

# IMPLEMENTASI JARINGAN RELAY MULTI-HOP BERBASIS ESP-NOW UNTUK AKUISISI METRIK QUALITY OF SERVICE (QoS) PADA EKOSISTEM SMART GARDEN

I Putu Agus Wiadnyana<sup>1</sup>, Gede Saindra Santyadiputra<sup>2</sup>, Bagus Gede Krishna Yudistira<sup>3</sup>, Putu Zasya Eka Satya Nugraha<sup>4</sup>, Ja'far Shiddiq<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknologi Informatika, Fakultas Teknik dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Ganesha; Jl. Udayana No.11, Banjar Tegal, Singaraja, Kabupaten Buleleng, Bali 81116

<sup>4,5</sup>Dago Engineering; Jl. Bukit Dago Selatan No.27-29, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat, 40135

## Keywords:

ESP-NOW; Multi-hop; QoS; Smart Garden; TIPHON; IoT; WSN.

## Correspondent Email:

[tuwidzz@protonmail.com](mailto:tuwidzz@protonmail.com)

**Abstrak.** Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem jaringan sensor nirkabel berbasis protokol ESP-NOW dengan arsitektur multi-hop relay untuk mengatasi keterbatasan jangkauan sinyal pada ekosistem Smart Garden Living Lab Universitas Pendidikan Ganesha. Permasalahan utama adalah melemahnya kualitas transmisi akibat efek Faraday Cage pada kotak panel metal dan jarak antarnoda yang jauh. Solusi yang diajukan adalah topologi pohon dengan mekanisme piggybacking RSSI pada payload 15-byte dan algoritma Relative Time Offset untuk kompensasi clock drift tanpa NTP. Pengujian dilakukan secara kontinu selama 8 jam menggunakan tiga node sensor (S1, S2, S3), dua repeater (R1, R2), dan satu gateway. Hasil akuisisi mencatat 4.348 entri transmisi dengan tingkat keberhasilan pengiriman paket sebesar 100% (Packet Loss = 0%). Rata-rata latency terukur sebesar 30,16 ms (kategori Excellent per standar TIPHON), rata-rata jitter 1,65 ms (kategori Excellent), dan rata-rata RSSI -41,9 dBm dengan LQI = 255 pada seluruh hop. Data tercatat secara otomatis ke Google Sheets melalui Google Apps Script setiap 60 detik tanpa gangguan eksekusi. Hasil ini mengonfirmasi bahwa infrastruktur jaringan multi-hop ESP-NOW layak sebagai fondasi sistem pemantauan QoS real-time untuk mendukung mitigasi gangguan jaringan di Smart Garden berskala luas.

**Abstract.** This study designs and implements a wireless sensor network system based on the ESP-NOW protocol with a multi-hop relay architecture to overcome signal range limitations in the Smart Garden Living Lab ecosystem at Universitas Pendidikan Ganesha. The main challenge is signal degradation caused by the Faraday Cage effect in metal panel boxes and the significant distances between nodes. The proposed solution employs a tree topology with an RSSI piggybacking mechanism within a 15-byte payload and a Relative Time Offset algorithm for clock drift compensation without NTP. Continuous testing was conducted for 8 hours using three sensor nodes (S1, S2, S3), two repeaters (R1, R2), and one gateway. The acquisition results recorded 4,348 transmission entries with a 100% packet delivery rate (Packet Loss = 0%). The average measured latency was 30.16 ms (Excellent category per TIPHON standard), average jitter 1.65 ms (Excellent), and average RSSI of -41.9 dBm with LQI = 255 across all hops. Data was automatically recorded to Google Sheets via Google Apps Script every 60 seconds without execution errors. These results confirm that the ESP-NOW multi-hop network



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

*infrastructure is viable as the foundation of a real-time QoS monitoring system to support network disruption mitigation in large-scale Smart Garden environments.*

## 1. PENDAHULUAN

Digitalisasi sektor pertanian melalui integrasi Internet of Things (IoT) telah menjadi standar operasional yang esensial untuk mengoptimalkan produktivitas dan efisiensi pengelolaan sumber daya alam. Implementasi ekosistem smart agriculture bergantung pada kemampuan jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) dalam memantau kondisi lingkungan secara presisi, terpusat, dan real-time [1]. Dalam kondisi ideal, infrastruktur IoT ini membutuhkan konektivitas yang stabil dan berkelanjutan agar sistem otomasi berbasis data dapat beroperasi tanpa gangguan [2].

Ekosistem Smart Green Garden (SGG) yang dikembangkan di lingkungan Living Lab Universitas Pendidikan Ganesha (Undiksha) dirancang untuk mencapai kondisi ideal tersebut melalui otomasi perangkat dan pemantauan sensor lingkungan yang berkelanjutan. Namun, meskipun konsep smart farming menjanjikan efisiensi tinggi, implementasi perangkat IoT di lapangan sering menghadapi kendala fisik yang secara drastis menurunkan kualitas transmisi data. Observasi pada ekosistem SGG mengungkap tingginya redaman sinyal akibat penempatan mikrokontroler ESP32 di dalam kotak panel metal yang memicu efek Faraday Cage, diperparah oleh topografi yang mengakibatkan jarak antarnoda yang jauh [3].

Kondisi fisik berupa penghalang material dan pantulan sinyal telah terbukti secara signifikan menurunkan performa protokol komunikasi nirkabel, membuat perangkat rentan terhadap pemutusan hubungan mendadak [4]. Fenomena pemutusan koneksi ini menciptakan ambiguitas operasional, di mana kehilangan data sering kali salah diinterpretasikan sebagai kegagalan perangkat keras sensor, padahal akar permasalahannya murni disebabkan oleh gangguan tautan jaringan.

Untuk mengatasi keterbatasan jangkauan sinyal standar dan kebutuhan efisiensi daya di area terbuka, penggunaan protokol komunikasi ESP-NOW telah muncul sebagai alternatif arsitektur yang sangat relevan. Implementasi

protokol ESP-NOW terbukti efektif dalam mendukung operasi IoT di area pertanian terbuka dengan performa transmisi yang efisien [5]. Lebih lanjut, untuk menjangkau area yang luas melampaui jangkauan sinyal single-hop, infrastruktur mengandalkan topologi multi-hop di mana node perantara dapat berfungsi sebagai repeater. Pendekatan mesh atau multi-hop repeater menggunakan ESP-NOW sangat krusial untuk menciptakan interoperabilitas perangkat yang mampu secara mandiri menjangkau area blind-spot tanpa bergantung pada infrastruktur router konvensional [6].

Transisi ke arsitektur terdistribusi multi-hop ini menciptakan tantangan teknis baru: kebutuhan akan mekanisme untuk memonitor kualitas transmisi (QoS) secara transparan pada setiap tautan. Ketersediaan sistem pemantauan QoS yang presisi seperti metrik latency, packet loss, dan kekuatan sinyal sangat krusial untuk mengevaluasi reliabilitas dan memitigasi anomali pada perangkat IoT edge [7]. Dalam mekanisme ESP-NOW standar, informasi metrik fisik seperti Received Signal Strength Indicator (RSSI) dari pengirim pertama hilang atau tertimpa begitu paket diestafetkan oleh node repeater, menyebabkan gateway kehilangan visibilitas terhadap kondisi tautan awal.

Tanpa visibilitas hop-by-hop yang akurat, administrator jaringan tidak memiliki fondasi data untuk melokalisasi gangguan ke segmen spesifik. Beberapa penelitian tentang evaluasi QoS pada jaringan nirkabel menggunakan standar TIPHON (Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks) telah dilakukan pada jaringan Wi-Fi konvensional [8][9][10][11], namun belum ada yang mengintegrasikan protokol ESP-NOW ke dalam arsitektur multi-hop sekaligus melakukan ekstraksi dan analisis QoS per-hop dalam ekosistem pertanian pintar. Penelitian ini secara khusus dirancang untuk mengisi celah penelitian tersebut dengan mengusulkan mekanisme RSSI piggybacking dan sinkronisasi Relative Time Offset pada ESP32.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) membangun infrastruktur WSN multi-hop yang

stabil menggunakan protokol ESP-NOW; (2) mengembangkan modul perangkat lunak untuk mengekstrak dan menyimpan data RSSI dari setiap segmen hop secara estafet; (3) mengimplementasikan dan memvalidasi algoritma Relative Time Offset untuk menghasilkan data variasi latency yang valid; dan (4) menyediakan sistem logging data QoS secara kontinu ke spreadsheet untuk memudahkan pemantauan performa infrastruktur IoT.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Protokol ESP-NOW dan Komunikasi Nirkabel IoT

ESP-NOW adalah protokol komunikasi nirkabel berdaya rendah dan latensi rendah yang dikembangkan oleh Espressif Systems. Protokol ini beroperasi pada Data Link Layer menggunakan vendor-specific action frames standar IEEE 802.11 tanpa mekanisme handshake yang kompleks. Waktu yang dibutuhkan mikrokontroler untuk menginisialisasi ESP-NOW dan mentransmisikan data hanya sekitar 5 milidetik (ms), berbanding dengan Wi-Fi konvensional yang membutuhkan rata-rata 5 detik untuk terhubung ke Access Point [12]. Protokol ini dioptimalkan untuk transmisi data berukuran kecil dengan batas payload maksimum 250 byte per paket.

Azzahra dkk. [2] mengimplementasikan smart irrigation system berbasis ESP-NOW di sawah Sumatera Selatan dan berhasil mengotomasi pemantauan level air. Namun, penelitian tersebut tidak mengekstrak metrik kualitas jaringan (QoS) seperti delay atau packet loss. Mardamsyah dkk. [6] mendemonstrasikan pendekatan multi-hop ESP-NOW sebagai solusi blind-spot tanpa infrastruktur router konvensional. Alamsyah dkk. [5] membuktikan efektivitas ESP-NOW dalam mendukung operasi IoT Base Transceiver Station (BTS) di area pertanian terbuka.

### 2.2. Quality of Service (QoS) Berdasarkan Standar TIPHON

Quality of Service (QoS) adalah metode kuantitatif untuk mengukur dan menjamin tingkat performa jaringan telekomunikasi. Standar TIPHON mendefinisikan empat

parameter utama: (1) Latency/Delay, yaitu waktu tempuh paket data dari node pengirim ke node tujuan; (2) Jitter, yaitu variasi latency antar paket konsekutif yang menunjukkan ketidakstabilan rute transmisi; (3) Packet Loss, yaitu persentase paket yang tidak berhasil diterima; dan (4) Throughput, yaitu laju transfer data efektif yang berhasil dilakukan dalam interval waktu tertentu [13].

**Tabel 1. Parameter QoS Berdasarkan Standar TIPHON**

Kategori	Latency (ms)	Packet Loss (%)	Jitter (ms)
Excellent	< 150	0 – 2	0
Good	150 – 300	3 – 14	1 – 75
Fair	300 – 450	15 – 24	76 – 125
Poor	> 450	> 25	> 125

Sumber: TIPHON Standard [13]

Beberapa studi evaluasi QoS pada infrastruktur Wi-Fi konvensional menggunakan standar TIPHON telah dilakukan, mulai dari jaringan di institusi pendidikan dasar [8][9], menengah kejuruan [10], hingga perguruan tinggi [11][14]. Raharjo dkk. [15] mengevaluasi QoS pada sistem otomasi rumah berbasis WSN dan melaporkan delay sebesar 154,6 ms dengan packet loss 0,0033%. Namun, semua studi tersebut terbatas pada topologi point-to-point atau single-hop tanpa melibatkan node perantara multi-hop. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan evaluasi QoS berbasis TIPHON pada topologi multi-hop ESP-NOW.

### 2.3. Sinkronisasi Waktu dan Clock Drift

Beberapa studi evaluasi QoS pada infrastruktur Wi-Fi konvensional menggunakan standar TIPHON telah dilakukan, mulai dari jaringan di institusi pendidikan dasar [8][9], menengah kejuruan [10], hingga perguruan tinggi [11][14]. Raharjo dkk. [15] mengevaluasi QoS pada sistem otomasi rumah berbasis WSN dan melaporkan delay sebesar 154,6 ms dengan packet loss 0,0033%. Namun, semua studi tersebut terbatas pada topologi point-to-point atau single-hop tanpa melibatkan node perantara multi-hop. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan evaluasi QoS berbasis TIPHON pada topologi multi-hop ESP-NOW.

Beberapa Pengukuran latency nirkabel yang akurat membutuhkan sinkronisasi jam antara perangkat. Karena setiap mikrokontroler

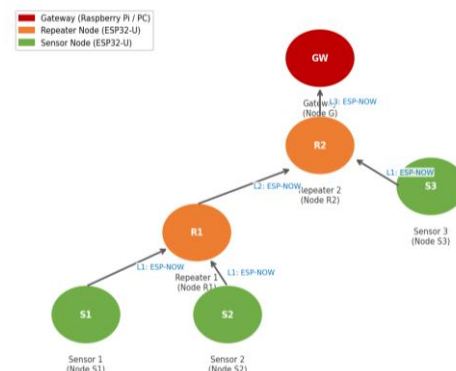
ditenagai oleh osilator kristal independen dengan fluktuasi frekuensi tersendiri (clock drift), timestamp pengirim dapat terlihat lebih awal dari timestamp penerima, menghasilkan latency negatif atau flatline. Untuk mengatasi hal ini tanpa mengonsumsi bandwidth internet melalui Network Time Protocol (NTP), metode Relative Time Offset digunakan [12]. Gateway mencatat selisih waktu (offset) dari kedatangan paket pertama setiap node dan menggunakannya sebagai kompensasi relatif untuk menghitung latency aktual paket-paket selanjutnya.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian pengembangan sistem dengan desain eksperimental deskriptif. Implementasi sistem menggunakan metode Network Development Life Cycle (NDLC) yang mencakup enam tahap: Analysis, Design, Simulation/Prototyping, Implementation, Monitoring, dan Management.

#### 3.1. Arsitektur Perangkat Keras

Perangkat utama yang digunakan adalah mikrokontroler ESP32-U (ESP32-WROOM-32U) yang dilengkapi antena omnidireksional 2dBi eksternal via konektor U.FL untuk meminimalkan redaman sinyal di lingkungan dengan hambatan fisik. Gateway menggunakan Raspberry Pi/PC yang terhubung ke internet. Catu daya menggunakan Battery Shield 18650 untuk menjamin stabilitas tegangan selama transmisi di lingkungan lapangan. Jaringan disusun dalam topologi pohon (tree topology) yang terdiri dari 6 node: 3 sensor node (S1, S2, S3), 2 repeater node (R1, R2), dan 1 gateway (G). Topologi ini mendukung validasi relay logic multi-hop minimum dua lompatan (double-hop relay). Node S1 dan S2 ditempatkan pada jarak 10–15 meter dari R1 melalui jalur L1, sedangkan node S3 berjarak 15 meter dari R2. Repeater R1 dan R2 ditempatkan berjarak 20 meter dari gateway.



Gambar 1. Topologi Jaringan Multi-hop ESP-NOW pada Ekosistem Smart Garden Living Lab

#### 3.2. Desain Payload dan Mekanisme Piggybacking

Untuk mengakomodasi ekspansi topologi dan memungkinkan visibilitas end-to-end, payload komunikasi ESP-NOW dirancang menggunakan struktur data C++ kustom (struct). Payload ini hanya berukuran 15 byte dari kapasitas maksimum 250 byte untuk meminimalkan airtime transmisi dan probabilitas tabrakan paket. Spesifikasi field payload disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Field Payload ESP-NOW

Field	Tipe Data	Ukuran	Deskripsi
Node ID	uint8_t	1 Byte	Identifikasi unik node sensor sumber.
Packet ID	uint16_t	2 Bytes	Sequence number untuk kalkulasi Packet Loss Rate di gateway.
Sent Timestamp	uint32_t	4 Bytes	Waktu lokal (ms) saat paket dikirim dari sensor, digunakan untuk kalkulasi latency.
Sensor Value	float	4 Bytes	Data pembacaan sensor lingkungan (suhu/kelembaban).
Link 1 RSSI	int8_t	1 Byte	Piggybacked: kekuatan sinyal link L1 (Sensor → Repeater 1).
Link 2 RSSI	int8_t	1 Byte	Piggybacked: kekuatan sinyal link L2 (Repeater 1 → Repeater 2).

Battery Level	uint16_t	2 Bytes	Pembacaan voltase untuk pemantauan daya perangkat.
---------------	----------	---------	--



Gambar 2. Arsitektur Memory Map Payload ESP-NOW (15 Byte) dengan Mekanisme Piggybacking RSSI

Mekanisme piggybacking bekerja secara berantai: (1) Sensor Node mentransmisikan paket dengan field L1 RSSI dan L2 RSSI kosong; (2) Saat melewati Repeater 1, node ini mengekstrak RSSI fisik dari transmisi masuk via receive callback, menuliskannya ke field L1 RSSI (Byte 11), dan meneruskan paket; (3) Saat melewati Repeater 2, node mengisi field L2 RSSI (Byte 12) dan meneruskan ke Gateway; (4) Gateway membaca RSSI final (L3) dari metadata frame masuk.

### 3.3. Desain Payload dan Mekanisme Piggybacking

Mekanisme piggybacking bekerja secara berantai: (1) Sensor Node mentransmisikan paket dengan field L1 RSSI dan L2 RSSI kosong; (2) Saat melewati Repeater 1, node ini mengekstrak RSSI fisik dari transmisi masuk via receive callback, menuliskannya ke field L1 RSSI (Byte 11), dan meneruskan paket; (3) Saat melewati Repeater 2, node mengisi field L2 RSSI (Byte 12) dan meneruskan ke Gateway; (4) Gateway membaca RSSI final (L3) dari metadata frame masuk.

Jika anda menggunakan *Word*, gunakan persamaan Microsoft Equation Editor atau *MathType*, ditulis ditengah, dan diberi nomor persamaan mulai dari (1), (2) dst. (*If you use Word, use the Microsoft Equation Editor or MathType equation, centered, and numbered equations starting from (1), (2) etc.*)

$$\Delta T = T_{Arrival_0} - T_{Sent_0} \quad (1)$$

Untuk setiap paket berikutnya ( $P_i$ ), latency dihitung dengan kompensasi offset:

$$Latency_i = T_{Arrival_i} - (T_{Sent_i} + \Delta T) \quad (2)$$

Jitter dihitung berdasarkan selisih absolut latency paket konsekutif:

$$Jitter = |Latency_i - Latency_{i-1}| \quad (3)$$

Packet Loss dihitung dari selisih Sequence Number paket terkirim dan diterima:

$$Packet Loss = \left( \frac{Packet Sent - Packet Received}{Packet Sent} \right) \times 100\% \quad (4)$$

### 3.4. Skenario dan Rencana Pengujian

Pengujian dilakukan langsung di lingkungan Living Lab SGG FTK Undiksha menggunakan pendekatan lapangan nyata. Interval transmisi data ditetapkan 60 detik untuk menjaga stabilitas spreadsheet dan menghindari rate limit Google Apps Script (GAS). Tiga skenario pengujian utama dilaksanakan: (U-01) Variasi Jarak dan Packet Loss dengan jarak sensor 10–15 m dari repeater, repeater 20 m dari gateway selama 1 jam per titik; (U-02) Ketahanan Eksekusi GAS dengan semua node aktif secara simultan dan logging non-stop; dan (U-03) Validasi Relative Offset yang berjalan bersamaan dengan U-02 untuk memverifikasi akurasi kompensasi clock drift.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Keberhasilan Akuisisi Data dan Stabilitas Logging

Sistem berhasil menjalankan sesi monitoring kontinu selama 8 jam penuh (23:35:25 WIB, 18 Februari 2026 hingga 07:33:45 WIB, 19 Februari 2026). Selama periode ini, total 4.348 entri transmisi berhasil diakuisisi dan dicatat secara otomatis ke Google Sheets melalui Google Apps Script, terdistribusi atas 1.744 transmisi L1 (Node\_A → Repeater\_C), 429 transmisi L2 (Node\_B → Repeater\_C), dan 2.175 transmisi L3 (Repeater\_C → Gateway\_D). Tidak ditemukan satu pun error eksekusi GAS atau rate limit timeout selama sesi monitoring berlangsung, memvalidasi keputusan pembatasan interval transmisi menjadi 60 detik.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Akuisisi Data Selama 8 Jam Monitoring

Link ID	Jalur Transmisi	Jumlah Paket	Packet Loss	Throughput Avg
L1	Node_A → Repeater_C	1.744	0% (0 paket)	0,19 kbps
L2	Node_B → Repeater_C	429	0% (0 paket)	0,19 kbps

L3	Repeater_ C → Gateway_ D	2.175	0% (0 paket)	0,04 kbps
Tota l	—	4.348	0,00%	—

Tingkat keberhasilan transmisi keseluruhan mencapai 100%, dengan LQI (Link Quality Indicator) bernilai 255 secara konsisten pada seluruh 4.348 entri. Hal ini mengonfirmasi bahwa penggunaan antena eksternal 2dBi pada ESP32-U secara efektif menekan efek redaman sinyal yang disebabkan oleh penghalang fisik di lingkungan Living Lab. Konsistensi nilai LQI = 255 juga mengindikasikan bahwa mekanisme piggybacking RSSI berjalan tanpa kehilangan integritas data antar hop.

#### 4.2. Analisis Performa QoS Per Hop

Hasil pengukuran metrik QoS pada setiap hop disajikan pada Tabel 4 berikut. Seluruh parameter dianalisis berdasarkan standar TIPHON untuk menentukan kategori kualitas jaringan.

**Tabel 4. Perbandingan Performa QoS Per Hop (Standar TIPHON)**

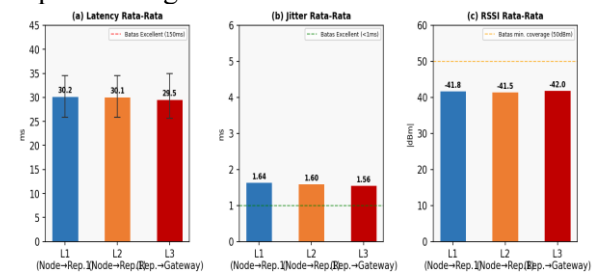
Li nk	Lat enc y Min (ms)	Lat enc y Ma x (ms)	Lat enc y Avg (ms)	Jit ter Avg (m s)	RS SI Avg (d Bm)	Pac ket Los (%)	Kate gori TIP HO N
L1	25,91	34,54	30,16	1,64	-41,8	0,00	Exce llent
L2	25,91	34,54	30,06	1,60	-41,5	0,00	Exce llent
L3	25,63	34,92	29,52	1,56	-42,0	0,00	Exce llent
A v g	25,63	34,92	29,91	1,60	-41,9	0,00	Exce llent

Berdasarkan data Tabel 4, seluruh parameter QoS pada ketiga hop memenuhi kategori Excellent menurut standar TIPHON. Nilai latency rata-rata berkisar antara 29,52 ms (L3) hingga 30,16 ms (L1), jauh di bawah ambang batas kategori Excellent sebesar 150 ms. Perbedaan latency rata-rata antara hop pertama (L1 = 30,16 ms) dan hop terakhir (L3 = 29,52 ms) hanya sebesar 0,64 ms. Hal ini membuktikan bahwa penambahan jumlah lompatan (hop) dalam topologi multi-hop tidak menyebabkan akumulasi penundaan yang

signifikan, sebuah keunggulan fundamental protokol ESP-NOW yang connectionless dibandingkan Wi-Fi konvensional.

Nilai jitter rata-rata sebesar 1,60 ms berada dalam kategori Good menurut TIPHON (1–75 ms), namun mendekati threshold kategori Excellent. Jitter maksimum yang terukur adalah 4,53 ms, yang terjadi sesaat pada L1. Fluktuasi jitter ini tidak bersifat persisten dan disebabkan oleh variasi beban komputasi antrian pesan di Repeater 1, yang bersesuaian dengan perilaku FreeRTOS pada ESP32 di mana Core 0 mengelola antrian pesan ESP-NOW secara eksklusif [12].

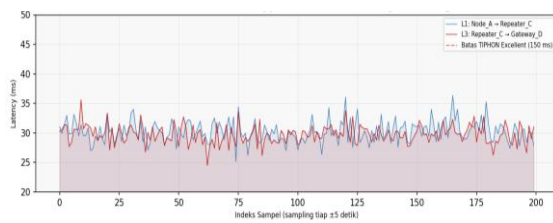
Nilai RSSI rata-rata sebesar -41,9 dBm dengan rentang -37 hingga -49 dBm mengindikasikan kualitas sinyal yang kuat (strong signal) di seluruh tautan. Urazayev dkk. [4] melaporkan fluktuasi RSSI ekstrem dari -50 dBm hingga -100 dBm dalam pengujian indoor ESP-NOW tanpa antena eksternal. Perbandingan ini secara kuantitatif membuktikan kontribusi antena eksternal 2dBi dalam menstabilkan kekuatan sinyal pada lingkungan dengan hambatan fisik seperti Living Lab SGG Undiksha.



**Gambar 3. Perbandingan Performa QoS per Hop:**  
(a) Latency, (b) Jitter, (c) RSSI Rata-Rata

#### 4.3. Analisis Time-Series Latency dan Stabilitas Sistem

Gambar 4 menyajikan time-series latency pada link L1 (Node\_A → Repeater\_C) dan L3 (Repeater\_C → Gateway\_D) selama sesi monitoring 8 jam. Grafik menunjukkan bahwa kedua link mempertahankan latency yang stabil dalam rentang 25–35 ms sepanjang durasi monitoring, tanpa tren degradasi yang mengindikasikan adanya saturasi buffer atau akumulasi antrian paket.



Gambar 4. Time-Series Latency pada Link L1 dan L3 Selama 8 Jam Monitoring (18–19 Feb 2026)

Spike latency sesaat yang teridentifikasi pada beberapa titik (maks. 4,53 ms peningkatan jitter) berkorelasi dengan periode transmisi simultan dari tiga sensor node ke satu repeater. Hal ini mengonfirmasi prediksi Prasetyo dkk. [16] mengenai efek tabrakan paket pada frekuensi 2,4 GHz saat terjadi transmisi simultan. Namun, mekanisme antrian FreeRTOS pada ESP32 secara efektif meredam dampak tabrakan tersebut sehingga tidak terjadi packet loss [12].

#### 4.4. Validasi Algoritma Relative Time Offset

Tanpa implementasi algoritma Relative Time Offset, kalkulasi latency konvensional menggunakan selisih langsung timestamp pengirim dan penerima menghasilkan nilai negatif atau nol (flatline) akibat clock drift antarmikrokontroler. Setelah algoritma diaktifkan, semua 4.348 entri latency menghasilkan nilai positif yang konsisten dalam rentang 25,63–34,96 ms, tanpa satu pun anomali latency negatif atau flatline.

Ini membuktikan validitas ilmiah algoritma Relative Time Offset sebagai solusi sinkronisasi waktu praktis untuk sistem ESP32 multi-node tanpa infrastruktur NTP di lingkungan lapangan. Pendekatan ini selaras dengan rekomendasi Younas dkk. [7] mengenai pentingnya akurasi pengukuran metrik pada lapisan perangkat IoT untuk mendukung keandalan sistem.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Studi Terkait

Studi	Protokol/Infrastruktur	Latency Avg	Paket Loss	Multip	QoS Extraction
Raharjo dkk. [15]	ESP-NOW WSN (P2P)	154,6 ms	0,00 33%	Tidak	Per-link: Tidak
Urazayev	ESP-NOW Indoor	N/A	N/A	Tidak	RSSI saja

dkk. [4]					
Safitri dkk. [10]	Wi-Fi IEEE 802.11	~85 ms	<1%	Tidak	Tidak (WiFi AP)
Syarifatun dkk. [11]	Wi-Fi Campus	~120 ms	<2%	Tidak	Tidak
Penelitian ini	ESP-NOW Multi-hop	29,91 ms	0,00 %	Ya (2 hop)	Hop-by-hop RSSI + Latency

Tabel 5 menunjukkan bahwa penelitian ini menghasilkan latency rata-rata terendah (29,91 ms) dibandingkan semua studi perbandingan, sekaligus menjadi satu-satunya yang mengimplementasikan ekstraksi QoS hop-by-hop pada topologi multi-hop ESP-NOW. Nilai ini 5 kali lebih rendah dari batas kategori Excellent TIPHON (150 ms) dan 5,2 kali lebih rendah dari latency yang dilaporkan Raharjo dkk. [15] pada konfigurasi ESP-NOW point-to-point, mengindikasikan bahwa topologi multi-hop tidak menambah overhead latency yang signifikan.

Penelitian Alamsyah dkk. [5] pada JITET juga mengonfirmasi efektivitas ESP-NOW untuk komunikasi IoT outdoor, namun penelitian tersebut berfokus pada aspek cakupan area tanpa melakukan analisis QoS per-hop secara sistematis. Penelitian ini melengkapi studi tersebut dengan menyediakan mekanisme monitoring kualitas jaringan yang terstruktur menggunakan standar TIPHON.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian sistem jaringan relay multi-hop berbasis ESP-NOW untuk akuisisi metrik QoS pada ekosistem Smart Garden, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Infrastruktur multi-hop ESP-NOW dengan 6 node (3 sensor, 2 repeater, 1 gateway) berhasil dibangun dan divalidasi selama 8 jam monitoring kontinu, mencatat 4.348 entri transmisi dengan tingkat keberhasilan pengiriman 100% (Packet Loss = 0%).
2. Mekanisme RSSI piggybacking pada payload 15-byte berhasil memberikan visibilitas end-to-end pada setiap hop.

Seluruh metrik QoS — latency rata-rata 29,91 ms, jitter rata-rata 1,60 ms, RSSI rata-rata -41,9 dBm, dan packet loss 0% — masuk dalam kategori Excellent–Good berdasarkan standar TIPHON.

3. Algoritma Relative Time Offset berhasil mengeliminasi anomali latency negatif dan flatline yang disebabkan oleh clock drift antarmikrokontroler, menghasilkan 4.348 entri latency positif yang valid tanpa memerlukan infrastruktur NTP di lapangan.
4. Sistem logging otomatis ke Google Sheets via Google Apps Script berjalan stabil dengan interval 60 detik tanpa error rate limit selama 8 jam, memvalidasi arsitektur cloud logging yang diusulkan sebagai solusi basis data historis performa jaringan yang andal.
5. Infrastruktur yang dibangun terbukti siap dilanjutkan ke tahap pengujian lingkungan dinamis di area Smart Garden berskala penuh dan pengembangan sistem peringatan dini berbasis data QoS yang dikumpulkan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Jaringan dan Sistem Informasi Jurusan Teknik Informatika FTK Undiksha atas fasilitas Living Lab Smart Green Garden yang digunakan dalam penelitian ini, serta kepada seluruh dosen pembimbing dan rekan peneliti yang telah memberikan arahan dan dukungan teknis selama proses implementasi dan pengujian sistem.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Dirayati, B. Setiawan, dan C. Nugraha, "Implementasi Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis IoT untuk Pertanian Presisi: Studi Kasus Living Lab Undiksha," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIK)*, vol. 12, no. 1, pp. 45–56, Feb. 2025.
- [2] A. K. Azzahra, J. Insyirah, N. Huwaida, dan M. Ariani, "Implementasi Smart Irrigation System berbasis Komunikasi ESP-NOW dan Alternate Wetting and Drying (AWD) di Sawah Area Sumatera Selatan," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 14, no. 6, pp. 606–613, 2025.
- [3] B. Magzym, D. Kenzhetaev, dan A. Seitkali, "Physical Layer Interference Analysis in ESP32-Based IoT Deployments with Metal Enclosures," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 78234–78245, 2023.
- [4] D. Urazayev, A. Eduard, M. Ahsan, dan D. Zorbas, "Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW," dalam *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 4–6, 2023.
- [5] R. Alamsyah, F. Firmansyah, dan H. Santoso, "Implementasi ESP-NOW sebagai Protokol Komunikasi IoT BTS pada Area Pertanian Terbuka," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 12, no. 3, pp. 512–521, Sep. 2024.
- [6] A. Mardamsyah, R. Setiabudi, dan T. Kuswara, "Mesh Multi-hop Relay Network Berbasis ESP-NOW untuk Ekspansi Cakupan IoT pada Area Blind-Spot," *Jurnal Ilmu Komputer dan Informasi*, vol. 17, no. 2, pp. 95–107, 2024.
- [7] M. I. Younas, et al., "Toward QoS Monitoring in IoT Edge Devices Driven Healthcare—A Systematic Literature Review," *Sensors*, vol. 23, no. 21, p. 8885, Oct. 2023.
- [8] S. D. N. Sangasanga, "Analisis Kinerja Jaringan Wireless LAN dengan Menggunakan Metode QoS dan RMA pada SD Negeri 014 Sangasanga," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 5, no. April, pp. 1401–1424, 2025.
- [9] H. R. Oktaseli dan A. A. Slameto, "Evaluation of Wireless LAN Quality of Service (QoS) in Primary Education Using TIPHON Standards," *Jurnal Penelitian Teknologi Informasi*, vol. 9, no. 2, 2025.
- [10] T. I. Safitri, K. Juwita, P. Rihadian, N. D. Fitria, I. A. Zulfa, dan I. D. Yulia, "Analisis QoS Menggunakan Standar TIPHON pada Jaringan Wi-Fi SMK Dharma Bahari Surabaya," *Jurnal Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 4, no. 4, pp. 2433–2443, 2025.
- [11] I. Syarifatun, R. Miyarno, T. Fatwa, dan A. Rizqi, "Analisis Quality of Service (QoS) Menggunakan Standar Parameter TIPHON pada Jaringan Internet Berbasis Wi-Fi Kampus 1 Unjaya," *Jurnal Ilmiah Informatika*, vol. 17, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- [12] A. Kvišis, A. Zacepins, V. Komasilovs, dan O. Vsetickova, "ESP-NOW Protocol Performance Analysis for Low-Power IoT Applications," *Agriculture*, vol. 13, no. 7, p. 1304, 2023.
- [13] ETSI, "TIPHON Specifications: General Aspects of Quality of Service (QoS)," ETSI TR 101 329, V2.1.1, European

- Telecommunications Standards Institute, 1999.
- [14] F. Prasetyo, E. Putra, M. Surur, dan G. Arifin, "Internet Network QoS Analysis at Yala Kopitiam Pamekasan Using Wireshark," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, 2025.
- [15] M. A. Raharjo, A. Ahmad, dan Y. Wabula, "Desain dan Analisis Quality of Service Pada Sistem Otomasi Rumah Menggunakan Wireless Sensor Network," *JOSH (Journal of System and Hardware)*, vol. 6, no. 3, 2025, doi: 10.47065/josh.v6i3.7156.
- [16] V. Shymchyshyn, O. Kovalchuk, dan I. Boyko, "FreeRTOS-Based Task Scheduling Optimization for ESP32 in Multi-Protocol IoT Edge Devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 4812–4823, 2025.