwa algoritma TDMA pada jaringan *multi-node* menghasilkan tingkat keberhasilan pengiriman 100% dibandingkan hanya 10% pada CSMA, serta menurunkan *delay* dari 4125 ms menjadi 428 ms[12]. Tehrani et al. juga mengusulkan

arsitektur *tree-structured* LoRa untuk mengurangi konsumsi energi secara signifikan pada jaringan berskala besar[13]. Tu et al. melakukan analisis matematis efisiensi energi LoRa dan menemukan adanya nilai daya pancar optimal yang memaksimalkan efisiensi energi jaringan[14]. Selain itu, Chen et al. menunjukkan bahwa protokol *dynamic slot allocation* berbasis *multi-channel* mampu mempercepat waktu pengiriman dan meningkatkan efisiensi kanal dibandingkan dengan TDMA statis[15].

Kendati berbagai penelitian tersebut menunjukkan potensi besar LoRa berbasis TDMA, sebagian besar dilakukan melalui simulasi atau skenario teoritis. Studi eksperimental yang mengukur langsung energi aktual *node* dan *gateway*, PDR, serta RTT pada skema akses terjadwal masih sangat terbatas. Untuk mengisi celah tersebut, penelitian ini melakukan evaluasi eksperimental mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) pada jaringan *single-hop multi-node* LoRa, di mana *gateway* bertindak sebagai pengendali utama yang secara berurutan memberikan izin transmisi melalui perintah *START*. Pendekatan ini memungkinkan setiap *node* aktif hanya pada slot-nya, sehingga menghilangkan kemungkinan *collision*, meminimalkan konsumsi daya, serta menjaga efisiensi kanal.

Dengan platform eksperimental menggunakan *Arduino Mega* + LoRa E220-900T22D sebagai *gateway* dan *Arduino Uno* + LoRa E220-900T22D sebagai *node*, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan arsitektur komunikasi LoRa deterministik dan hemat energi untuk aplikasi IoT berskala menengah, serta memberikan landasan menuju pengembangan *multi-hop clustered* LoRa network yang lebih kompleks dan efisien di masa depan.

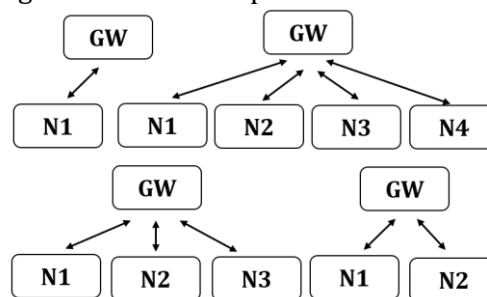
## 2. Metode

Bagian ini menjelaskan rancangan sistem, perangkat keras yang digunakan, mekanisme komunikasi, serta metode pengambilan dan pengolahan data.

### 2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis perangkat nyata untuk mengevaluasi performa jaringan LoRa *single-hop* dengan konfigurasi *gateway-node* menggunakan modul EBYTE E220-900T22D. Empat skenario pengujian dirancang untuk menganalisis

pengaruh jumlah *node* terhadap kinerja sistem, yaitu: (1) komunikasi dua arah antara satu *node* dan *gateway* (1:1), (2) komunikasi dua arah antara dua *node* dan *gateway* (2:1), (3) komunikasi dua arah antara tiga *node* dan *gateway* (3:1), serta (4) komunikasi dua arah antara empat *node* dan *gateway* (4:1). Gambar 1. menunjukkan topologi pengujian *single-hop* untuk skenario 1–4. Masing-masing skenario diuji pada jarak 10 m, 50 m, 100 m, dan 200 m secara berulang sebanyak tiga kali pengambilan data. *Gateway* melakukan proses *polling sequential* ke setiap *node* secara bergiliran untuk menghindari tabrakan paket.



Gambar 1. Topologi pengujian *single-hop* untuk skenario 1–4

### 2.2 Perangkat Keras

Perangkat yang digunakan terdiri atas: (1) *Gateway*: *Arduino Mega* 2560, modul LoRa E220-900T20D, tombol push button, sensor arus-tegangan INA219, modul microSD, dan LCD I<sup>2</sup>C 20×4, (2) *Node*: *Arduino Uno*, modul LoRa E220-900T22D, tombol push button, LCD I<sup>2</sup>C 16×2, dan sensor arus INA219, dan (3) catu daya baterai Li-Po 2 sel (7,4 V 1100 mAh).

### 2.3 Parameter Fisik LoRa pada Modul E220-900T22D

Modul LoRa EBYTE E220-900T22D tidak menyediakan akses langsung terhadap parameter fisik LoRa seperti *Spreading Factor* (*SF*), *Bandwidth* (*BW*), atau *Coding Rate* (*CR*). Berbeda dengan modul LoRa konvensional berbasis SX127x yang memungkinkan konfigurasi PHY melalui register, modul E220 menggunakan sistem LoRa tertutup (*proprietary*) di mana parameter PHY dipaketkan ke dalam pilihan *air data rate*.

Pada penelitian ini modul dikonfigurasi sebagai berikut *Wireless Air Data Rate*: 2.4 kbps, *Transmission Power*: 22 dBm, *Carrier Frequency*: 921.125 MHz (*Channel 71*), *Working Mode*: *Fixed Point Communication*, *Modulation*: *Chirp Spread Spectrum* (*CSS*) – berdasarkan spesifikasi EBYTE,

*Preamble Length: default module* (tidak diekspos).

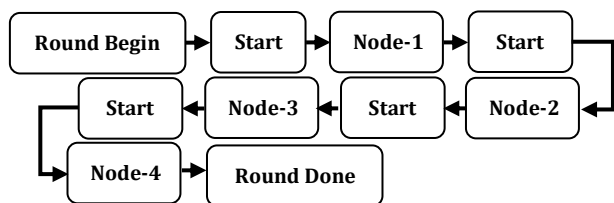
Menurut *datasheet Ebyte*, parameter *air data rate* menentukan kombinasi internal SF-BW-CR yang tidak dapat diubah langsung oleh pengguna dan tidak dipublikasikan secara detail. Oleh karena itu, parameter seperti SF, BW, dan CR tidak dinyatakan secara eksplisit dalam penelitian ini dan dianggap sebagai konfigurasi bawaan modul.

### 2.4 Alokasi Alamat dan Kanal

Setiap perangkat LoRa dikonfigurasi dalam *mode fixed addressing*. Alamat *gateway* ditetapkan 0x00.0x01, sedangkan *node-1* hingga *node-4* menggunakan alamat 0x00.0x21 sampai 0x00.0x24. Semua perangkat dioperasikan pada kanal 71 (frekuensi 921,125 MHz) yang sesuai dengan izin ISM band 920-923 MHz di Indonesia.

### 2.5 Skema Pengiriman Data

Sistem komunikasi LoRa yang dikembangkan menggunakan mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)*, yaitu bentuk akses kanal terpusat di mana *gateway* berperan sebagai pengendali utama (*master scheduler*) yang memicu aktivitas komunikasi setiap *node* secara berurutan melalui perintah *START*. Gambar 2. memperlihatkan urutan komunikasi dalam satu *round gateway-node* menggunakan skema GPSA.



Gambar 2. Ilustrasi mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)*

Dalam mekanisme ini, *gateway* mengawali satu siklus komunikasi (disebut *round*) dengan pesan *ROUND\_BEGIN*, kemudian memberikan perintah *START* kepada satu *node* pada suatu waktu. *Node* yang menerima perintah tersebut diizinkan untuk mengirimkan paket data berupa PING (berisi data sensor atau status) dan NPWR (data konsumsi daya). Setelah *gateway* menerima paket, ia mengirimkan balasan (ACK) dan mencatat parameter komunikasi seperti *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* dan *Round Trip Time (RTT)*.

Apabila dalam waktu tunggu tertentu (*slot timeout*) tidak ada respons dari *node*, *gateway* akan melakukan *retry* sebelum berpindah ke *node* berikutnya. Proses ini diulang hingga seluruh *node* dalam satu *round* telah dipanggil, kemudian *gateway* menandai akhir siklus dengan pesan *ROUND\_DONE*. Mekanisme GPSA ini memastikan bahwa hanya satu *node* yang aktif pada satu waktu sehingga menghilangkan potensi tabrakan paket (*collision*) pada kanal LoRa yang bersifat *shared medium*. Dengan demikian, sistem ini lebih efisien dibandingkan skema pure ALOHA, yang mengizinkan semua *node* mengirim secara acak tanpa koordinasi.

### 2.6 Skema Pengiriman Data

Seluruh hasil komunikasi antara *gateway* dan *node* direkam secara otomatis dalam *file log* berformat *Comma-Separated Values (CSV)* di kartu microSD yang terpasang pada *gateway*. Format ini dipilih karena mudah dibaca dan dapat langsung diolah menggunakan perangkat lunak analisis seperti Excel atau MATLAB. Setiap baris data dalam log merepresentasikan satu kejadian komunikasi (*event*) dan terdiri atas beberapa kolom utama. Format data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga kelompok utama yang merepresentasikan proses komunikasi dan pemantauan daya secara lengkap.

#### 2.6.1 Log Komunikasi (Umum):

Format ini mencatat seluruh aktivitas komunikasi antar perangkat, mulai dari inisiasi *round*, pengiriman perintah *START*, hingga penerimaan balasan *PING* dan penutupan siklus *ROUND\_DONE*.

time\_ms, node\_id, msg\_type, seq, rssi\_dbm, rtt\_ms, status .....(1)

Dimana *time\_ms* adalah waktu pencatatan dalam mili detik sejak sistem *gateway* mulai aktif, *node\_id* adalah identitas *node* pengirim atau penerima data, *msg\_type* adalah jenis pesan yang dikirimkan, misalnya *CHK\_ACK*, *START*, *PING*, *ROUND\_BEGIN*, dan *ROUND\_DONE*, *seq* adalah nomor urut paket komunikasi (sequence number), *rssi\_dbm* adalah nilai *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* yang menunjukkan kekuatan sinyal LoRa yang diterima dalam dBm, *rtt\_ms* adalah *Round Trip Time (RTT)* atau waktu tunda bolak-balik antara pengiriman dan penerimaan paket, dalam milidetik, dan Status

adalah status hasil komunikasi dapat dinyatakan dalam OK, RETRY, atau FAIL), misalnya: 95457,21,PING,0,-69,760,OK

**2.6.2 Log Daya Gateway (GWPWR)**

Format data ini digunakan untuk menganalisis efisiensi energi gateway selama proses pengendalian komunikasi dan logging.

time\_ms,0,GWPWR,vavg,iavg, ipk, E=., IpK=....(2)

Dimana time\_ms adalah waktu pencatatan oleh gateway, node\_id = 0 menandakan data berasal dari gateway itu sendiri, GWPWR adalah jenis pesan untuk pencatatan daya gateway, vavg (mV) adalah tegangan rata-rata pada gateway selama satu round, iavg (mA) adalah arus rata-rata yang dikonsumsi gateway, E (mJ) adalah energi total yang dikonsumsi gateway dalam satu siklus komunikasi (round), dan IpK (mA) adalah arus puncak tertinggi yang tercatat pada sensor INA219 di gateway. Format data seperti berikut:95735,0,GWPWR,64,7651,104,E=449,IpK=105

**2.6.3 Log Daya Node (NPWR)**

Log daya node berfungsi untuk mengukur efisiensi energi di sisi node, yang kemudian dapat digunakan untuk menghitung daya rata-rata, energi per transmisi, serta estimasi umur baterai sistem.

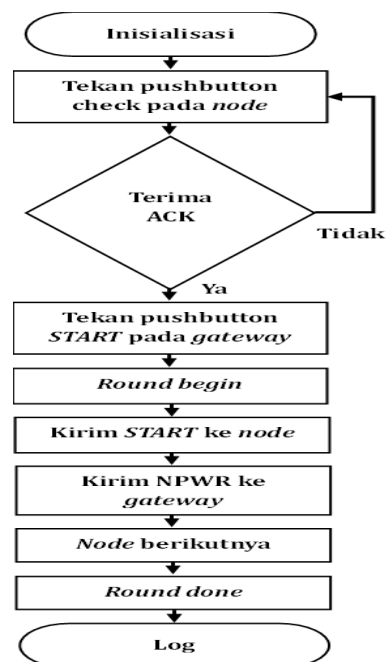
time\_ms, node\_id, NPWR, seq, vavg, iavg, E=..., IpK=..., n=... .....(3)

Dimana time\_ms adalah waktu pencatatan di gateway saat laporan diterima, node\_id adalah identitas node pengirim (contoh: Node 21), NPWR adalah jenis pesan yang berisi laporan daya dari node, seq adalah nomor urut laporan daya, dikaitkan dengan paket PING yang dikirim sebelumnya, vavg (mV) adalah tegangan rata-rata yang diukur oleh sensor INA219 di node, iavg (mA) adalah arus rata-rata konsumsi node selama transmisi, E (mJ) adalah energi total yang dikonsumsi node pada saat satu transaksi komunikasi (PING-ACK), IpK (mA) adalah arus puncak maksimum selama aktivitas transmisi LoRa, n adalah jumlah sampel pengukuran yang dikirim (biasanya 1 per siklus). Format data yang ditampilkan seperti contoh berikut: 96342,21,NPWR,0,7520,216,E=16,IpK=216,n=1

**2.7 Pembuatan Program**

Pemrograman sistem dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan kombinasi komunikasi serial dan antarmuka I<sup>2</sup>C. Gateway menggunakan Serial1 untuk komunikasi dengan modul LoRa E220, serta Wire (I<sup>2</sup>C) untuk modul LCD 20×4 dan sensor arus-tegangan INA219. Sementara itu, setiap Node menggunakan Software Serial untuk komunikasi LoRa, serta membaca data sensor DHT22 dan INA219 untuk pemantauan daya.

Sebelum proses utama dimulai, dilakukan tahap inialisasi dan tes koneksi untuk memastikan hanya node yang aktif dan terhubung dengan gateway yang akan dilibatkan dalam proses round polling. Pada tahap ini, setiap node memiliki push button koneksi, yang bila ditekan akan mengirimkan pesan check (CHK) ke gateway. Gateway akan membalas dengan ACK:CHK sebagai tanda koneksi berhasil. Node yang telah menerima ACK akan menampilkan status “ON” pada LCD, sedangkan yang belum terhubung tetap “OFF”.



Gambar 3. Diagram alur komunikasi dua arah antara gateway dan node

Setelah seluruh node aktif, operator menekan push button START pada gateway untuk memulai satu siklus komunikasi (round). Proses berikut kemudian berlangsung secara berurutan dan dikendalikan sepenuhnya oleh gateway: Gateway mengirimkan perintah START ke node pertama (misalnya Node 21). Node menerima START, membaca sensor DHT22 dan

INA219, kemudian mengirimkan paket PING berisi data sensor ke *gateway*. *Gateway* mencatat waktu respons (RTT) serta RSSI, lalu menunggu laporan konsumsi daya (NPWR) dari *node* tersebut. *Node* mengirimkan NPWR yang berisi tegangan, arus, energi, dan arus puncak (I<sub>pk</sub>) yang diukur. Setelah laporan daya diterima, *gateway* melanjutkan perintah *START* ke *node* berikutnya (*Node* 22, 23, 24, dst.) Proses ini berulang hingga seluruh *node* aktif menyelesaikan siklus komunikasi. *Gateway* kemudian mencatat *ROUND\_DONE* dan *GWPWR*, menyimpan semua data ke kartu microSD.

Dengan demikian, setiap *round* komunikasi menghasilkan satu set data lengkap yang terdiri dari aktivitas kontrol komunikasi (*START*, PING, ACK, NPWR), Parameter waktu (RTT dan timestamp), Kualitas sinyal (RSSI), serta Konsumsi energi (E dan I<sub>pk</sub>) baik di *gateway* maupun di *node*. Mekanisme kerja ini memastikan komunikasi berlangsung berurutan dan bebas tabrakan, karena setiap *node* hanya aktif setelah menerima perintah *START* dari *gateway*. Gambar 3. menunjukkan diagram alur komunikasi dua arah antara *gateway* dan *node*, mulai dari inisialisasi, uji koneksi, *round begin*, hingga pencatatan data log.

## 2.8 Implementasi dan Pengujian Alat

Implementasi sistem dilakukan dengan merakit seluruh perangkat sesuai rancangan pada bagian sebelumnya, yang terdiri atas 1 *gateway* dan hingga 4 *node*. *Gateway* menggunakan *Arduino Mega* dengan modul LoRa E220-900T22D, LCD I<sup>2</sup>C 20×4 untuk menampilkan status sistem, sensor arus-tegangan INA219 untuk pengukuran konsumsi daya, serta modul microSD untuk logging data. Setiap *node* terdiri atas *Arduino Uno*, modul LoRa E220-900T22D, tombol *push button* (untuk koneksi, serta sensor INA219 untuk memantau konsumsi daya selama transmisi.

### 2.8.1 Prosedur Implementasi

Sebelum pengujian utama, dilakukan *bench test* untuk memastikan seluruh fungsi berjalan, meliputi komunikasi serial antara modul LoRa, pembacaan sensor, tampilan LCD, dan pencatatan data ke microSD. Setiap *node* terlebih dahulu melakukan tes koneksi dengan *gateway* melalui tombol koneksi. *Node* yang berhasil mendapat balasan ACK dari *gateway* akan dinyatakan aktif (ON), dan hanya *node-*

*node* aktif tersebut yang akan diikutsertakan dalam proses *round* komunikasi.

Setelah semua *node* siap, tombol *START ROUND* pada *gateway* ditekan untuk memulai siklus pengujian. *Gateway* kemudian mengirimkan perintah *START* ke setiap *node* secara berurutan (*Node*-21 → *Node*-22 → *Node*-23 → *Node*-24). Setiap *node* yang menerima perintah *START* akan membaca sensor INA219 untuk log daya lokal, mengirimkan paket PING berisi data sensor ke *gateway*, mengirimkan log daya (NPWR) yang memuat nilai tegangan (V<sub>avg</sub>), arus (I<sub>avg</sub>), energi (E), dan arus puncak (I<sub>pk</sub>). *Gateway* mencatat waktu, kekuatan sinyal (RSSI), waktu tunda (RTT), serta konsumsi daya dari sensor INA219 di *gateway*, kemudian menyimpannya dalam file CSV. Setelah proses satu *node* selesai, *gateway* berpindah ke *node* berikutnya sampai seluruh *node* dalam *round* aktif selesai, dan menutup siklus dengan mencatat *ROUND\_DONE*.

### 2.8.2 Skenario dan Kondisi Pengujian

Pengujian dilakukan dalam empat skenario sesuai jumlah *node* aktif yaitu skenario-1: 1 *node* aktif (*Gateway* ↔ *Node*-21), skenario-2: 2 *node* aktif (*Gateway* ↔ *Node*-21, *Node*-22), Skenario-3: 3 *node* aktif (*Gateway* ↔ *Node*-21, *Node*-22, *Node*-23), skenario-4: 4 *node* aktif (*Gateway* ↔ *Node*-21, *Node*-22, *Node*-23, *Node*-24).

Setiap skenario diuji pada jarak komunikasi 10 m, 50 m, 100 m, dan 200 m di area terbuka tanpa halangan, dengan kondisi *visibilitas line-of-sight* (LOS). Seluruh data hasil komunikasi disimpan otomatis dalam *file log* berekstensi .CSV di microSD *gateway*.

## 2.9 Pengolahan dan Analisis Data

Setelah seluruh proses pengujian dilakukan pada empat skenario komunikasi (1–4 *node*) dengan variasi jarak 10 m, 50 m, 100 m, dan 200 m, seluruh data yang dihasilkan secara otomatis direkam oleh *gateway* dalam bentuk *file log* berformat .CSV. Data tersebut memuat parameter hasil pengukuran yang terdiri atas jenis pesan komunikasi (PING, ACK, *START*, *ROUND\_BEGIN*, *ROUND\_DONE*), kekuatan sinyal (RSSI), waktu tunda komunikasi (RTT), status paket, serta informasi konsumsi daya dari *gateway* (*GWPWR*) dan *node* (NPWR).

Langkah pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu klasifikasi data dimana setiap log dipisahkan

berdasarkan skenario pengujian dan jarak pengujian, kemudian dikelompokkan berdasarkan jenis pesan untuk memudahkan analisis komunikasi dan konsumsi daya. Perhitungan statistik, dilakukan perhitungan rata-rata nilai RSSI dan RTT untuk setiap *node* dan jarak. Selain itu, dihitung pula *Packet Delivery Ratio* (PDR) berdasarkan perbandingan jumlah paket yang berhasil diterima (OK) terhadap total paket yang dikirim. Analisis energi, nilai energi (E) dan arus puncak (I<sub>pk</sub>) yang tercatat pada log GWPWR digunakan untuk menghitung konsumsi energi *gateway* per siklus komunikasi (*round*). Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan data NPWR untuk menilai efisiensi energi di sisi *node*. Visualisasi data, hasil pengolahan data ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik hubungan antara jarak, jumlah *node*, dan parameter kinerja (RSSI, RTT, PDR, serta energi *gateway*).

Parameter utama yang dievaluasi dalam penelitian ini meliputi energi total *gateway* (mJ) yang diperoleh dari hasil pengukuran sensor INA219 pada *gateway* dan merepresentasikan konsumsi energi total setiap siklus komunikasi. Rata-rata RTT (ms) yang menunjukkan waktu perjalanan bolak-balik antara pengiriman paket oleh *gateway* dan penerimaan balasan dari *node*. RSSI rata-rata (dBm) yang menggambarkan kekuatan sinyal yang diterima *gateway* dari setiap *node*. PDR (%), merupakan perbandingan jumlah paket berhasil diterima dengan total paket yang dikirim selama pengujian. Parameter-parameter ini menjadi dasar untuk menganalisis pengaruh jumlah *node* dan jarak komunikasi terhadap efisiensi energi, kestabilan waktu respons, serta keandalan sistem jaringan LoRa berbasis mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA).

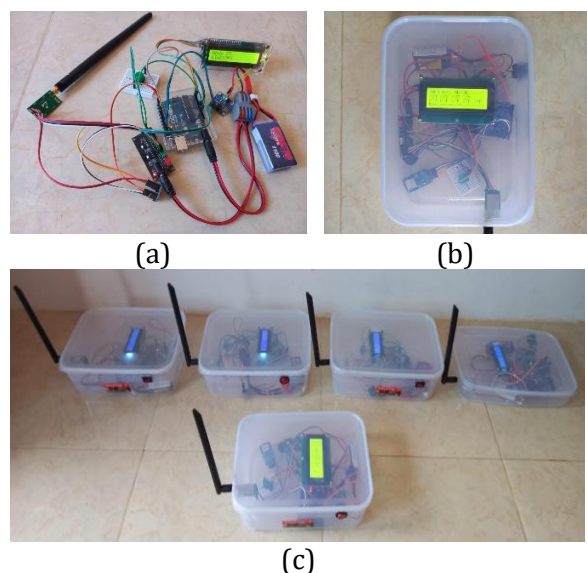
Data hasil pengolahan kemudian digunakan sebagai acuan dalam analisis performa jaringan LoRa, untuk menilai sejauh mana peningkatan jumlah *node* dan jarak komunikasi memengaruhi efisiensi energi, latensi transmisi, serta reliabilitas pengiriman paket pada keseluruhan sistem.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Implementasi Sistem

Perancangan sistem dilakukan dengan merakit perangkat *gateway* dan *node-node* LoRa sesuai konfigurasi rancangan penelitian. *Gateway* menggunakan *Arduino Mega 2560* yang dihubungkan dengan modul LoRa E220-

900T22D, LCD I<sup>2</sup>C 20×4, *push button*, modul SD card, serta sensor arus-tegangan INA219 untuk pemantauan daya. Seluruh komponen terpasang pada papan prototipe dengan tata letak yang dioptimalkan untuk kestabilan komunikasi dan kemudahan pengamatan parameter selama pengujian. *Node-node* LoRa menggunakan *Arduino Uno* dengan modul E22-900T22D, *push button* (*connect* dan *test*), serta sensor INA219 yang mengukur konsumsi daya pada tiap *node*. Setiap *node* diberi alamat tetap (0x21-0x24) dan mendapat suplai dari baterai Li-Po 7,4 V 1100 mAh. Implementasi perangkat sistem komunikasi LoRa berbasis mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Implementasi perangkat sistem komunikasi LoRa berbasis mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA): (a) *Node* LoRa, (b) *Gateway*, (c) Konfigurasi lengkap pengujian.

Gambar 4(a) menampilkan rancangan *node* LoRa dengan sensor dan tombol uji koneksi yang digunakan pada setiap pengujian. Gambar 4(b) menunjukkan rangkaian fisik *gateway* lengkap dengan LCD dan SD card yang berfungsi menampilkan status dan menyimpan data log. Gambar 4(c) menampilkan 4 perangkat *node* dan 1 *gateway* yang siap diujicoba dilapangan.

Setelah seluruh perangkat fisik baik *node* maupun *gateway* selesai dirakit dan diuji fungsionalitasnya, tahap selanjutnya adalah pengujian lapangan untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik dalam kondisi lingkungan sebenarnya. Pengujian dilakukan di area terbuka untuk mengamati pengaruh jarak terhadap kualitas sinyal, waktu respons, serta konsumsi

daya sistem komunikasi LoRa yang dikembangkan.

Gambar 5 memperlihatkan proses pengujian lapangan di mana *gateway* ditempatkan pada posisi tetap sebagai pusat komunikasi, sementara *node-node* diletakkan secara bertahap pada jarak 10 meter, 50 meter, 100 meter, dan 200 meter dari *gateway*. Pengujian lapangan dilakukan untuk mengukur kinerja sistem komunikasi LoRa *single-hop* berbasis mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)* dalam kondisi nyata.



Gambar 5. Proses pengujian lapangan sistem LoRa

### 3.2 Analisis Mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)*

Setelah pengujian, data akan disimpan dalam *file log* berformat CSV. Untuk menggambarkan penerapan Format Data dan Logging yang digunakan dalam penelitian ini, berikut disajikan potongan *log file* hasil uji pada jarak 50 meter dengan empat *node* aktif. Data ini merekam urutan komunikasi dari *gateway* ke setiap *node (Node 21 - Node 24)* dalam satu siklus (*round*).

```
237357,24,CHK_ACK,0,-69,,OK
244765,0,ROUND_BEGIN,4,,OK
244802,21,START,1,,OK
245564,21,PING,9,-64,762,OK
245815,22,START,2,,OK
246452,21,NPWR,9,7520,216,E=16,Ipk=216,n=1
247599,22,START,2,,RETRY
248411,22,PING,6,-67,812,OK
248658,23,START,3,,OK
249357,22,NPWR,6,7632,226,E=17,Ipk=226,n=1
250443,23,START,2,,RETRY
251255,23,PING,3,-61,812,OK
251504,24,START,4,,OK
252203,23,NPWR,3,7940,224,E=17,Ipk=224,n=1
```

```
253288,24,START,2,,RETRY
254107,24,PING,0,-68,819,OK
254358,0,ROUND_DONE,0,,OK
254393,0,GWPWR,918,7629,140,E=9234,Ipk=260
255057,24,NPWR,0,8100,224,E=18,Ipk=224,n=1
```

Pada pengujian ini, sistem komunikasi LoRa berbasis *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)* berhasil berjalan dengan baik tanpa kehilangan paket. Berdasarkan hasil *log* komunikasi, proses pengujian diawali dengan pesan *CHK\_ACK* dari *Node 24*, yang menunjukkan bahwa proses sinkronisasi awal antara *node* dan *gateway* telah berhasil. Selanjutnya *gateway* menginisiasi satu siklus komunikasi (*roundpolling*) dengan mengirimkan perintah *ROUND\_BEGIN*, kemudian secara berurutan mengaktifkan *Node 21, 22, 23, dan 24* melalui perintah *START*. Setiap *node* yang menerima perintah tersebut segera mengirimkan paket *PING* ke *gateway*, menunggu balasan, lalu mengirimkan laporan daya *NPWR* yang berisi hasil pengukuran sensor *INA219* berupa tegangan, arus rata-rata, energi, dan arus puncak.

Dari data *log* yang terekam, *Node 21* mengirimkan paket *PING* dengan nilai *RSSI* sebesar  $-64$  dBm dan *Round Trip Time (RTT)* sebesar 762 ms, diikuti laporan daya dengan konsumsi energi sebesar 16 mJ dan arus puncak 216 mA. *Node 22* menunjukkan hasil *RSSI*  $-67$  dBm, *RTT* 812 ms, dan energi 17 mJ, sedangkan *Node 23* memiliki *RSSI*  $-61$  dBm, *RTT* 812 ms, serta energi 17 mJ. *Node 24* sebagai *node* terakhir mencatat *RSSI*  $-68$  dBm, *RTT* 819 ms, dan energi 18 mJ. Seluruh *node* berhasil merespons *gateway* dengan status "OK", menunjukkan bahwa tidak terjadi kegagalan pengiriman (*packet loss*) selama pengujian ini.

Setelah semua *node* menyelesaikan transmisinya, *gateway* mencatat data *GWPWR* dengan total konsumsi energi sebesar 9.234 mJ ( $\approx 9,23$  J) dan arus puncak sebesar 260 mA. Nilai ini mencerminkan kebutuhan daya *gateway* untuk menjalankan seluruh proses pengendalian komunikasi, pemrosesan data, dan pencatatan *log* ke kartu SD. Secara keseluruhan, nilai *RSSI* berkisar antara  $-61$  hingga  $-69$  dBm yang menunjukkan kualitas sinyal masih sangat baik dan stabil pada jarak 50 meter di ruang terbuka. Nilai *RTT* yang relatif konstan antara 760–820 ms memperlihatkan bahwa waktu tunda sistem berada dalam batas wajar untuk komunikasi berbasis *LoRa point-to-multipoint*.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa mekanisme *sequential polling* yang diterapkan pada sistem mampu mengatur akses kanal secara efisien dan mencegah terjadinya tabrakan paket (*collision*). *Node* tidak mengirimkan data secara acak, tetapi menunggu instruksi langsung dari *gateway*. Hal ini menjadi pembeda utama antara GPSA dan TDMA konvensional, dimana slot waktu dibagi berdasarkan waktu global. Selain itu, hasil *log* menunjukkan bahwa semua *node* berhasil merespons dengan status OK, tanpa kehilangan paket, yang membuktikan efisiensi mekanisme *polling* ini dalam mencegah tabrakan paket (*collision-free communication*). Nilai RSSI yang berkisar antara -61 hingga -69 dBm menunjukkan kualitas sinyal masih sangat baik, sedangkan nilai RTT antara 760-820 ms menunjukkan waktu tunda sistem berada dalam batas wajar untuk jaringan LoRa multi-*node*.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) yang diterapkan dalam penelitian ini mampu menjaga kestabilan komunikasi antar *node*, meminimalkan *collision*, dan mempertahankan efisiensi energi dengan konsumsi daya *node* yang relatif rendah (16-18 mJ per siklus).

### 3.3 Analisis Data Eksperimen

Setelah seluruh pengujian dilakukan dan data *log* dari setiap skenario berhasil dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan dan analisis terhadap hasil pengukuran. Data yang diperoleh dari *gateway* dan *node* diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata RSSI, RTT, *Packet Delivery Ratio* (PDR), serta total konsumsi energi *gateway* pada berbagai jarak pengujian (10 m, 50 m, 100 m, dan 200 m).

Hasil pengolahan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel rekapitulasi serta grafik perbandingan untuk setiap parameter seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Nilai Rata-rata RSSI dan RTT terhadap jarak dan jumlah *node*

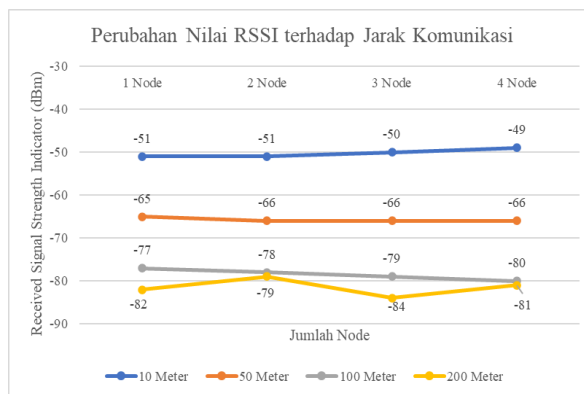
Jarak Gateway - Node	RSSI rata-rata (dBm)				Rata-rata RTT (ms)			
	1 Node	2 Node	3 Node	4 Node	1 Node	2 Node	3 Node	4 Node
10 Meter	-51	-51	-50	-49	764	789	796	800
50 Meter	-65	-66	-66	-66	761	789	796	802
100 Meter	-77	-78	-79	-80	764	788	796	803
200 Meter	-82	-79	-84	-81	764	788	793	800

Tabel 1 menampilkan hasil rata-rata *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan

*Round Trip Time* (RTT) untuk berbagai konfigurasi jumlah *node* (1-4 *node*) pada jarak komunikasi 10, 50, 100, dan 200 meter. Nilai RSSI menunjukkan kekuatan sinyal yang diterima oleh *gateway* dari masing-masing *node*, sedangkan RTT merepresentasikan waktu tunda bolak-balik antara pengiriman dan penerimaan paket.

#### 3.3.1 RSSI Rata-rata (dBm)

Gambar 6 menunjukkan tren penurunan RSSI seiring bertambahnya jarak komunikasi antara *gateway* dan *node*. Pada jarak 10 meter, nilai RSSI rata-rata berada di sekitar -50 dBm, menurun menjadi sekitar -66 dBm pada jarak 50 m, -78 dBm pada 100 m, dan -81 dBm pada 200 m. Penurunan sebesar 30 dB antara jarak 10 m dan 200 m ini masih tergolong wajar untuk sistem LoRa frekuensi 920-923 MHz di ruang terbuka. Nilai RSSI yang tetap di atas -90 dBm menunjukkan kualitas sinyal masih sangat baik dan komunikasi berlangsung stabil hingga 200 m. Selain itu, jumlah *node* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai RSSI karena setiap *node* berkomunikasi secara bergiliran (*sequential polling*), sehingga interferensi antar-*node* dapat dihindari.



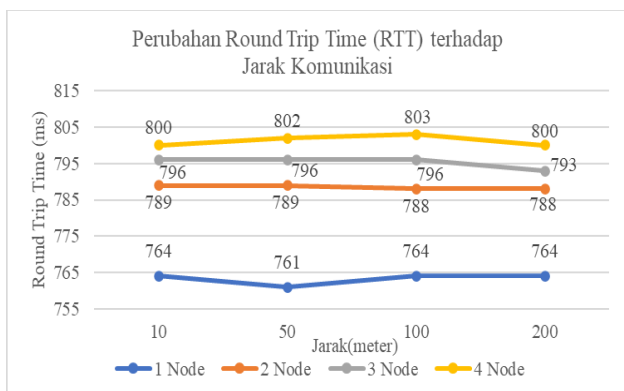
Gambar 6. Perubahan nilai RSSI terhadap jarak komunikasi dan jumlah *node*

#### 3.3.2 Rata-rata RTT (ms)

Gambar 7 memperlihatkan bahwa waktu tunda bolak-balik relatif konstan di seluruh skenario, dengan rata-rata 760-800 ms. Nilai RTT terkecil tercatat pada 1 *node* ( $\pm 764$  ms), sedangkan nilai tertinggi terjadi pada 4 *node* (sekitar 802 ms). Peningkatan ini disebabkan oleh penambahan waktu tunggu (*wait time*) akibat adanya lebih banyak siklus komunikasi yang harus diselesaikan oleh *gateway*. Secara umum, fluktuasi RTT sebesar  $\pm 40$  ms masih tergolong kecil dan menunjukkan bahwa sistem

mampu mempertahankan kestabilan waktu respons (*latency stability*) bahkan ketika jumlah *node* bertambah hingga empat perangkat.

Nilai RTT yang relatif tinggi (760–820 ms) disebabkan oleh beberapa factor, antara lain waktu proses internal modul E220, terutama pada mode *fixed addressing* yang memerlukan serial buffering ±150–200 ms, waktu pemrosesan Arduino (*gateway* dan *node*) untuk membaca sensor INA219 dan DHT22 sebelum mengirimkan PING, panjang paket *START-PING-ACK* yang memerlukan interval jeda antarpaket (*inter-frame spacing*), dan tidak adanya sinkronisasi global, sehingga *gateway* memberi toleransi *delay* untuk memastikan *node* merespons secara stabil. RTT tinggi tersebut bersifat deterministik dan justru menunjukkan stabilitas sistem.



Gambar 7. Perubahan *Round Trip Time* (RTT) terhadap jarak komunikasi dan jumlah *node*

Tabel 2 menyajikan nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) dan total energi konsumsi *gateway* dalam satu siklus komunikasi (*round*). PDR menunjukkan tingkat keberhasilan transmisi data antara *node* dan *gateway*, sedangkan energi total *gateway* diukur dari sensor INA219 untuk menggambarkan efisiensi daya selama proses komunikasi berlangsung.

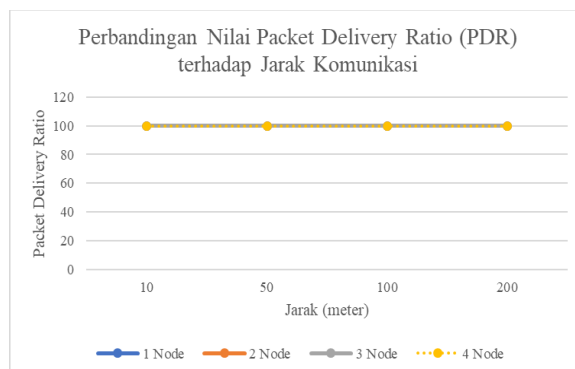
Tabel 2. Rekapitulasi nilai PDR dan energi total *Gateway* pada berbagai jarak dan jumlah *node*

Jarak Gateway - Node	PDR (%)				Energi total Gateway (mJ)			
	1 Node	2 Node	3 Node	4 Node	1 Node	2 Node	3 Node	4 Node
10 Meter	100	100	100	100	448	3374	6370	9410
50 Meter	100	100	100	100	456	3381	6376	9366
100 Meter	100	100	100	100	448	3366	6923	9221
200 Meter	100	100	100	100	448	3361	6319	9223

### 3.3.3 Packet Delivery Ratio (PDR, %)

Gambar 8 memperlihatkan perubahan nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) terhadap jarak

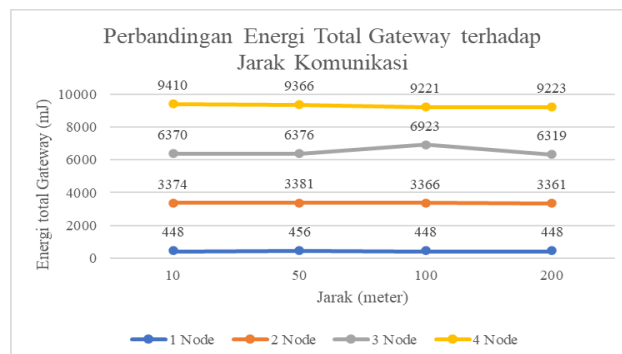
komunikasi dan jumlah *node* yang aktif. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh skenario, baik pada jarak 10, 50, 100, maupun 200 meter dengan jumlah *node* 1 hingga 4, menunjukkan nilai PDR konstan sebesar 100%. Hal ini berarti seluruh paket data yang dikirim dari *gateway* ke *node* dan dikembalikan ke *gateway* (melalui PING-ACK) berhasil diterima tanpa kehilangan (*packet loss*). Nilai PDR yang stabil ini membuktikan bahwa mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)* yang diterapkan mampu menghindari tabrakan paket (*collision*) karena *gateway* secara bergantian memberikan akses kepada setiap *node* secara terjadwal. Dengan demikian, kanal komunikasi LoRa dapat dimanfaatkan secara efisien dan reliabel bahkan pada kondisi multi-*node* hingga empat *node* aktif dalam satu siklus komunikasi.



Gambar 8. Perbandingan nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) terhadap jarak komunikasi dan jumlah *node*

### 3.3.4 Konsumsi Energi Gateway

Konsumsi energi total *gateway* terhadap jarak dan jumlah *node* diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan energi total *Gateway* terhadap jarak komunikasi dan jumlah *node*

Gambar 9 menunjukkan tren konsumsi energi total *gateway* terhadap jarak dan jumlah *node*. Terlihat bahwa konsumsi energi *gateway*

meningkat secara proporsional dengan bertambahnya jumlah *node* aktif, sementara jarak komunikasi tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap total energi. Pada jarak 10 meter, energi *gateway* meningkat dari 448 mJ untuk 1 *node* menjadi 9410 mJ untuk 4 *node*, sedangkan pada jarak 200 meter nilainya relatif tetap, yaitu antara 448 mJ hingga 9223 mJ. Peningkatan ini terjadi karena setiap tambahan *node* memerlukan satu slot komunikasi tambahan dalam satu *round* (START-PING-ACK-NPWR), yang berarti *gateway* harus tetap aktif lebih lama untuk menangani setiap *node* secara bergantian.

Dari hasil pengujian dan grafik analisis yang telah disajikan, dapat disimpulkan bahwa peningkatan jarak komunikasi menyebabkan penurunan nilai RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) secara proporsional, namun tidak memengaruhi kestabilan waktu tanggap sistem atau RTT (*Round Trip Time*) secara signifikan. Penambahan jumlah *node* dari satu hingga empat hanya memberikan sedikit peningkatan waktu tunda, karena mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) yang digunakan mampu mencegah terjadinya *collision* dan menjaga keteraturan komunikasi antar *node*. Dengan demikian, sistem LoRa yang dirancang terbukti mampu mempertahankan kualitas komunikasi yang stabil dan efisien hingga jarak 200 meter pada kondisi empat *node* aktif.

Selain itu, hasil analisis konsumsi energi menunjukkan bahwa jumlah *node* memiliki pengaruh dominan terhadap peningkatan energi total *gateway*, sedangkan jarak komunikasi dalam rentang 10–200 meter tidak memberikan perubahan signifikan pada beban daya. Hal ini menunjukkan bahwa modul LoRa E220 beroperasi dengan daya pancar yang konstan dan efisiensi transmisi tinggi pada jarak menengah. Energi *gateway* meningkat secara linier seiring bertambahnya jumlah *node*, karena setiap *node* memerlukan satu slot tambahan dalam satu siklus komunikasi (*round*).

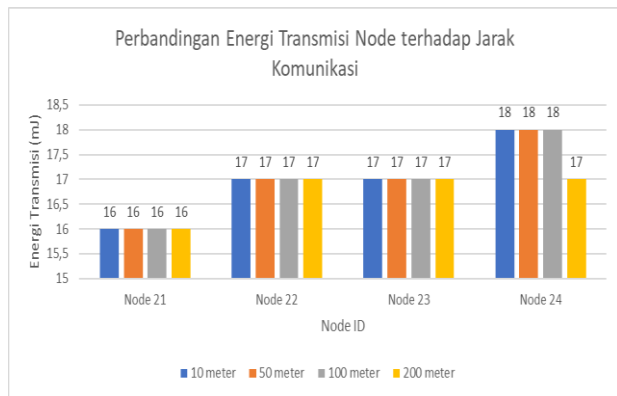
Secara keseluruhan, hasil pengujian menegaskan bahwa sistem LoRa berbasis GPSA yang dikembangkan tidak hanya mampu menjaga reliabilitas komunikasi (PDR = 100%) dan kestabilan waktu respons, tetapi juga menunjukkan efisiensi konsumsi daya yang baik. Temuan ini memperkuat potensi penerapan sistem pada jaringan IoT berskala menengah, khususnya aplikasi pemantauan nirkabel multi-

*node* yang membutuhkan operasi berdaya rendah dan komunikasi yang terjadwal.

### 3.4 Analisis Konsumsi Energi Node

Analisis konsumsi energi pada sisi *node* yang diperoleh dari hasil pengukuran data NPWR (*Node Power Report*) selama proses komunikasi LoRa berbasis mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA). Data NPWR berisi informasi tegangan rata-rata ( $V_{avg}$ ), arus rata-rata ( $I_{avg}$ ), serta energi total ( $E$ ) yang digunakan setiap *node* dalam satu siklus transmisi data (PING-ACK).

Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran energi transmisi rata-rata setiap *node* terhadap variasi jarak komunikasi 10–200 meter. Nilai energi diukur menggunakan sensor INA219 pada masing-masing *node* selama satu siklus transmisi (PING-ACK). Hasil pengujian memperlihatkan bahwa konsumsi energi tiap *node* relatif konstan di semua jarak yaitu *Node* 21 (16 mJ), *Node* 22 dan 23 (17 mJ), serta *Node* 24 (18 mJ). Nilai ini menunjukkan bahwa peningkatan jarak hingga 200 meter tidak memengaruhi secara signifikan kebutuhan energi transmisi, karena daya pancar modul LoRa E22/E220 bersifat tetap dan tidak menyesuaikan terhadap jarak komunikasi.



Gambar 10. Grafik energi transmisi *node* terhadap jarak komunikasi

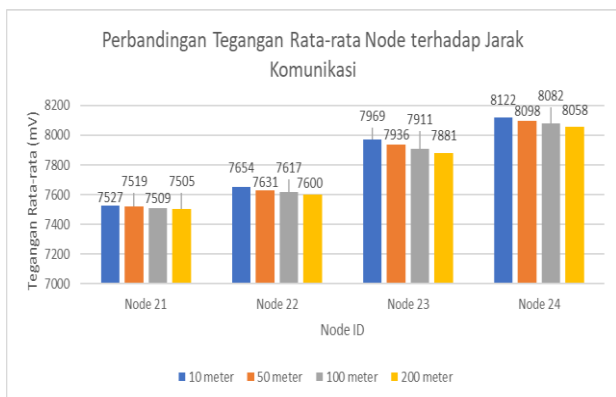
Model konsumsi energi transmisi *node* dapat direpresentasikan sebagai:

$$E = V_{avg} \times I_{avg} \times t_{tx} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan  $V_{avg} = 7.5-8.1$  V,  $I_{avg} = 216-226$  mA, dan  $t_{tx} \approx 0.8$  s, sehingga energi rata-rata per transaksi diperoleh sebesar 16–18 mJ, sesuai dengan hasil eksperimen.

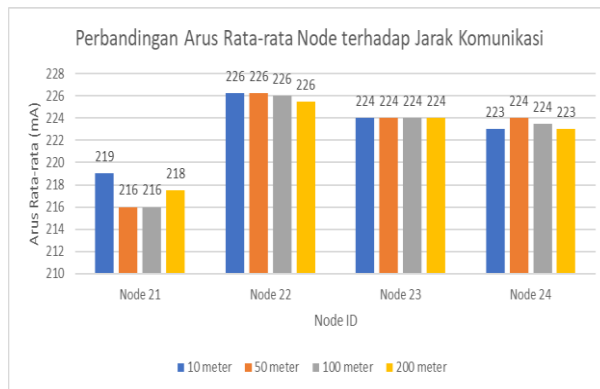
Gambar 11 menunjukkan perbandingan tegangan rata-rata ( $V_{avg}$ ) yang terukur pada

masing-masing *node* (*Node* 21–24) terhadap variasi jarak komunikasi (10–200 meter). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa setiap *node* mempertahankan tegangan operasi relatif stabil dalam rentang 7,5–8,1 volt, menandakan suplai daya dari sumber (regulator atau baterai) tetap konstan selama pengujian. *Node* dengan ID lebih tinggi (*Node* 23 dan *Node* 24) cenderung memiliki tegangan sedikit lebih besar, yaitu sekitar 7,9–8,1 V, dibandingkan *Node* 21 dan *Node* 22 yang berada pada 7,5–7,6 V. Stabilitas tegangan ini menunjukkan bahwa variasi jarak komunikasi tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan tegangan kerja karena setiap *node* hanya melakukan transmisi sesaat (berbasis *polling sequential*). Tegangan yang relatif tinggi pada *Node* 24 dapat diakibatkan oleh perbedaan jalur suplai atau variasi kecil pada sensor INA219.



Gambar 11. Grafik tegangan rata-rata *node* terhadap jarak komunikasi

Grafik pada Gambar 12 menunjukkan hubungan antara arus rata-rata (*I<sub>avg</sub>*) setiap *node* terhadap jarak komunikasi. Secara umum, arus rata-rata antar *node* berada pada kisaran 216–226 mA, dengan variasi yang sangat kecil antar jarak (10–200 meter). *Node* 22 menunjukkan nilai arus tertinggi, yaitu sekitar 226 mA pada semua jarak, sedangkan *Node* 21 memiliki arus terendah berkisar 216–219 mA. Nilai arus rata-rata yang relatif stabil pada berbagai jarak menunjukkan bahwa konsumsi daya transmisi *node* lebih banyak dipengaruhi oleh karakteristik modul dan beban internal daripada oleh jarak propagasi sinyal.



Gambar 12. Grafik arus rata-rata *node* terhadap jarak komunikasi

Secara keseluruhan, hasil pengukuran dari data NPWR (*Node Power Report*) menunjukkan bahwa seluruh *node* memiliki konsumsi energi yang relatif konstan pada berbagai jarak pengujian (10–200 meter). Energi transmisi tiap *node* berkisar antara 16–18 mJ per siklus, dengan variasi sangat kecil antar jarak, menandakan efisiensi modul LoRa E220 yang tetap stabil terhadap perubahan jarak komunikasi. Nilai tegangan rata-rata berada pada rentang 7,5–8,1 V, dan arus rata-rata antara 216–226 mA, menunjukkan bahwa beban daya yang dikonsumsi *node* lebih dipengaruhi oleh kondisi internal sistem (seperti posisi urutan polling, efisiensi regulator, dan akurasi sensor INA219) daripada faktor jarak propagasi sinyal. *Node* 24 menunjukkan konsumsi daya sedikit lebih tinggi karena menjadi *node* terakhir dalam siklus *polling*, sehingga aktif sedikit lebih lama sebelum *gateway* mengakhiri ronde komunikasi.

Berdasarkan konsumsi energi rata-rata sebesar 17 mJ per siklus dan durasi satu siklus komunikasi sebesar 1 detik, maka estimasi daya rata-rata tiap *node* sekitar 17 mW. Dengan suplai baterai Li-Po 7,4 V / 1100 mAh (kapasitas energi ≈ 29,3 kJ), maka satu *node* diperkirakan dapat beroperasi secara kontinu selama ±17 hari (≈ 410 jam) sebelum memerlukan pengisian ulang. Estimasi ini menunjukkan bahwa sistem LoRa berbasis *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) sangat efisien untuk aplikasi IoT lapangan berbasis baterai, karena *node* hanya aktif saat giliran transmisi dan berada dalam kondisi idle rendah di luar slotnya. Dengan demikian, mekanisme GPSA terbukti tidak hanya efektif dalam menghindari *collision*, tetapi juga mampu mempertahankan umur baterai yang panjang meskipun jumlah *node* meningkat hingga empat unit aktif secara simultan.

### 3.5 Kinerja Jaringan LoRa Berbasis Gateway-Polled Sequential Access (GPSA)

Hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) mampu menjaga stabilitas performa jaringan LoRa, baik dari sisi kualitas sinyal, waktu tunda komunikasi, maupun efisiensi energi pada berbagai skenario jumlah *node* dan jarak komunikasi hingga 200 meter. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *node* dari 1 hingga 4 menyebabkan kenaikan energi total pada *gateway* (dari ±448 mJ menjadi ±9,2 J per ronde) secara linear dan terkendali, menandakan bahwa sistem mampu mengelola tambahan beban komunikasi tanpa menurunkan efisiensi. Di sisi lain, energi per *node* yang tercatat melalui laporan NPWR tetap konstan pada rentang 16–18 mJ, memperlihatkan bahwa proses pengiriman data antar-*node* berlangsung dengan konsumsi daya yang stabil dan tidak terpengaruh oleh jarak komunikasi. Nilai RSSI yang hanya menurun sekitar 30 dB dari 10 m ke 200 m (−51 dBm → −82 dBm) masih berada pada batas penerimaan ideal modul E220, sedangkan RTT relatif konstan di kisaran 760–820 ms, menandakan kestabilan waktu respons sistem.

Nilai RTT yang relatif tinggi pada sistem GPSA dipengaruhi oleh beberapa faktor internal dan protokol. Pertama, modul LoRa E220 membutuhkan waktu pemrosesan internal (*serial buffering*) antara 150–200 ms untuk setiap paket *START*, *PING*, maupun *ACK*. Kedua, setiap *node* melakukan pembacaan sensor (INA219 dan DHT22) sebelum mengirimkan *PING*, yang menambah *processing delay* ±80–120 ms. Ketiga, terdapat jeda antarpaket (*inter-frame spacing*) sekitar 80–100 ms yang diperlukan untuk memastikan *gateway* tidak menerima paket tumpang tindih. Selain itu, struktur protokol GPSA sendiri mengandung beberapa *overhead*, yaitu rangkaian pesan *START* → *PING* → *ACK* → NPWR yang secara total dapat mencapai ±400–450 ms. Kombinasi faktor-faktor tersebut menghasilkan RTT total di kisaran 760–820 ms yang konsisten pada seluruh skenario.

Walaupun pengujian ini menggunakan hingga empat *node* aktif, mekanisme GPSA secara teoritis dapat diskalakan ke jumlah *node* lebih besar. Dengan rata-rata durasi satu transaksi *START*–*PING*–*ACK*–NPWR sebesar ±800 ms, maka *round time* untuk *N node* dapat diperkirakan sebagai:

$$T_{\text{round}} \approx N \times 0.8 \text{ detik} \dots\dots\dots(5)$$

Sehingga untuk 10 *node* diperlukan ±8 detik per round dan 20 *node* diperlukan waktu ±16 detik per round.

Dengan mempertimbangkan kapasitas komunikasi, keterbatasan energi *gateway*, dan toleransi *delay* aplikasi IoT periodik, GPSA praktis dapat menangani hingga 20–25 *node* sebelum total *latensi* per-round menjadi terlalu besar. Hal ini menunjukkan bahwa GPSA sangat sesuai untuk jaringan IoT skala kecil–menengah, namun kurang optimal untuk jaringan yang melibatkan puluhan hingga ratusan *node* tanpa mekanisme *clustering* atau *hierarchical polling*.

Jika dibandingkan dengan skema *pure ALOHA*, sistem GPSA menunjukkan keunggulan signifikan dalam efisiensi kanal dan keandalan komunikasi. Pada *pure ALOHA*, setiap *node* dapat mengirimkan data secara bebas tanpa koordinasi, sehingga *collision* sering terjadi dan menurunkan *Packet Delivery Ratio* (PDR). Dalam penelitian ini, PDR tercatat 100% pada seluruh skenario, membuktikan tidak adanya *collision* akibat mekanisme pengendalian terpusat oleh *gateway*. Dibandingkan dengan TDMA klasik, GPSA menawarkan implementasi yang lebih sederhana dan hemat daya karena tidak memerlukan sinkronisasi waktu global antar-*node*. Pada GPSA, pembagian waktu akses dilakukan secara deterministik melalui perintah *START* dari *gateway* sehingga setiap *node* hanya aktif ketika dipanggil dan tetap dalam *mode idle* pada waktu lainnya. Di sisi lain, mekanisme CSMA/CA membutuhkan proses *carrier sensing* yang boros energi dan tidak ideal pada kanal LoRa yang memiliki *airtime* panjang. Jika dibandingkan *LoRaWAN Class A*, GPSA lebih deterministik karena *LoRaWAN* mengandalkan *uplink* acak yang rentan *collision* pada kondisi trafik tinggi.

Selain itu, GPSA memiliki *overhead* protokol yang perlu diperhatikan. Setiap slot komunikasi *node* mencakup empat jenis pesan (*START*, *PING*, *ACK*, NPWR) dan jeda antar paket, menghasilkan total *overhead* ±400–450 ms sebelum data sensor diproses. Jumlah *overhead* meningkat proporsional terhadap jumlah *node* karena GPSA bekerja secara *sequential*. Walaupun *overhead* ini menambah total waktu *round*, mekanisme ini memastikan komunikasi bebas tabrakan (*collision-free*) dan deterministik, yang menjadi keunggulan utama GPSA dibanding ALOHA atau CSMA.

Namun demikian, sistem GPSA juga memiliki beberapa keterbatasan. Pola *polling* berurutan menyebabkan waktu total per-round meningkat linear terhadap jumlah *node*, sehingga *latensi* kumulatif sistem bertambah seiring bertambahnya *node* aktif. Hal ini membuat GPSA kurang sesuai untuk aplikasi *real-time* cepat (*sub-second*) atau sistem kontrol yang membutuhkan respons segera. Selain itu, *gateway* menjadi titik kegagalan tunggal (*single point of failure*); jika *gateway* bermasalah, seluruh jaringan berhenti beroperasi. Mekanisme *polling sequential* juga kurang efisien jika data hanya berubah sesekali (*event-based sensing*). GPSA tidak menyediakan sinkronisasi waktu antar-*node* sehingga sangat bergantung pada toleransi *delay* dan interval *on-demand* yang dikendalikan *gateway*. Dengan demikian, meskipun GPSA menawarkan efisiensi energi dan reliabilitas yang baik, sistem ini lebih tepat digunakan pada aplikasi pemantauan IoT periodik seperti pertanian, lingkungan, atau akuakultur, yang tidak menuntut *latensi* sangat rendah.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa arsitektur LoRa-GPSA menawarkan kompromi optimal antara keandalan, efisiensi energi, *latensi* yang dapat diprediksi, dan kesederhanaan implementasi. Mekanisme ini sangat layak diterapkan pada jaringan LoRa berskala menengah yang membutuhkan komunikasi deterministik tanpa *collision*, namun masih menyimpan peluang pengembangan melalui pendekatan *multi-hop*, *cluster-based polling*, atau *adaptive slot scheduling* untuk meningkatkan skalabilitas pada penelitian selanjutnya.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengevaluasi sistem komunikasi LoRa berbasis *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) pada jaringan *single-hop multi-node*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme GPSA mampu menyediakan akses kanal deterministik dan komunikasi bebas tabrakan, ditunjukkan oleh *Packet Delivery Ratio* (PDR) yang mencapai 100% pada seluruh variasi jumlah *node* (1-4) dan jarak komunikasi (10-200 meter). Nilai RSSI menurun secara wajar seiring bertambahnya jarak, sedangkan RTT tetap stabil pada kisaran 760-820 ms, menunjukkan konsistensi kinerja waktu tunda sistem.

Dari sisi konsumsi energi, setiap *node* menunjukkan penggunaan daya yang relatif konstan pada rentang 16-18 mJ per siklus, sementara konsumsi energi *gateway* meningkat secara linier terhadap jumlah *node* akibat penambahan slot komunikasi. Dengan kapasitas baterai 7,4 V/1100 mAh, *node* dapat beroperasi secara kontinu selama  $\pm 17$  hari, yang menegaskan efisiensi energi sistem dan kesesuaiannya untuk aplikasi IoT berbasis baterai.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa GPSA merupakan solusi komunikasi LoRa yang andal, hemat energi, dan sederhana diimplementasikan, sehingga layak diterapkan pada aplikasi IoT lapangan berskala kecil hingga menengah yang membutuhkan komunikasi periodik dan deterministik. Namun demikian, karakteristik *polling sequential* menyebabkan peningkatan *latensi* secara *linear* terhadap jumlah *node*, sehingga GPSA kurang optimal untuk aplikasi *real-time* cepat atau jaringan dengan jumlah *node* sangat besar.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Padang atas dukungan pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini melalui kontrak nomor 54/PL9.15/AL.04/2025. Dukungan institusi ini sangat berperan dalam keberhasilan pelaksanaan dan penyelesaian penelitian terkait evaluasi eksperimental mekanisme *Gateway-Polled Sequential Access* (GPSA) pada jaringan LoRa *multi-node* untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT).

#### Daftar Pustaka

- [1] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M., 2016. *A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things*. *Sensors*, Vol. 16, No. 9, p. 1466.
- [2] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M., 2016. *Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios*. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 23, No. 5, pp. 60-67.
- [3] Sneha, Malik, P., Das, S., & Inthiyaz, S., 2023. *Long-range technology-enabled smart communication: Challenges and comparison*. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 32, No. 10, p. 2350161.

- [4] Alexander, U., Bolshakov, I., Voskov, L., & Rolich, A., 2022. *Experimental LoRa network power consumption model using multi-hops*. in *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*: IEEE.
- [5] Nurgaliyev, M., Saymbetov, A., Yashchyshyn, Y., Kuttybay, N., & Tukymbekov, D., 2020. *Prediction of energy consumption for LoRa based wireless sensors network*. *Wireless Networks*, Vol. 26, No. 5, pp. 3507-3520.
- [6] Poursafar, N., Alahi, M. E. E., & Mukhopadhyay, S., 2017. *Long-range wireless technologies for IoT applications: A review*. in *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*: IEEE.
- [7] Chasserat, L., Accettura, N., & Berthou, P., 2020. *Short: Achieving energy efficiency in dense LORAWANS through TDMA*. in *2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*: IEEE.
- [8] Banti, K., Karampelias, I., Dimakis, T., Boulogeorgos, A.-A. A., Kyriakidis, T., & Louta, M., 2022. *LORAWAN communication protocols: A comprehensive survey under an energy efficiency perspective*. in *Telecom*, Vol. 3, No. 2: MDPI.
- [9] Chinchilla-Romero, N., Navarro-Ortiz, J., Muñoz, P., & Ameigeiras, P., 2021. *Collision avoidance resource allocation for LoRawan*. *Sensors*, Vol. 21, No. 4, p. 1218.
- [10] Beltramelli, L., Mahmood, A., Österberg, P., & Gidlund, M., 2020. *LoRa beyond aloha: An investigation of alternative random access protocols*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 5, pp. 3544-3554.
- [11] Wu, W., Li, Y., Zhang, Y., Wang, B., & Wang, W., 2019. *Distributed queueing-based random access protocol for LoRa networks*. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 763-772.
- [12] Nugraha, I. G. D., Ashadi, E. Z., & Efendi, A. M., 2024. *Performance evaluation of collision avoidance for multi-node LoRa networks based on tdma and csma algorithm*. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, Vol. 15, No. 1, pp. 53-74.
- [13] Tehrani, Y. H., Amini, A., & Atarodi, S. M., 2020. *A tree-structured LoRa network for energy efficiency*. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 6002-6011.
- [14] Tu, L.-T., Bradai, A., Pousset, Y., & Aravanis, A. I., 2021. *Energy efficiency analysis of LoRa networks*. *IEEE wireless communications letters*, Vol. 10, No. 9, pp. 1881-1885.
- [15] Chen, C., Lion, S., Jansang, A., Jaikaeo, C., Phonphoem, A., & Tangtrongpairaj, W., 2023. *Dynamic slot allocation protocol for multi-channel LoRa communication*. In *2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*: IEEE.