

Evaluasi Latensi, Jangkauan, dan Redundansi Jalur Komunikasi Multihop Menggunakan Modul NRF24L01

Evaluation of Latency, Range, and Path Redundancy in Multihop Communication Using the NRF24L01 Module

Dian Neipa Purnamasari*
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
dian.neipa@trunojoyo.ac.id

Adi Kurniawan Saputro
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
adi.kurniawan@trunojoyo.ac.id

Moch. Roziqul Barqi
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
210431100088@student.trunojoyo.ac.id

Puteri Nurul Ma'rifah
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
puteri.marifah@trunojoyo.ac.id

Achmad Ubaidillah Ms
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
ubaidillah.ms@trunojoyo.ac.id

Muttaqin Hardiwansyah
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
muttaqin.hardiwansyah@trunojoyo.ac.id

Diterima : Juli 2025
Disetujui : Januari 2026
Dipublikasi : Januari 2026

Abstrak— Penelitian ini berfokus pada evaluasi performa jaringan komunikasi nirkabel multihop menggunakan modul NRF24L01, khususnya pada aspek latensi, jangkauan, dan ketahanan redundansi jalur. Jaringan dirancang dengan 8 node (1 Tx dan 7 Rx) untuk mentransmisikan data. Waktu respon (latensi) diukur secara eksplisit menggunakan timestamp dari Real Time Clock (RTC) DS3231 yang tersinkronisasi antar node. Pengujian *performance-oriented* dilakukan pada tiga skenario utama: 1) Line of Sight (LoS) untuk mengukur jangkauan maksimal dan latensi dasar, 2) Non-Line of Sight (NLoS) untuk menguji dampak hambatan, dan 3) Pengujian Automatic Routing dan Redundansi Jalur untuk mengevaluasi kemampuan failover. Pada skenario LoS, komunikasi efektif mencapai 310 meter dengan latensi rata-rata 1.046 ms. Sedangkan pada skenario NLoS, komunikasi efektif hingga 33 meter dengan latensi rata-rata 763 ms. Analisis redundansi jalur menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan failover ketika node perantara dimatikan, meskipun menyebabkan peningkatan latensi murni lebih dari 800 ms pada jalur alternatif. Hasil ini mengkonfirmasi NRF24L01 dapat menyediakan koneksi multihop yang andal untuk aplikasi monitoring jarak jauh.

Kata Kunci— NRF24L01; Komunikasi Multihop; Latensi Jaringan; Ketahanan Jalur; LoS/NLoS.

Abstract— This research focuses on evaluating the performance of NRF24L01 module-based multihop wireless communication networks, specifically on latency, range, and path redundancy resilience. The network was designed with 8 nodes (1 sender and 7 router/receiver nodes) for data transmission. Response time (latency) is explicitly measured using synchronized timestamps from a Real Time Clock (RTC) DS3231 across all nodes. This performance-oriented study involved three main scenarios: 1)

Line of Sight (LoS) to measure maximum range and baseline latency, 2) Non-Line of Sight (NLoS) to test the impact of physical obstacles, and 3) Automatic Routing and Path Redundancy testing to evaluate the failover capability. In the LoS scenario, effective communication reached 310 meters with an average latency of 1,046 ms. Conversely, in the NLoS scenario, communication remained effective up to 33 meters with an average latency of 763 ms. The path redundancy analysis demonstrates that the system successfully performed a failover when an intermediate node was shut down, though it caused a net latency increase of more than 800 ms on the alternative path. These results confirm that NRF24L01 can provide reliable multihop connectivity suitable for long-distance monitoring applications.

Keywords— NRF24L01; Multihop Communication; Network Latency; Path Redundancy; LoS/NLoS.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel telah mendorong pemanfaatan *Wireless Sensor Network* (WSN) secara luas dalam berbagai bidang, mulai dari pemantauan lingkungan hingga sistem kontrol otomatis. Salah satu tantangan utama dari WSN adalah bagaimana menyampaikan data dari node sensor ke pusat kendali secara efisien, terutama pada area luas yang tidak memungkinkan penggunaan komunikasi satu arah. Dalam konteks ini, komunikasi multihop menjadi solusi penting yang memungkinkan data dikirim melalui beberapa node perantara, sehingga memperluas jangkauan jaringan dan mengurangi konsumsi daya.

Komunikasi multihop menawarkan sejumlah keunggulan, seperti perluasan area jangkauan, fleksibilitas topologi, dan efisiensi energi. Namun, penggunaan multihop

juga menghadirkan tantangan, terutama dalam hal kecepatan respon node, yaitu waktu yang dibutuhkan sebuah node untuk menerima, memproses, dan meneruskan data ke node berikutnya. Ketepatan dan kecepatan respon ini menjadi krusial, terutama dalam sistem monitoring yang memerlukan pengiriman data secara real-time atau near real-time. Keterlambatan pengiriman akibat banyaknya node perantara atau kondisi lingkungan seperti penghalang fisik dapat menurunkan performa sistem secara keseluruhan.

Modul NRF24L01 merupakan salah satu perangkat komunikasi nirkabel berbasis frekuensi 2.4 GHz yang banyak digunakan dalam sistem WSN karena konsumsi daya rendah, harga terjangkau, serta kompatibilitas tinggi dengan mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32. Modul ini mendukung komunikasi multihop dengan bantuan protokol tambahan dan memungkinkan transmisi data hingga ratusan meter, baik dalam kondisi Line of Sight (LoS) maupun Non-Line of Sight (NLoS).

Beberapa penelitian telah mengkaji performa NRF24L01 dalam berbagai skenario. Purwanto dkk [1] menunjukkan bahwa penggunaan node bridge dapat mengurangi packet loss hingga 6% pada kondisi NLoS. Handoko dkk [2] menerapkan enkripsi LED pada WSN dengan NRF24L01 dan mempertahankan latensi rendah. Corida dkk [3] mengembangkan sistem pemanggil perawat dan berhasil mempertahankan komunikasi hingga 100 meter dengan latensi rata-rata 71 ms. Firman Hutabarat dkk [4] mencatat latensi 9,6 ms dan packet loss 20% dalam skenario multi-hop dengan database lokal. Fikri S. Fahmi dkk [5] menggunakan NRF24L01 dalam pengendalian valve vessel separator dan berhasil menjaga efisiensi komunikasi. Penelitian lainnya oleh Kevin Pratama [6], Yusriansyah [7], Ngurah Desnanjaya [8], Pratama [9], Pandoju dan Saragih [10], serta pustaka [11-18] memperlihatkan bahwa modul NRF24L01 dapat bekerja secara stabil dalam berbagai aplikasi, meskipun tantangan seperti interferensi sinyal dan latensi tetap perlu diperhatikan.

Meskipun studi-studi sebelumnya telah mengkaji stabilitas dan latensi NRF24L01 dalam aplikasi spesifik [3, 5] dan skenario multihop dengan packet loss [1, 4], fokus kajian umumnya terbatas pada latensi multi-hop dengan jumlah node atau jarak yang minim [4, 8]. Secara kritis, belum terdapat analisis performa komprehensif yang secara sistematis membandingkan dan mengevaluasi dua metrik krusial: 1) Kinerja response time (latensi) NRF24L01 pada batas jangkauan jarak jauh (LoS hingga >300 meter dan NLoS) dan 2) Efisiensi mekanisme automatic routing multihop dalam memilih jalur tercepat dan mengatasi pemutusan jalur (redundansi). Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan berfokus pada pengukuran kecepatan respon node, tingkat keberhasilan komunikasi pada batas jangkauan ekstrem, dan stabilitas jaringan ketika terjadi kegagalan jalur.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa komunikasi multihop berdasarkan kecepatan respon antar node menggunakan modul NRF24L01. Pengujian dilakukan dalam kondisi LoS dan NLoS dengan berbagai skenario jumlah node dan jarak. Fokus utama diarahkan pada pengukuran waktu pengiriman data antar node dan tingkat keberhasilan komunikasi.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem komunikasi sensor nirkabel yang efisien dan handal, khususnya dalam aplikasi yang membutuhkan komunikasi jarak jauh, murah, dan hemat energi. Selain itu, analisis ini dapat dijadikan acuan dalam

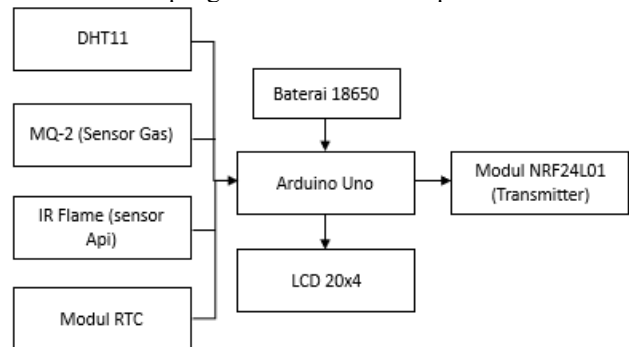
desain jaringan multihop yang optimal untuk berbagai keperluan di bidang teknik elektro dan komunikasi data.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Pengembangan sistem komunikasi nirkabel yang efisien dan mampu menjangkau area luas dilakukan melalui integrasi fungsi *transmitter* (Tx), *receiver* (Rx), dan komunikasi multihop dalam setiap node. Setiap node dirancang agar tidak hanya dapat mengirim dan menerima data, tetapi juga meneruskan informasi ke node lainnya secara berantai. Modul NRF24L01 dipilih sebagai media komunikasi utama karena kemampuannya dalam mendukung topologi multihop dengan konsumsi daya rendah. Mikrokontroler Arduino Uno digunakan untuk mengatur integrasi sensor MQ-2, DHT11, dan IR Flame sebagai input utama. Rancangan sistem ini dijelaskan lebih lanjut melalui blok diagram, flowchart, dan desain topologi jaringan.

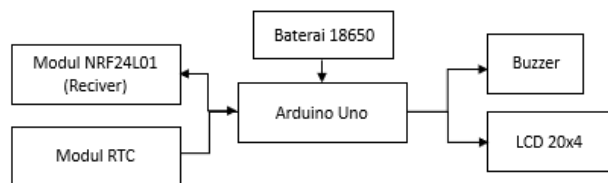
A. Blok Diagram Tx dan Rx

Gambar 1 menggambarkan susunan komponen pada sisi pengirim data. Sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan, sedangkan sensor MQ-2 berfungsi mendeteksi keberadaan gas. Sensor IR Flame mendeteksi adanya nyala api, sementara modul RTC (*Real Time Clock*) mencatat waktu pengambilan data secara presisi.



Gambar 1. Blok Diagram Transmitter

Semua data sensor diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno, yang kemudian menampilkannya pada LCD 20x4. Setelah diproses, data dikirim melalui modul NRF24L01 yang berfungsi sebagai transmitter dalam sistem komunikasi nirkabel. Seluruh sistem mendapatkan catu daya dari baterai 18650, yang memungkinkan perangkat bekerja secara mandiri di lapangan.



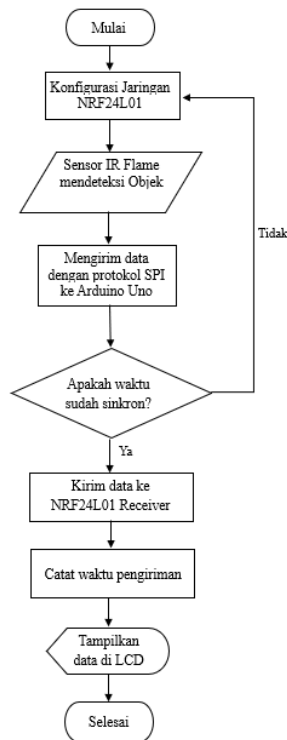
Gambar 2. Blok Diagram Receiver

Gambar 2 menunjukkan susunan perangkat pada sisi penerima. Modul NRF24L01 menerima data dari node transmitter dan meneruskannya ke Arduino Uno untuk diproses. Informasi waktu diterimanya data dicatat menggunakan modul RTC, sedangkan LCD 20x4 digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan data. Sebagai bentuk peringatan, buzzer diaktifkan jika data yang diterima menunjukkan kondisi berbahaya seperti suhu tinggi atau adanya api. Seluruh sistem receiver ini juga ditenagai oleh baterai 18650, memungkinkan pengoperasian yang fleksibel

tanpa ketergantungan pada listrik PLN. Kolaborasi antara kedua blok diagram ini membentuk dasar dari sistem komunikasi nirkabel berbasis multi-hop yang efisien dan responsif.

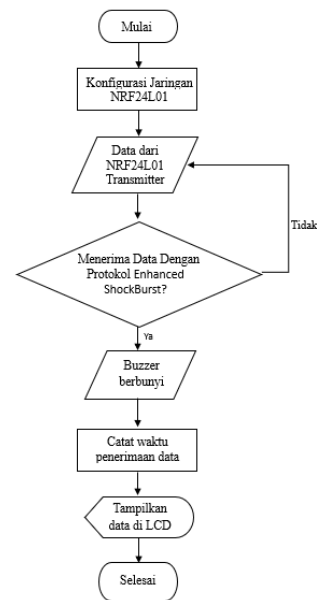
B. Flowchart Tx dan Rx

Proses pengiriman data pada sistem transmitter dimulai dengan inialisasi dan konfigurasi jaringan komunikasi menggunakan modul NRF24L01. Setelah jaringan siap, sensor IR Flame akan memantau adanya objek berupa api. Bila objek terdeteksi, data akan dikirim ke mikrokontroler Arduino Uno melalui komunikasi dengan protokol SPI. Selanjutnya, sistem akan memverifikasi apakah sinkronisasi waktu sudah dilakukan antara modul RTC dan perangkat. Jika waktu telah sinkron, data dikirimkan ke receiver menggunakan modul NRF24L01, dan waktu pengiriman dicatat secara real-time. Data yang dikirim kemudian ditampilkan pada LCD 20x4 untuk pemantauan langsung. Apabila waktu belum sinkron, sistem akan mengulang proses sinkronisasi terlebih dahulu sebelum melanjutkan pengiriman.



Gambar 3. Flowchart Transmitter

Pada sisi receiver, proses juga dimulai dengan konfigurasi jaringan NRF24L01. Modul ini akan terus mendengarkan data dari transmitter. Jika belum ada data yang masuk, sistem akan tetap berada dalam kondisi menunggu. Begitu data diterima melalui protokol Enhanced ShockBurst, sistem akan memicu buzzer sebagai indikator adanya pengiriman data. Waktu penerimaan kemudian dicatat menggunakan modul RTC, dan data ditampilkan pada LCD untuk memberikan informasi visual kepada pengguna. Proses ini kemudian selesai, dan sistem kembali ke kondisi awal untuk siap menerima data selanjutnya.



Gambar 4. Flowchart Receiver

C. Konfigurasi Teknis Modul NRF24L01 dan Prosedur Pengukuran

Untuk memastikan komunikasi multihop yang stabil, modul NRF24L01 dikonfigurasi menggunakan pustaka RF24Network berbasis star network atau topologi mesh sederhana. Konfigurasi operasional spesifik yang digunakan adalah:

1. Data Rate (Kecepatan Data): 250 kbps (digunakan untuk memaksimalkan jangkauan nirkabel).
2. TX Power (Daya Transmisi): High (0 dBm).
3. Ukuran Payload Data: 32 byte (memuat data dari sensor DHT11, MQ-2, IR Flame, dan timestamp RTC).
4. Protokol Multihop: Implementasi berbasis mesh routing sederhana dengan alamat 5 byte dan channel tetap.
5. Fitur Enhanced ShockBurst: Diaktifkan untuk menyediakan Auto Acknowledge (ACK) dan Auto Re-Transmit dengan jumlah retry maksimum (15 kali) dan delay antar retry sebesar 250 μ s, yang secara signifikan mempengaruhi nilai latensi total yang diukur.

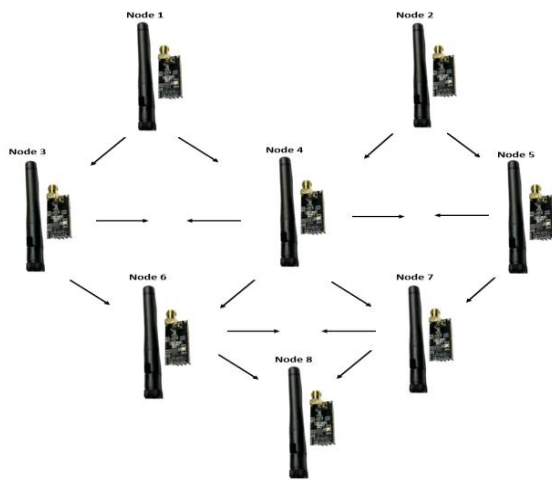
Pengukuran Latensi: Waktu respon (latensi) data diukur menggunakan Modul Real Time Clock (RTC) DS3231 yang telah disinkronkan pada semua node. Latensi dihitung berdasarkan selisih waktu dari timestamp data:

$$\text{Latensi}(ms) = \text{Waktu Diterima} - \text{Waktu Dikirim} \quad (1)$$

Data Waktu Dikirim dicatat oleh RTC pada node sumber (Tx) dan dikapsulasi bersama data sensor. Data Waktu Diterima dicatat oleh RTC pada node tujuan (Rx) setelah paket data berhasil didekode.

D. Komunikasi Multihop

Penyiaran (*broadcasting*) merupakan aktivitas menyebarkan siaran melalui perangkat pemancar atau sarana transmisi yang berada di darat, laut, atau luar angkasa. Proses ini menggunakan spektrum frekuensi radio berupa sinyal radio yang merambat dalam bentuk gelombang elektromagnetik melalui udara, kabel, atau media lainnya seperti diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5. Skema Multihop

Tujuannya adalah agar siaran tersebut dapat diterima secara serentak dan bersamaan oleh masyarakat melalui perangkat penerima siaran [11]. *Broadcast* merupakan metode penyampaian data atau informasi dari satu pengirim ke banyak penerima secara simultan. Dalam komunikasi jaringan, *broadcast* berarti pengiriman paket data yang diterima oleh semua perangkat dalam jaringan tertentu. Metode ini umumnya digunakan dalam jaringan lokal (*Local Area Network* - LAN) untuk menyebarkan pesan ke semua node tanpa perlu menentukan penerima spesifik.

Metode *broadcast* pada modul NRF24L01 adalah cara pengiriman data dari satu pengirim ke beberapa penerima secara simultan dengan menentukan alamat spesifik penerima. Dalam mode *broadcast*, pengirim mengirimkan data melalui saluran tertentu (*channel*) yang dapat diterima oleh semua perangkat NRF24L01 yang dikonfigurasi untuk mendengarkan pada saluran tersebut. Metode *broadcast* pada modul NRF24L01 memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi dalam topologi jaringan sederhana, seperti *star network* atau *mesh network*. Proses ini memanfaatkan mode pengiriman data dengan alamat yang sudah ditentukan, di mana paket data disiarkan ke semua perangkat yang kompatibel dan terhubung ke jaringan yang sama.

Eksperimen Multihop dan Mekanisme Routing

Topologi Jaringan: Pengujian jalur tercepat menggunakan topologi mesh dengan 8 node (N1 hingga N8). Node N1 dan N2 berfungsi sebagai node sumber (*transmitter*), sementara N8 bertindak sebagai node tujuan (*receiver*). Node N3, N4, N5, N6, dan N7 adalah node perantara (*router*). Jarak antar node (terlihat pada Gambar 6) diatur antara 5 hingga 10 meter dalam skenario ini. Node N4 dan N5 diatur sebagai perantara utama untuk menyediakan dua jalur paralel menuju N8.

Mekanisme *Automatic Routing*: Pemilihan rute tercepat (*jalur tercepat*) dilakukan secara otomatis oleh sistem yang mengimplementasikan protokol *dynamic routing* sederhana berbasis *Hop Count*. Sistem akan memprioritaskan rute dengan jumlah hop yang lebih sedikit (misalnya, N1-N4-N7-N8) dan mencoba menghindari jalur yang menunjukkan *packet loss* tinggi atau waktu tempuh per hop yang lebih lama (termasuk *delay* akibat re-transmits NRF24L01). Dengan kata lain, jalur tercepat yang dimaksud adalah rute dengan latensi total terendah, yang direkam dan dilaporkan oleh node penerima (N8).

III. HASIL DAN DISKUSI

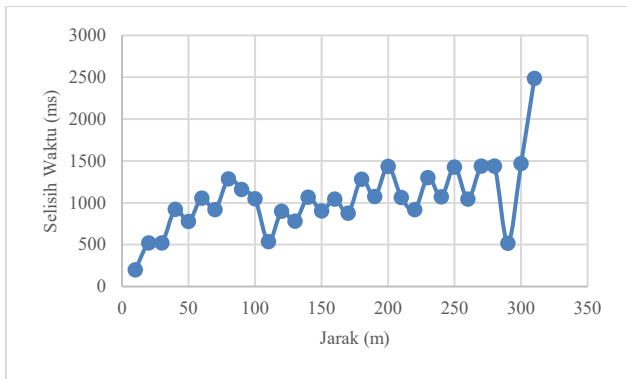
A. Pengujian Jarak pada Komunikasi LoS

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh jangkauan efektif komunikasi nirkabel dalam kondisi LoS, di mana tidak ada hambatan fisik antara pengirim dan penerima. Pengukuran dilakukan berdasarkan perubahan jarak antar node. Pengujian ini dilakukan di jalan desa dengan kondisi jalan yang lurus.

TABEL 1. HASIL PENGUJIAN KOMUNIKASI LOS

No	Jarak	Waktu Dikirim	Waktu Diterima	Selisih Waktu
1.	10 Meter	39.490 s	39.690 s	200 ms
2.	20 Meter	6.918 s	7.440 s	522 ms
3.	30 Meter	7.445 s	7.965 s	520 ms
4.	40 Meter	29.275 s	30.196 s	921 ms
5.	50 Meter	46.345 s	47.120 s	775 ms
6.	60 Meter	15.934 s	16.991 s	1057 ms
7.	70 Meter	26.621 s	27.541 s	920 ms
8.	80 Meter	38.385 s	39.669 s	1284 ms
9.	90 Meter	52.254 s	53.415 s	1161ms
10.	100 Meter	5.850 s	6.897 s	1047 ms
11.	110 Meter	15.408 s	15.944 s	536 ms
12.	120 Meter	27.172 s	28.070 s	898 ms
13.	130 Meter	38.913 s	39.693 s	780 ms
14.	140 Meter	9.026 s	10.092 s	1066 ms
15.	150 Meter	25.040 s	25.944 s	904 ms
16.	160 Meter	5.849 s	6.894 s	1045 ms
17.	170 Meter	21.860 s	22.738 s	878 ms
18.	180 Meter	40.506 s	41.789 s	1283 ms
19.	190 Meter	18.591 s	19.667 s	1076 ms
20.	200 Meter	58.532 s	59.965 s	1433 ms
21.	210 Meter	10.624 s	11.688 s	1064 ms
22.	220 Meter	34.073 s	34.990 s	917 ms
23.	230 Meter	53.267 s	54.568 s	1301 ms
24.	240 Meter	24.970 s	26.043 s	1073 ms
25.	250 Meter	50.019 s	51.446 s	1427 ms
26.	260 Meter	10.624 s	11.668 s	1044 ms
27.	270 Meter	33.005 s	34.442 s	1437 ms
28.	280 Meter	51.066 s	52.504 s	1438 ms
29.	290 Meter	11.171 s	11.689 s	518 ms
30.	300 Meter	15.454 s	16.922 s	1468 ms
31.	310 Meter	50.030 s	52.517 s	2487 ms
32.	320 Meter	29.294 s	-	-

Tabel 1 menyajikan hasil rinci pengujian performa latensi pada skenario *Line of Sight* (LoS). Dari total 31 percobaan yang berhasil direkam, data menunjukkan bahwa rata-rata waktu respon (*latensi*) secara keseluruhan adalah 1045,8 ms (sekitar 1,046 detik), dengan nilai median sebesar 1045 ms dan standar deviasi sebesar 410,8 ms. Nilai standar deviasi yang relatif tinggi ini mengindikasikan adanya variasi latensi yang signifikan antar jarak, sebuah tren yang divisualisasikan dan dianalisis lebih lanjut pada Gambar 6.



Gambar 6. Lokasi Pengujian Jalur Tercepat

Gambar 6 menunjukkan kecenderungan peningkatan latensi seiring bertambahnya jarak, meskipun kenaikannya tidak selalu linier, yang diakibatkan oleh variasi kualitas sinyal dan interferensi lingkungan. Nilai standar deviasi yang cukup tinggi mengindikasikan adanya variasi latensi yang signifikan antar jarak. Adanya data anomali pada jarak 310 meter, di mana latensi melonjak drastis hingga 2.487 ms. Kenaikan latensi yang mendadak ini kemungkinan besar disebabkan oleh sinyal yang melemah drastis, sehingga modul NRF24L01 melakukan jumlah re-transmits otomatis maksimum (15 kali retry) sebelum pengiriman data berhasil dikonfirmasi (Auto Acknowledge). Hal ini menunjukkan batas operasional fungsionalitas NRF24L01 telah tercapai.

B. Pengujian Jarak pada Komunikasi NLoS

Pengujian ini mengevaluasi performa komunikasi ketika ada hambatan fisik yang menghalangi jalur sinyal antara pengirim dan penerima. Fokusnya adalah untuk melihat dampak jarak dan hambatan fisik terhadap latensi dan keberhasilan komunikasi. Pengujian ini dilakukan di dalam ruang kamar untuk node pengirim dan di luar rumah untuk node penerima, dengan berbagai halangan berupa tembok rumah.

TABEL 2. HASIL PENGUJIAN KOMUNIKASI NLoS

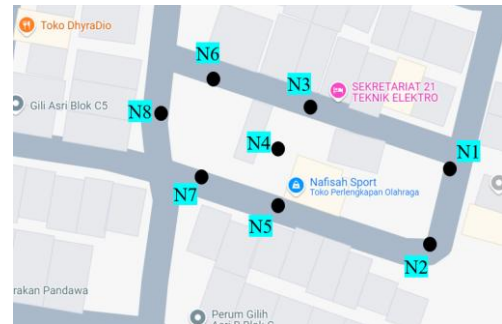
No	Jarak	Waktu Dikirim	Waktu Diterima	Selisih Waktu
1.	5 Meter	27.691 s	28.087 s	396 ms
2.	10 Meter	3.176 s	3.721 s	545 ms
3.	15 Meter	47.948 s	48.714 s	766 ms
4.	20 Meter	49.016 s	49.789 s	773 ms
5.	25 Meter	30.352 s	31.242 s	890 ms
6.	30 Meter	18.661 s	19.566 s	905 ms
7.	33 Meter	12.223 s	13.289 s	1066 ms
8.	34 Meter	49.016 s	-	-

Pengujian dilakukan sebanyak 8 kali pada berbagai jarak mulai dari 5 meter hingga 34 meter, dan 7 dari 8 percobaan berhasil menunjukkan performa yang cukup baik, dengan tingkat keberhasilan sebesar 87,5% dalam pengiriman data. Jarak maksimal komunikasi yang berhasil dilakukan adalah 33 meter dalam kondisi tertutup (*Non-Line of Sight*). Meskipun terdapat hambatan fisik berupa dinding rumah, modul NRF24L01 tetap mampu menjangkau hingga 33 meter secara efektif. Pada jarak 34 meter, komunikasi gagal dilakukan, yang menandakan batas efektif modul dalam kondisi NLoS. Pada seluruh percobaan yang berhasil, latensi bervariasi antara 396 ms hingga 1.066 ms. Latensi rata-rata pada kondisi NLoS adalah 763 ms (0,763 detik), dengan nilai median sebesar 773 ms dan standar deviasi sebesar 227,4 ms. Secara umum, sistem komunikasi berjalan dengan cukup

cepat, meskipun jika dibandingkan dengan standar real-time (< 300 ms) performa ini belum sepenuhnya ideal. Namun, latensi rata-rata ini masih tergolong baik dan dapat diterima untuk aplikasi monitoring atau pengiriman data sensor yang tidak membutuhkan respon instan.

C. Pengujian Jalur Tercepat

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap node dalam sistem berfungsi secara optimal dan sesuai dengan perannya masing-masing. Pengujian ini dilakukan dalam 2 kondisi, kondisi LoS dan kondisi NLoS.



Gambar 7. Lokasi Pengujian Jalur Tercepat

Pengujian dilakukan secara menyeluruh terhadap seluruh node, dimulai dari node 1 dan node 2 sebagai titik awal, hingga mencapai node 8 sebagai titik akhir. Salah satu fokus utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur durasi pengiriman data dari node awal sampai node akhir. Dalam sistem ini, pemilihan rute tercepat dilakukan secara otomatis pada setiap proses pengiriman data, sehingga jaringan selalu memilih jalur paling efisien berdasarkan kondisi terkini. Selain itu, sistem juga mampu membaca dan merekam jalur yang ditempuh saat menerima data, memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap performa dan stabilitas rute komunikasi antar node. Waktu tempuh total yang tercatat pada Tabel 3 didominasi oleh delay buatan 3 detik yang ditambahkan pada setiap hop (3 hop x 3 detik = 9 detik delay minimum yang ditambahkan). Namun, dengan mengabaikan delay buatan, latensi murni antar node dapat dianalisis.

TABEL 3. HASIL PENGUJIAN JALUR TERCEPAT

Jarak	Start	Jalur tercepat di A8	Waktu Start	Waktu Finish	Waktu tempuh
LoS 5m	A1	A1,A4, A7,A8	22.351 s	28.926 s	6575 ms
	A2	A2,A4, A7,A8	9.058 s	15.655 s	6597 ms
LoS 10m	A1	A1,A4, A7,A8	11.181 s	18.067 s	6886 ms
	A2	A2,A4, A7,A8	9.621 s	16.257 s	6636 ms
LoS 15m	A1	A1,A4, A7,A8	20.754 s	27.713 s	6959 ms
	A2	A2,A4, A7,A8	16.515 s	24.123 s	7608 ms
LoS 33m	A1	A1,A4, A7,A8	7.481 s	14.463 s	6982 ms
	A2	A2,A5, A7,A8	13.875 s	21.725 s	7850 ms
NLoS 5m	A1	A1,A4, A7,A8	17.553 s	24.716 s	7163 ms
	A2	A2,A5, A7,A8	13.309 s	21.104 s	7795 ms
NLoS 10m	A1	A1,A3, A6,A8	18.627 s	25.937 s	7310 ms

Jarak	Start	Jalur tercepat di A8	Waktu Start	Waktu Finish	Waktu tempuh
	A2	A2,A5, A7,A8	13.859 s	21.724 s	7865 ms
NLoS 15m	A1	A1,A4, A7,A8	10.127 s	17.471 s	7344 ms
	A2	A2,A5, A7,A8	9.059 s	17.493 s	8434 ms
NLoS 33m	A1	A1,A4, A7,A8	11.723 s	19.289 s	7566 ms
	A2	A2,A4, A7,A8	12.783 s	21.722 s	8939 ms
Pengujian Node 4 diputus	A1	A1,A3, A6,A8	12.289 s	19.677 s	7388 ms
Pengujian Node 4 diputus	A2	A2,A5, A7,A8	10.688 s	18.661 s	7973 ms

Berdasarkan Tabel 3, didapatkan bahwa waktu pengiriman data dari node A1 atau A2 ke A8 sangat bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan (LoS vs. NLoS) dan jarak. Secara umum, kondisi LoS menawarkan latensi yang lebih rendah dibandingkan NLoS, dan latensi cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak. Jalur A1 (umumnya A1→A4→A7→A8) secara konsisten menunjukkan latensi murni yang lebih rendah dibandingkan Jalur A2 (umumnya A2→A5→A7→A8) di sebagian besar skenario, terutama NLoS. Perbedaan ini bisa diakibatkan oleh: a) Kualitas sinyal yang lebih baik pada rute A1 karena minimnya interferensi atau posisi antena yang lebih optimal, atau b) Algoritma routing mengidentifikasi Link Quality Indicator (LQI) yang lebih tinggi pada node A4 dibandingkan A5. Pemadaman Node A4 memaksa sistem beralih menggunakan jalur alternatif (N1→N3→N6→N8). Meskipun sistem berhasil melakukan failover (redundansi jalur), hal ini menyebabkan kenaikan latensi total yang substansial. Sebagai contoh, pada skenario A1, latensi meningkat dari 6575 ms (jalur normal A4) menjadi 7388 ms (jalur alternatif A3), yaitu peningkatan latensi murni lebih dari 800 ms (setelah dikurangi delay buatan). Kenaikan ini menunjukkan jalur alternatif yang dipilih (A3→A6) memiliki performa link yang jauh kurang efisien (berpotensi menyebabkan re-transmits yang lebih banyak) dibandingkan jalur utama A4.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi performa latensi, jangkauan, dan ketahanan redundansi jalur pada komunikasi multihop NRF24L01. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jangkauan maksimal efektif mencapai 310 meter pada skenario LoS dengan rata-rata latensi 1.046 ms, sementara pada NLoS jangkauan efektif mencapai 33 meter dengan rata-rata latensi 763 ms. Latensi rata-rata ini memiliki implikasi praktis bahwa NRF24L01 sangat cocok diimplementasikan pada sistem monitoring jarak jauh atau peringatan dini yang tidak memerlukan respons real-time sangat cepat (latensi di bawah 300 ms). Selain itu, sistem automatic routing multihop berhasil menunjukkan ketahanan redundansi jalur dengan melakukan failover saat node perantara dimatikan, meskipun jalur alternatif yang dipilih menunjukkan peningkatan latensi murni yang signifikan (lebih dari 800 ms). Sebagai saran untuk penelitian lanjutan, optimasi algoritma routing multihop diperlukan untuk tidak hanya mempertimbangkan hop count tetapi juga metric kualitas sinyal (RSSI) atau

latency per hop untuk meminimalkan kenaikan waktu tempuh total pada jalur redundansi.

REFERENSI

- [1] A. Purwanto, R. Ratiandi, Yacoub, and N. Tjahjamoonsih, "Implementasi Node Bridge Untuk Meningkatkan Komunikasi Multi-Node Modul NRF24L01 Pada NLoS," *JiTEKH*, vol. 12, no. 1, pp. 8–15, Mar. 2024, doi: 10.35447/jitekh.v12i1.896.
- [2] S. V. Handoko, A. Kusyanti, and F. A. Bakhtiar, "Implementasi Algoritme Light Encryption Device (LED) pada Wireless Sensor Network dengan Media Pengiriman Data nRF24L01," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 6, pp. 2548–964, May 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [3] M. S. Corida, A. I. Pawelloi, and M. Zainal, "Perancangan Prototipe Sistem Pemanggil Perawat Nirkabel menggunakan Keypad dan Transceiver NRF24L01," *Jurnal Mosfet*, vol. 4, no. 1, pp. 37–46, Jun. 2024, doi: 10.31850/jmosfet.v4i1.3119
- [4] N. Firman, R. Hutabarat, R. Sirait, D. Halomoan, and S. Napitu, "Analisa Unjuk Kerja nRF24L01 Pada Komunikasi Multi Hop Dengan Database Lokal," *Jurnal Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi*, vol. 1, pp. 97–106, Oct. 2021, doi: 10.51510/trekritel.v1i1.
- [5] F. Setiawan Fahmi and D. I. Saputra, "Pengontrolan Buka-an Valve Pada Sistem Vessel Separator Dengan Metode Logika Fuzzy Berbasis Node Nirkabel Valve Opening Control in Vessel Separator System Using Fuzzy Logic Method With A Wireless Node-Based," *SENTER*, pp. 135–149, 2020.
- [6] M. K. Pratama, W. Kurniawan, M. Hannats, and H. Ichsan, "Perancangan Sistem Plug and Play pada Otomasi Lampu Menggunakan NRF24L01 dan Protokol MQTT melalui Smartphone," vol. 4, no. 7, pp. 2017–2024, 2020, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [7] Y. S. Hamzah, M. Hannats, H. Ichsan, and D. Syauqy, "Implementasi Pengiriman Data Secara Nirkabel pada Palang Pintu Sungai untuk Mitigasi Bencana Banjir berbasis nRF24L01," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 5, pp. 1788–1792, May 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [8] I. Gusti Made Ngurah Desnanjaya and M. Dwi Alfian, "Pengiriman Data Nrf24l01+ Dengan Kondisi Line Of Sight Dan Non Line Of Sight," *Jurnal Resistor*, vol. 3, pp. 128–139, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.31598>.
- [9] Y. A. Pratama, A. Setia Budi, and A. Kusyanti, "Implementasi Algoritma Enkripsi Snow-V pada Wireless Sensor Network (WSN)," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 10, pp. 4689–4697, Oct. 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [10] Alfrits William Pandoju, Yuliaman Saragih, Patia Welly Sirait, Puji Waluyo, and Suroyo, "Implementasi Komunikasi Data Menggunakan Protokol Rf24network Pada Sistem Pemantauan Kondisi Ruang Berbasis Jaringan Sensor Nirkabel," *Jurnal Teknografi*, vol. 10, pp. 8–18, 2023.
- [11] A. Septiano and T. Ghazali, "NRF 24L01 Sebagai Pemancar/Penerima Untuk Wireless Sensor Network," *Jurnal TEKNO*, vol. 17, no. 1, pp. 26–34, Apr. 2020.
- [12] Arif Rahman Hakim, Nehru, and Samratul Fuady, "Rancang Bangun Pengendalian Robot Mobil dengan Wireless Joystick PS2 Menggunakan Modul NRF24L01," *Jurnal Engineering*, vol. 3, Aug. 2021.
- [13] A. Rasyid and M. Ramadhan, "Sistem Kendali Kecepatan Kipas Menggunakan Modul Wireless NRF24L01 Dengan Metode Simplex Berbasis Arduino," *J-SISKO TECH*, vol. 3, no. 2, pp. 56–64, Jul. 2020.
- [14] A. Abd Jabbar, Kurniati, and Sri Irma Arisanti, "Sistem Pengontrolan Dan Pemantauan Lampu Jalan Menggunakan Modul NRF," *JURNAL MOSFET*, vol. 3, no. 1, pp. 2775–5274, Jul. 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.umpar.ac.id/index/jmosfet>

- [15] H. Kusnadi, Y. S. A. Malik Taek, and O. Supriadi, "Monitoring Suhu, Kelembaban, dan Tekanan Udara Menggunakan Wireless NRF24L01 Dikampus Unpam Viktor," *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, vol. 3, no. 1, p. 70, Jun. 2020, doi: 10.32493/epic.v3i1.4927.
- [16] D. Kana Hebi, F. F. Ray, C. P. Tamal, "Rancang Bangun Pemancar Dan Penerima Wireless Tally Light Kamera Menggunakan Modul Komunikasi NRF24L01," *Jurnal Spektro*, vol. 6, pp. 23–30, 2023.
- [17] R. Nizma'urrahmi, A. Kusyanti, and R. A. Siregar, "Implementasi Algoritme SPECK pada Wireless Sensor Network menggunakan Media Pengiriman Data nRF24L01," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 5, pp. 2079–2086, May 2022, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [18] M. Agni, S. Prawiro, and A. Setia Budi, "Perancangan dan Implementasi Sistem Pemantauan dan Kontrol Tanaman berbasis NRF24L01," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 3, pp. 1418–1425, Mar. 2022, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>