



Analisis Kinerja Protokol ESP-NOW Sebagai Komunikasi Data Multi-Node Wireless Sensor Network Pada Esp32 dengan IoT Gateway dan Visualisasi Web

Eko Wahyudi^{1,*}, Sandy Suryo Prayogo²

¹Program Studi Teknologi Informasi, Program Magister, STMIK Jakarta STI&K, Jakarta Selatan, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro, Universitas Gunadarma, Kota Depok, Indonesia

Email: ^{1,*}ekobkrt@gmail.com, ²sandy_sr@staff.gunadarma.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ekobkrt@gmail.com

Abstrak—Wireless Sensor Network (WSN) berbasis IoT umumnya bersifat low-rate dan sensitif terhadap latensi, sehingga pemilihan protokol komunikasi yang efisien menjadi krusial. Berbeda dari penelitian terdahulu yang cenderung menguji satu aspek performa ESP-NOW secara terpisah (jangkauan, perbandingan dengan Wi-Fi, atau delay pada skenario multi-node), penelitian ini menawarkan kebaruan berupa kerangka evaluasi terintegrasi yang menganalisis kinerja ESP-NOW pada ESP32 dengan topologi many-to-one secara simultan terhadap enam variabel operasional: jumlah node (1–2), interval pengiriman (1, 3, dan 5 detik), jarak transmisi (10–50 meter), kondisi lingkungan (dengan dan tanpa halangan), posisi perangkat, serta beban pengiriman data, sekaligus mengintegrasikannya end-to-end dengan IoT gateway berbasis ESP32, basis data time-series InfluxDB, dan visualisasi real-time Grafana. Setiap node sensor dilengkapi GY-BMP280 untuk mengukur suhu dan tekanan udara. Evaluasi kinerja mengacu pada parameter Quality of Service (QoS) standar TIPHON, meliputi delay, throughput, jitter, dan packet loss, serta pengukuran tambahan RSSI dan konsumsi daya. Hasil menunjukkan bahwa interval pengiriman 1 detik menghasilkan QoS terbaik dengan delay <150 ms, jitter 0–75 ms, dan packet loss 0% pada jarak hingga 30 meter tanpa halangan. IoT gateway mampu menerima data tanpa packet loss pada beban rendah hingga menengah serta menulis ke InfluxDB hingga 1000 data per detik. Kontribusi utama penelitian ini adalah tersedianya peta batas performa ESP-NOW terstandarisasi TIPHON dan arsitektur sistem end-to-end yang dapat dijadikan acuan konfigurasi bagi pengembang IoT skala kecil hingga menengah. Penelitian ini terbatas pada maksimal dua node, sehingga generalisasi ke skala lebih besar masih memerlukan pengujian lanjutan.

Kata Kunci: ESP-NOW; ESP32; Wireless Sensor Network; Quality of Service; IoT Gateway

Abstract—IoT-based Wireless Sensor Networks (WSN) are typically low-rate and latency-sensitive, making the selection of an efficient communication protocol critical. Unlike prior studies that generally examined a single aspect of ESP-NOW performance in isolation (range, comparison with Wi-Fi, or delay in multi-node scenarios), this study contributes a novel integrated evaluation framework that simultaneously analyzes ESP-NOW performance on ESP32 with a many-to-one topology across six operational variables: number of nodes (1–2), transmission interval (1, 3, and 5 seconds), transmission distance (10–50 meters), environmental condition (with and without obstacles), device positioning, and data load, while integrating the system end-to-end with an ESP32-based IoT gateway, InfluxDB time-series database, and real-time Grafana visualization. Each sensor node is equipped with a GY-BMP280 sensor for temperature and air pressure measurement. Performance was evaluated using TIPHON-standard Quality of Service (QoS) parameters, including delay, throughput, jitter, and packet loss, along with additional RSSI and power consumption measurements. Results show that a 1-second transmission interval yields the best QoS with delay <150 ms, jitter 0–75 ms, and 0% packet loss at distances up to 30 meters without obstacles. The IoT gateway successfully received data without packet loss under low-to-medium loads and demonstrated a write capacity to InfluxDB of up to 1000 data points per second. The main contribution of this study is the provision of a TIPHON-standardized ESP-NOW performance map and an end-to-end system architecture that can serve as a configuration reference for small-to-medium-scale IoT developers. This study is limited to a maximum of two nodes, so generalization to larger scales requires further investigation.

Keywords: ESP-NOW; ESP32; Wireless Sensor Network; Quality of Service; IoT Gateway

1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) mendorong meluasnya penerapan *Wireless Sensor Network* (WSN) sebagai infrastruktur pengumpulan data terdistribusi secara *real-time*, khususnya untuk pemantauan lingkungan, industri, dan infrastruktur perkotaan yang tersebar di banyak titik lokasi (Sokol et al., 2024). ESP32 dari Espressif Systems menjadi salah satu platform mikrokontroler yang paling banyak digunakan untuk WSN berbasis IoT karena mendukung berbagai protokol komunikasi nirkabel dengan biaya implementasi yang rendah (Espressif Systems, n.d.-b). Di antara protokol yang tersedia pada ESP32, *ESP-NOW* menonjol karena arsitektur *peer-to-peer* tanpa memerlukan *access point*, latensi rendah, dan efisiensi energi yang tinggi, menjadikannya kandidat kuat untuk komunikasi jarak pendek hingga menengah pada skenario WSN (Levush & Luchechko, 2026).

Namun demikian, *ESP-NOW* bukan satu-satunya opsi protokol nirkabel untuk WSN berbasis ESP32, dan efektivitasnya perlu dipahami dalam konteks alternatif yang tersedia (Wedyanti & Wagya, 2025). *LoRa* menawarkan jangkauan jauh lebih luas dapat mencapai 1–5 km pada area terbuka dibandingkan sekitar 190–220 meter pada *ESP-NOW* dalam kondisi *line of sight* (Levush & Luchechko, 2026) namun dengan konsekuensi *duty cycle* dan *data rate* yang jauh lebih rendah, sehingga kurang sesuai untuk skenario yang membutuhkan pembaruan data relatif sering seperti pada penelitian ini. *ESP-MESH*, sebagai solusi *mesh* bawaan Espressif, menyediakan kemampuan *multi-hop* dan penyembuhan-diri (*self-healing*) jaringan yang tidak dimiliki *ESP-NOW*, tetapi menambah *overhead* protokol, kompleksitas routing, dan konsumsi daya yang lebih tinggi pada tiap node sebuah trade-off yang kurang ideal untuk node sensor bertenaga baterai dengan topologi sederhana. Dengan mempertimbangkan trade-off tersebut, *ESP-NOW*



dipilih dalam penelitian ini karena menyeimbangkan latensi rendah, kesederhanaan topologi *many-to-one*, dan efisiensi daya untuk skala WSN kecil hingga menengah namun pemilihan ini perlu diuji secara empiris dan terstandarisasi, bukan diasumsikan begitu saja dari karakteristik teoretisnya.

Studi terdahulu memang telah mengevaluasi performa ESP-NOW dari berbagai sudut, namun masing-masing hanya menyentuh satu dimensi persoalan (Ali et al., 2022). (Levush & Luchechko, 2026) berfokus pada jangkauan transmisi dalam kondisi *line of sight* tanpa mengevaluasi pengaruh halangan fisik maupun variasi jumlah node. (Eridani et al., 2021) membandingkan ESP-NOW dengan Wi-Fi dari sisi *latency* dan konsumsi daya, tetapi tidak menguji skenario *multi-node* maupun kondisi lingkungan yang bervariasi. (Weddyanti & Wagyaana, 2025) mulai menyentuh skenario *multi-node* dan melaporkan penurunan *throughput* seiring bertambahnya node, tetapi pengujian tidak dikombinasikan dengan variasi jarak, halangan, dan posisi perangkat secara sistematis, serta tidak diikat pada standar QoS yang baku seperti TIPHON.

Kesenjangan yang sebenarnya bukan terletak pada "jumlah node" semata, melainkan pada belum adanya pengujian yang menggabungkan variasi jarak, keberadaan halangan, dan posisi perangkat secara faktorial terhadap kinerja ESP-NOW bahkan pada skala dua node sekalipun (Begum & Nandury, 2023). Secara teknis, hal ini penting karena begitu lebih dari satu node aktif mengirim secara asinkron pada kanal 2,4 GHz yang sama, mekanisme akses kanal ESP-NOW menghadapi risiko tumpang tindih waktu kirim (*collision window*) yang probabilitasnya tidak bertambah secara linear terhadap jumlah node, melainkan berinteraksi dengan variabel lain: pelemahan sinyal akibat jarak dan halangan memperbesar peluang kegagalan penerimaan awal dan retransmisi, yang pada gilirannya mengubah pola waktu kirim node lain dan memperbesar variasi *jitter* secara tidak proporsional. Interaksi antar-variabel inilah bukan skala jumlah node itu sendiri yang belum dikarakterisasi secara sistematis dan terstandarisasi TIPHON dalam literatur sebelumnya, sehingga menjadi fokus penelitian ini (Espressif Systems, n.d.-a).

Tabel 1. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Aspek	(Levush & Luchechko, 2026)	(Eridani et al., 2021)	(Sokol et al., 2024)	(Weddyanti & Wagyaana, 2025)	Penelitian Ini
Fokus Utama	Jangkauan transmisi LoS	Komparasi protokol (ESP-NOW vs Wi-Fi vs Bluetooth)	Integrasi ESP-NOW + Wi-Fi + MQTT	Performa multi-node (delay, throughput, packet loss)	Evaluasi terintegrasi 6 variabel + QoS TIPHON + visualisasi end-to-end
Jumlah Node	1 node	1 node	Tidak disebutkan eksplisit	Multi-node (jumlah tidak dispesifikasi)	1–2 node (terkontrol)
Variasi Jarak	Ya (Hingga 190 m)	Ya (Terbatas)	Tidak	Tidak	Ya
Variasi Halangan	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya (10-50 m)
Variasi Interval Kirim	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya (dengan & tanpa halangan)
Variasi Posisi Perangkat	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya (1, 3, 5 detik)
Parameter RSSI	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya
Konsumsi Daya	Tidak	Ya (Komparatif)	Tidak	Tidak	Ya
Standar QoS Formal	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya (TIPHON)
Integrasi Gateway + DB + Visualisasi Pengujian	Tidak	Tidak	Ya (Home Assistant)	Tidak	Ya (InfluxDB + Grafana)
Faktorial	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Ya
Multi-Variabel					

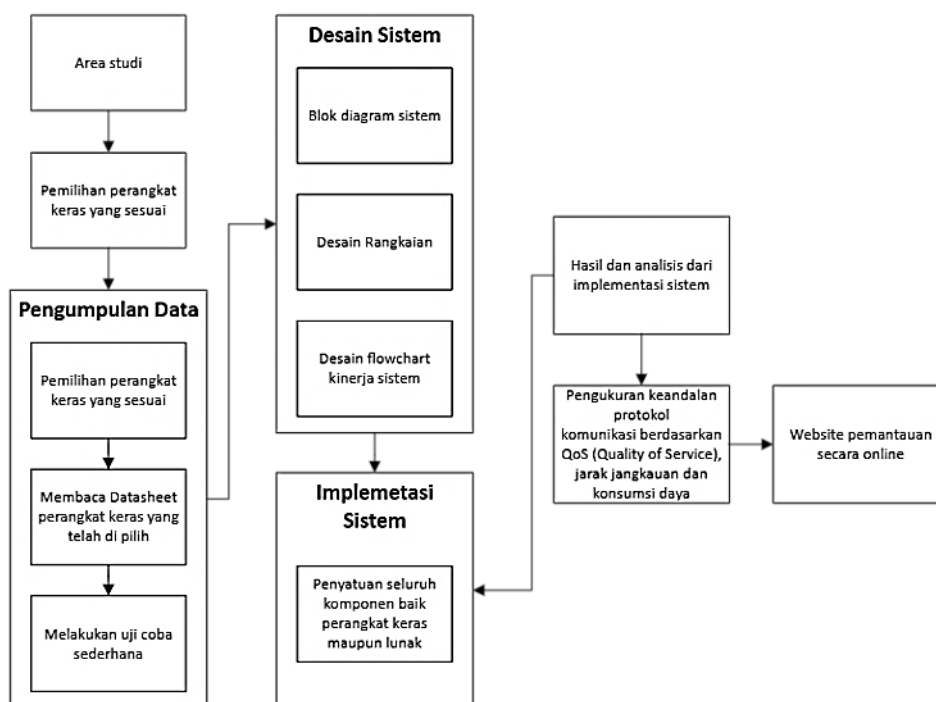
Berdasarkan Tabel 1, dapat diidentifikasi tiga kesenjangan utama (*research gaps*) yang menjadi fokus penelitian ini. Pertama, belum adanya pengujian yang menggabungkan variasi jarak, halangan, dan posisi perangkat secara faktorial terhadap performa ESP-NOW. Penelitian (Levush & Luchechko, 2026) hanya menguji jangkauan pada kondisi *line of sight* tunggal, sementara (Sokol et al., 2024) dan (Weddyanti & Wagyaana, 2025) tidak memvariasikan kondisi lingkungan maupun interval pengiriman, padahal dalam implementasi WSN nyata, kombinasi faktor-faktor tersebut saling berinteraksi dan memengaruhi kualitas komunikasi secara non-linear. Kedua, belum adanya evaluasi

QoS ESP-NOW yang mengacu pada standar baku seperti TIPHON; seluruh penelitian terdahulu menggunakan metrik QoS secara terpisah tanpa mengikatnya pada standar kategorisasi yang terdefinisi, sehingga menyulitkan perbandingan hasil antar penelitian dan interpretasi praktis bagi perancang sistem. Penelitian ini adalah yang pertama menerapkan standar TIPHON secara lengkap pada keempat parameter QoS (*delay*, *throughput*, *jitter*, dan *packet loss*). Ketiga, belum adanya integrasi end-to-end ESP-NOW dengan IoT gateway, database time-series, dan visualisasi web dalam satu kerangka evaluasi yang terukur; meskipun (Sokol et al., 2024) telah mengintegrasikan ESP-NOW dengan Home Assistant, namun tidak melakukan analisis kuantitatif QoS yang terstruktur, sehingga penelitian ini hadir untuk menutup celah tersebut dengan membangun sistem end-to-end yang terukur mulai dari node sensor hingga *dashboard* Grafana.

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja protokol ESP-NOW pada sistem WSN berbasis ESP32 melalui pengujian faktorial terhadap jumlah node, interval pengiriman, jarak transmisi, kondisi halangan, posisi perangkat, dan beban pengiriman data, dengan parameter QoS standar TIPHON (*delay*, *throughput*, *jitter*, *packet loss*) serta RSSI dan konsumsi daya (InfluxData, n.d.). Sistem yang dikembangkan juga mengintegrasikan IoT gateway berbasis ESP32 dengan platform visualisasi web menggunakan InfluxDB dan Grafana, sehingga hasil penelitian memberikan pemetaan batas performa ESP-NOW yang lebih presisi dibandingkan kajian-kajian terdahulu, sekaligus rekomendasi konfigurasi optimal untuk implementasi WSN IoT skala kecil hingga menengah (Grafana Labs, n.d.). Kontribusi spesifik penelitian ini mencakup tiga hal utama: pertama, penyediaan peta performa ESP-NOW pada berbagai kondisi operasional yang terstandarisasi TIPHON sehingga memudahkan perbandingan dan interpretasi hasil; kedua, identifikasi interaksi antara jumlah node, interval pengiriman, jarak, dan kondisi lingkungan terhadap kualitas komunikasi yang selama ini belum terungkap dalam pengujian parsial; dan ketiga, pengembangan prototipe sistem end-to-end yang mengintegrasikan ESP-NOW, ESP32 gateway, InfluxDB, dan Grafana dengan mekanisme pengukuran QoS real-time, yang sekaligus dapat diadopsi sebagai referensi implementasi WSN berbasis ESP-NOW untuk aplikasi monitoring lingkungan skala kecil hingga menengah.

2. METODOLOGI PENELITIAN

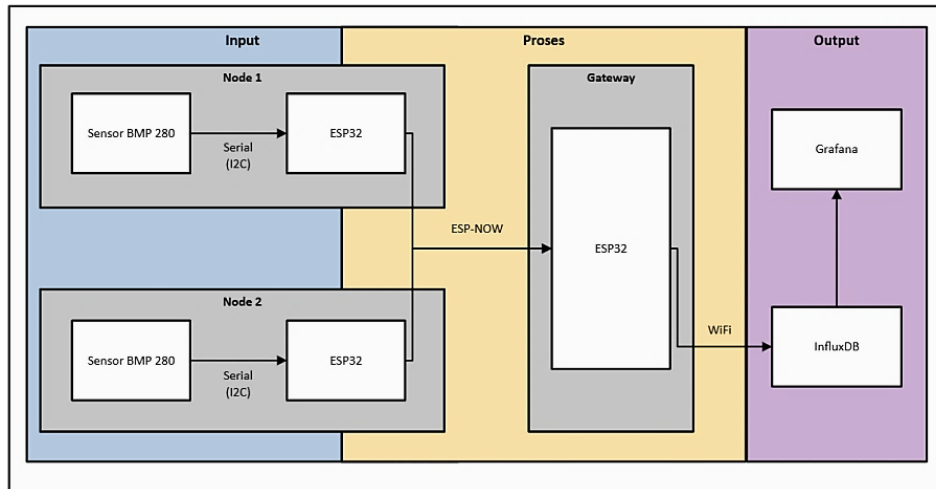
2.1 Tahapan Penelitian



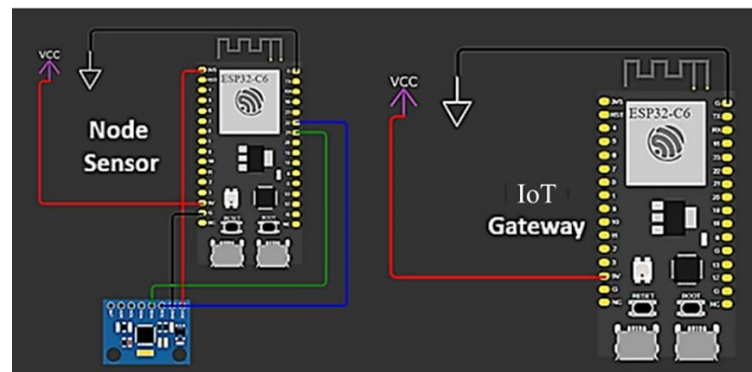
Gambar 1. Diagram Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental dengan mengikuti tahapan yang terstruktur dan sistematis. Tahapan diawali dengan studi literatur untuk mengkaji teori dasar terkait protokol ESP-NOW, ESP32, *Wireless Sensor Network* (WSN), *Quality of Service* (QoS), dan teknologi visualisasi berbasis web. Selanjutnya dilakukan identifikasi masalah, perumusan batasan penelitian, dan penentuan tujuan penelitian. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem yang mencakup desain arsitektur jaringan, rangkaian elektronik, dan alur program (*flowchart*) untuk node sensor maupun IoT gateway. Setelah perancangan selesai, dilanjutkan dengan implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian dilakukan serangkaian pengujian berdasarkan variabel dan skenario yang telah ditetapkan. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif, dan penelitian diakhiri dengan penarikan kesimpulan serta penyusunan rekomendasi konfigurasi sistem yang optimal.

2.2 Desain dan Arsitektur Sistem



Gambar 2. Blok Diagram Sistem



Gambar 3. Desain Rangkaian Elektronik

Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan topologi *many-to-one*, di mana satu atau dua node sensor ESP32 mengirimkan data secara nirkabel ke satu *IoT gateway* ESP32 menggunakan protokol *ESP-NOW* pada kanal frekuensi 6 (2,4 GHz). *IoT gateway* dikonfigurasi secara bersamaan sebagai penerima *ESP-NOW* dan klien Wi-Fi, sehingga mampu menerima data dari node sensor sekaligus meneruskannya ke platform *InfluxDB* melalui jaringan internet. Data yang tersimpan di *InfluxDB* selanjutnya divisualisasikan secara *real-time* melalui *Grafana*.

Perlu ditegaskan bahwa istilah "*multi-node*" pada penelitian ini merujuk secara spesifik pada arsitektur *many-to-one* dengan lebih dari satu node pengirim yang beroperasi secara simultan pada kanal radio yang sama sehingga berpotensi menimbulkan kontensi kanal (*channel contention*) bukan pada pengujian skalabilitas jaringan berskala besar (umumnya >5–10 node aktif secara bersamaan) yang menjadi acuan umum istilah *multi-node* dalam literatur WSN. Konfigurasi dua node dalam penelitian ini diposisikan sebagai studi awal (*proof-of-concept*) untuk mengkarakterisasi potensi degradasi QoS akibat penambahan node pada topologi *ESP-NOW*, sebagai dasar empiris sebelum pengujian pada skala node yang lebih besar dilakukan pada penelitian lanjutan. Cakupan ini konsisten dengan keterbatasan penelitian yang dijelaskan pada Bagian 4.

Komponen perangkat keras yang digunakan meliputi ESP32-DevKitC V4 sebagai node sensor dan *gateway*, sensor GY-BMP280 untuk mengukur suhu dan tekanan udara, antenna eksternal 2,4 GHz 3 dBi untuk memperluas jangkauan transmisi, serta baterai lithium sebagai sumber daya portabel pada node sensor (Bosch Sensortec GmbH, n.d.). Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE untuk pemrograman ESP32, *library* *ESP-NOW* dan *Adafruit BMP280* untuk antarmuka sensor, *InfluxDB* sebagai basis data *time-series*, serta *Grafana* sebagai platform visualisasi data (Karl Söderby, 2025).

2.3 Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

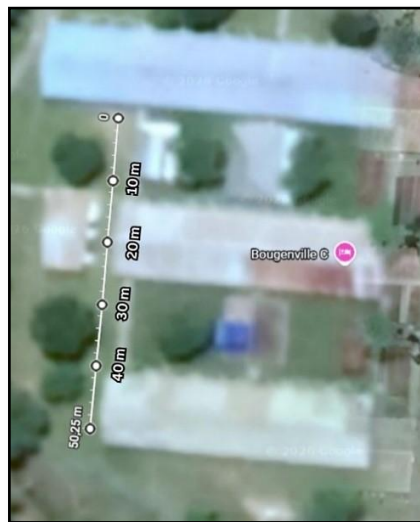
Pemilihan komponen perangkat keras didasarkan pada kebutuhan sistem yang mengutamakan efisiensi daya, kemampuan komunikasi nirkabel, dan ketersediaan di pasaran. ESP32-DevKitC V4 dipilih sebagai platform utama karena memiliki prosesor *dual-core* Xtensa LX6 240 MHz, RAM sebesar 520 KB SRAM, memori *flash* 4 MB, serta dukungan konektivitas Wi-Fi 802.11 b/g/n dan *Bluetooth* 4.2 yang terintegrasi. Sensor GY-BMP280 dipilih sebagai sensor lingkungan karena memiliki akurasi pengukuran suhu $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dan tekanan $\pm 1\text{ hPa}$, antarmuka I2C/SPI, serta konsumsi daya yang sangat rendah yaitu sekitar $2,7\text{ }\mu\text{A}$ pada mode *forced*. Baterai lithium digunakan sebagai catu daya portabel pada node sensor guna mensimulasikan kondisi penerapan di lapangan yang sesungguhnya.

Klarifikasi jalur RF antena eksternal. Modul ESP32-DevKitC V4 tersedia dalam dua varian jalur radio frekuensi (RF) yang saling eksklusif: varian dengan modul ESP32-WROOM-32D, yang jalur RF-nya secara *default* diarahkan ke antena PCB tercetak (*trace antenna*) tanpa konektor eksternal, dan varian dengan modul ESP32-WROOM-32U, yang jalur RF-nya diarahkan langsung ke konektor U.FL/IPEX untuk antena eksternal tanpa antena PCB terpasang. Kedua jalur tersebut bersifat *mutually exclusive* melalui RF switch pada modul, sehingga penggunaan antena eksternal 3 dBi hanya efektif secara elektris apabila (a) modul yang digunakan adalah varian ESP32-WROOM-32U, atau (b) modul varian ESP32-WROOM-32D telah dimodifikasi dengan memindahkan resistor 0-ohm (*jumper*) dari jalur antena PCB ke jalur konektor U.FL. Tanpa salah satu dari dua kondisi tersebut, sinyal tetap dipancarkan melalui antena PCB internal dan antena eksternal 3 dBi tidak memberi kontribusi gain apa pun terhadap pengukuran RSSI yang dilaporkan pada Bagian 3.3.

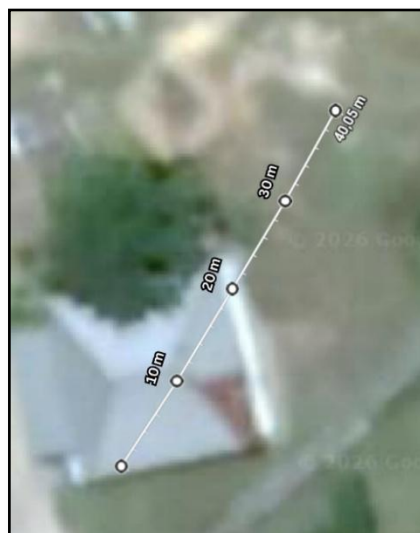
Tabel 2. Spesifikasi Perangkat Keras yang Digunakan

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
ESP32-DevKitC V4 (varian modul: <i>lengkap</i>)	Dual-core 240 MHz, 520 KB SRAM, Wi-Fi + BT	Node sensor dan <i>IoT gateway</i>
GY-BMP280	Suhu $\pm 1^\circ\text{C}$, Tekanan ± 1 hPa, I2C/SPI	Pengukuran suhu dan tekanan
Antena 2,4 GHz 3 dBi	Frekuensi 2,4 GHz, Gain 3 dBi, konektor U.FL/IPEX	Perluasan jangkauan <i>ESP-NOW</i> (aktif hanya pada jalur RF eksternal — lihat klarifikasi di atas)
Baterai Lithium	3,7 V, kapasitas bervariasi	Sumber daya node sensor

2.4 Definisi Operasional Variabel dan Skenario Pengujian



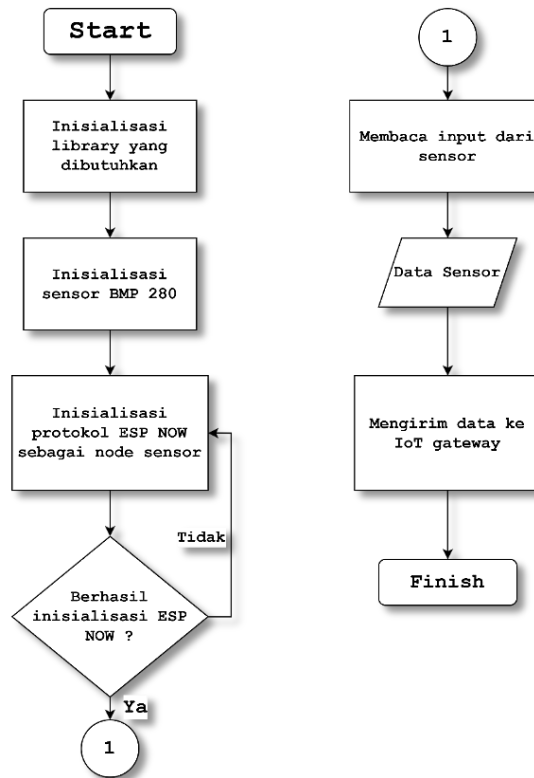
Gambar 4. Area Pengujian Tanpa Halangan



Gambar 5. Area Pengujian Dengan Halangan

Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan memvariasikan enam variabel bebas, yaitu: (1) jumlah node aktif (1 node dan 2 node — lihat catatan cakupan pada Bagian 2.2), (2) interval pengiriman data (1 detik, 3 detik, dan 5 detik), (3) jarak transmisi antara node dan *gateway*, (4) kondisi lingkungan pengujian (tanpa halangan dan dengan halangan fisik), (5) posisi relatif perangkat terhadap satu sama lain, serta (6) beban pengiriman data ke *IoT gateway* dan dari *gateway* ke *InfluxDB*. Variabel terikat yang diukur adalah parameter *Quality of Service* (QoS) meliputi *delay*, *throughput*, *jitter*, *packet loss*, serta pengukuran tambahan berupa RSSI dan konsumsi daya. Setiap skenario pengujian menggunakan jumlah data sebanyak 1000 paket per fase, dengan tiga fase interval pengiriman yang berbeda untuk memastikan representasi data yang cukup dan valid secara statistik.

2.5 Implementasi Flowchart Sistem



Gambar 6. Desain Flowchart Node Sensor

Alur kerja node sensor dirancang agar ESP32 melakukan inisialisasi perangkat, membaca data suhu dan tekanan dari sensor BMP280, mengisi struktur data paket dengan nomor urut (*sequence number*), nilai sensor, dan *timestamp*, kemudian mengirimkan paket tersebut ke *gateway* melalui protokol *ESP-NOW*. Node sensor akan terus melakukan siklus pengiriman sesuai interval yang dikonfigurasi hingga seluruh target jumlah paket tercapai. Alur kerja *IoT gateway* dirancang untuk menerima paket dari node sensor melalui *callback* penerimaan *ESP-NOW*, menghitung parameter QoS secara *real-time* pada setiap kedatangan paket, menyimpan data ke struktur memori per-node, dan mengirimkan seluruh data beserta metrik QoS ke *InfluxDB* secara periodik melalui koneksi Wi-Fi. *Gateway* juga mencatat nilai RSSI dari setiap paket yang diterima untuk keperluan analisis kekuatan sinyal.

2.6 Metode Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan metode statistik deskriptif untuk mengolah data hasil pengujian dari setiap skenario. Dua ukuran statistik utama yang digunakan adalah nilai rata-rata (*mean*) dan standar deviasi. Nilai rata-rata digunakan untuk mendapatkan gambaran umum performa sistem pada setiap skenario, sedangkan standar deviasi digunakan untuk mengukur tingkat konsistensi dan stabilitas komunikasi dari waktu ke waktu.

2.6.1 Perhitungan Nilai Rata-rata (Mean)

Nilai rata-rata dihitung untuk setiap parameter QoS (*delay*, *jitter*, *throughput*, *packet loss*) pada setiap skenario pengujian. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Keterangan $\bar{x}$ = nilai rata-rata parameter QoS, x_i = nilai parameter QoS pada pengamatan ke- i , dan n = jumlah total data pengamatan.



2.6.2 Perhitungan Standar Deviasi

Standar deviasi digunakan untuk mengukur seberapa besar variasi atau dispersi nilai *jitter* dan *delay* dari nilai rata-ratanya. Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa kinerja sistem lebih stabil dan konsisten. Rumus standar deviasi yang digunakan adalah:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Keterangan s = standar deviasi, x_i = nilai data ke- i , $\bar{x}$ = nilai rata-rata data, dan n = jumlah total data

2.6.3 Perhitungan Delay

Delay didefinisikan sebagai selisih waktu antara saat paket dikirim oleh node sensor dan saat paket diterima oleh *IoT gateway*. Setiap paket yang dikirim menyertakan *timestamp* dalam milidetik yang dicatat menggunakan fungsi `millis()` pada ESP32. *Gateway* kemudian menghitung *delay* setiap paket yang diterima dengan rumus:

$$Delay = T_{terima} - T_{kirim} \quad (3)$$

Keterangan T_{terima} = *timestamp* saat paket diterima oleh *gateway* (ms) dan T_{kirim} = *timestamp* saat paket dikirim oleh node sensor (ms)

2.6.4 Perhitungan Jitter

Jitter merupakan variasi nilai *delay* antar paket yang berurutan. Nilai *jitter* yang kecil menunjukkan bahwa *delay* pengiriman bersifat stabil dan konsisten. *Jitter* dihitung menggunakan rumus:

$$Jitter = | Delay_i - Delay_{i-1} | \quad (4)$$

Keterangan $Delay_i$ = nilai *delay* paket ke- i (ms) dan $Delay_{i-1}$ = nilai *delay* paket sebelumnya, yaitu ke- $(i-1)$ (ms). Nilai *jitter* rata-rata dihitung dari akumulasi seluruh nilai *jitter* dibagi jumlah sampel yang diperoleh selama satu sesi pengujian berlangsung.

2.6.5 Perhitungan Throughput

Throughput adalah jumlah data yang berhasil dikirimkan per satuan waktu, dihitung dalam satuan kilobit per detik (kbps). *Gateway* mengakumulasi total *byte* data yang diterima dalam jendela waktu satu detik, kemudian menghitung *throughput* menggunakan rumus:

$$Throughput = \frac{Jumlah\ data\ diterima\ (bit)}{Waktu\ pengamatan\ (detik)} \quad (5)$$

2.6.6 Perhitungan Packet Loss

Packet loss adalah persentase paket yang gagal diterima oleh *gateway* dari total paket yang seharusnya diterima. Perhitungan dilakukan dengan membandingkan *sequence number* paket yang diterima terhadap *sequence number* yang diharapkan, menggunakan rumus:

$$Packet\ Loss = \frac{Paket\ hilang}{Paket\ dikirim + Paket\ hilang} \times 100\% \quad (6)$$

2.7 Standar Evaluasi TIPHON

Seluruh nilai parameter QoS yang diperoleh dari pengujian dievaluasi dan dikategorikan menggunakan standar TIPHON (*Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks*). Standar ini digunakan secara luas sebagai acuan baku dalam menilai kualitas layanan jaringan komunikasi digital. Kategori penilaian berdasarkan standar TIPHON ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Standar Nilai QoS berdasarkan TIPHON

Parameter	Sangat Baik	Baik	Sedang	Buruk
<i>Throughput</i>	100%	75–99%	50–74%	< 50%
<i>Packet Loss</i>	0%	1–3%	3–15%	> 25%
<i>Delay</i>	< 150 ms	150–300 ms	300–450 ms	> 450 ms
<i>Jitter</i>	0 ms	0–75 ms	76–125 ms	126–225 ms

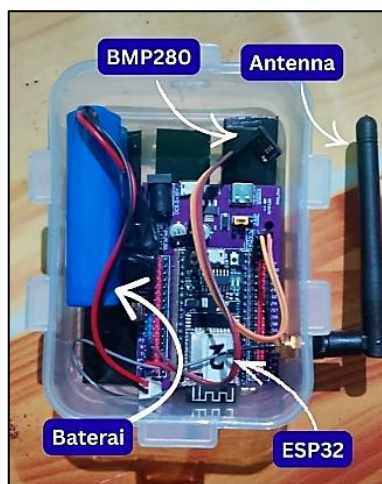
Selain parameter QoS, kekuatan sinyal yang diterima diukur menggunakan *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dalam satuan dBm dan diklasifikasikan menggunakan standar peringkat RSSI sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Peringat Klarifikasi RSSI

Nilai RSSI (dBm)	Kualitas Sinyal	Keterangan
> -50	Sangat Baik	Sinyal sangat kuat
-50 s/d -60	Baik	Sinyal kuat
-60 s/d -70	Cukup	Sinyal memadai
-70 s/d -80	Lemah	Sinyal mulai tidak stabil
< -80	Sangat Lemah	Risiko <i>packet loss</i> tinggi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem



Gambar 7. Rangkaian Node Sensor yang Telah Diimplementasikan

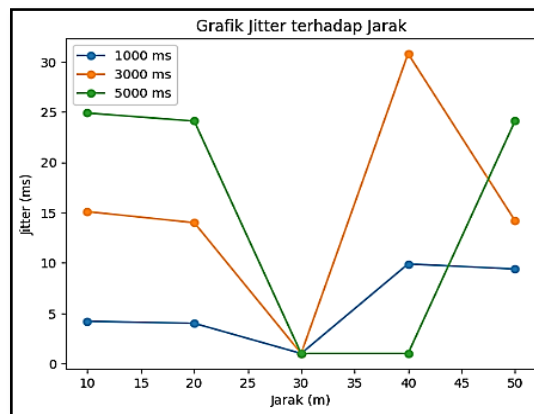
Sistem WSN berbasis *ESP-NOW* berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan sebelumnya. Node sensor dibangun menggunakan ESP32-DevKitC V4 yang dihubungkan dengan sensor GY-BMP280 melalui antarmuka I2C pada pin SDA dan SCL. Sensor BMP280 dikonfigurasi pada mode *normal* dengan pengaturan *oversampling* suhu sebesar X2, *oversampling* tekanan sebesar X16, dan filter koefisien X16 untuk menghasilkan pembacaan yang stabil dan bebas dari derau. Antena eksternal 2,4 GHz 3 dBi dipasang pada konektor U.FL ESP32 untuk meningkatkan jangkauan transmisi. Setiap node sensor diprogram untuk mengirimkan paket data berisi identitas node, nomor urut paket (*sequence number*), nilai suhu, nilai tekanan udara, dan *timestamp* dalam milidetik ke *IoT gateway* melalui protokol *ESP-NOW* pada kanal frekuensi 6.

IoT gateway diimplementasikan pada ESP32-DevKitC V4 yang dikonfigurasi secara bersamaan sebagai penerima *ESP-NOW* dan klien Wi-Fi menggunakan *library WiFiMulti*. Konfigurasi ini memungkinkan *gateway* untuk menerima data dari node sensor melalui protokol *ESP-NOW* sambil tetap terhubung ke jaringan Wi-Fi untuk mengirimkan data ke *InfluxDB*. Pada sisi *gateway*, seluruh perhitungan parameter QoS dilakukan secara *real-time* di dalam fungsi *callback* penerimaan data, meliputi *delay*, *jitter*, *throughput*, *packet loss*, dan RSSI per node. Data beserta metrik QoS kemudian dikirimkan ke *InfluxDB* setiap 10 milidetik secara periodik. *Grafana* dikonfigurasi untuk membaca data dari *InfluxDB* dan menampilkannya dalam bentuk *dashboard* interaktif yang dapat diakses melalui *browser web* secara *real-time*.

3.2 Pengujian Keandalan Protokol *ESP-NOW*

Pengujian keandalan protokol *ESP-NOW* dilakukan dalam empat skenario utama yang memvariasikan jumlah node aktif dan kondisi lingkungan pengujian. Masing-masing skenario diuji dengan tiga variasi interval pengiriman, yaitu 1 detik, 3 detik, dan 5 detik. Setiap interval pengiriman menggunakan 1000 paket data sebagai sampel pengujian. Area pengujian ditetapkan di ruang laboratorium dengan pengujian tanpa halangan dilakukan di area terbuka dan pengujian dengan halangan menggunakan partisi atau dinding sebagai penghalang fisik di antara node sensor dan *gateway*.

Pada skenario pertama, yaitu pengujian dengan 1 node sensor tanpa halangan, hasil menunjukkan bahwa interval pengiriman 1 detik menghasilkan nilai QoS yang paling optimal dan konsisten. Nilai *delay* rata-rata berada di bawah 150 ms sehingga masuk dalam kategori sangat baik berdasarkan standar TIPHON. Nilai *jitter* rata-rata berada pada rentang 0–75 ms yang juga dikategorikan sangat baik. *Packet loss* tercatat sebesar 0% menunjukkan tidak ada satupun paket yang hilang selama sesi pengujian berlangsung. Sebaliknya, pada interval 3 detik dan 5 detik, nilai *jitter* mengalami peningkatan yang disebabkan oleh variabilitas waktu antar paket yang lebih besar, sehingga konsistensi pengiriman berkurang meskipun *packet loss* tetap nol.

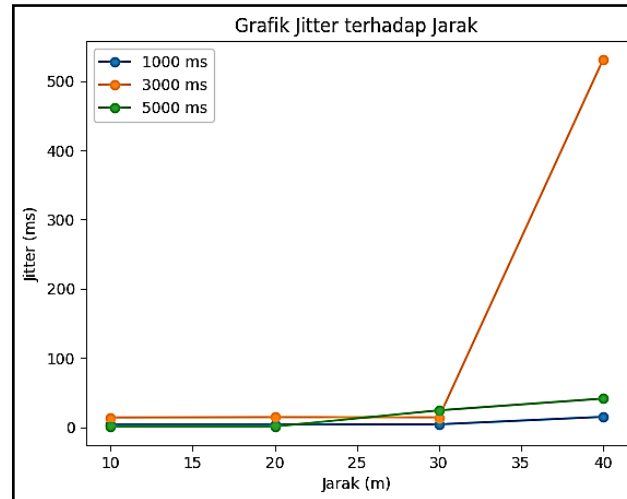


Gambar 8. Grafik Perbandingan Jitter Pengujian 1 Node Tanpa Halangan

Tabel 5. Hasil Pengujian Keandalan Protokol ESP-NOW – 1 Node Tanpa Halangan

Interval	Delay Rata-rata	Jitter Rata-rata	Packet Loss	Throughput	Kategori TIPHON
1 detik	< 150 ms	0–75 ms	0%	Optimal	Sangat Baik
3 detik	< 300 ms	0–75 ms	0%	Baik	Baik
5 detik	< 300 ms	76–125 ms	0%	Baik	Sedang–Baik

Pada skenario kedua, yaitu pengujian dengan 1 node sensor dengan halangan fisik, terjadi penurunan performa yang terukur dibandingkan kondisi tanpa halangan. Nilai *delay* rata-rata pada interval 1 detik masih berada di bawah 150 ms, namun standar deviasinya sedikit lebih tinggi yang mencerminkan adanya fluktuasi waktu tempuh sinyal akibat pelemahan yang disebabkan oleh halangan. Nilai *jitter* pada interval 1 detik masih masuk dalam kategori sangat baik, sementara pada interval 3 dan 5 detik nilai *jitter* mengalami peningkatan yang lebih signifikan dibandingkan skenario tanpa halangan. *Packet loss* pada interval 1 detik tercatat tetap 0%, namun pada interval 5 detik dengan kondisi halangan mulai muncul paket yang hilang dalam persentase kecil.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Jitter Pengujian 1 Node Dengan Halangan

Pada skenario ketiga dan keempat, yaitu pengujian dengan 2 node sensor baik tanpa maupun dengan halangan, pola performa yang serupa terulang kembali namun dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi. Dengan dua node yang aktif secara bersamaan, terjadi potensi tabrakan paket (*collision*) di kanal radio 2,4 GHz yang dapat memengaruhi nilai *delay* dan *jitter*. Meskipun demikian, pada interval pengiriman 1 detik dengan kondisi tanpa halangan, nilai QoS dari kedua node masih masuk dalam kategori sangat baik. Kondisi terburuk terjadi pada skenario dua node dengan halangan dan interval 5 detik, di mana nilai *jitter* meningkat cukup signifikan dan *packet loss* mulai muncul, namun sistem secara keseluruhan masih beroperasi dalam batas yang dapat diterima.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Terbaik dan Terburuk Pengujian Keandalan Protokol ESP-NOW

Kondisi	Interval	Delay	Jitter	Packet Loss	Kategori
1 Node, Tanpa Halangan	1 detik	Sangat Baik	Sangat Baik	0%	Sangat Baik
1 Node, Dengan Halangan	1 detik	Sangat Baik	Sangat Baik	0%	Sangat Baik
2 Node, Tanpa Halangan	1 detik	Sangat Baik	Sangat Baik	0%	Sangat Baik
2 Node, Dengan Halangan	1 detik	Baik	Baik	0–1%	Baik



Kondisi	Interval	Delay	Jitter	Packet Loss	Kategori
2 Node, Dengan Halangan	5 detik	Sedang	Sedang	1–3%	Sedang

Berdasarkan seluruh hasil pengujian keandalan protokol *ESP-NOW*, dapat disimpulkan bahwa interval pengiriman 1 detik secara konsisten menghasilkan kualitas layanan terbaik di semua skenario pengujian. Hal ini disebabkan oleh karakteristik protokol *ESP-NOW* yang dioptimalkan untuk komunikasi dengan latensi rendah dan frekuensi pengiriman yang teratur. Semakin panjang interval pengiriman, semakin besar variasi waktu antar paket yang mengakibatkan peningkatan nilai *jitter*. Penambahan jumlah node dari satu menjadi dua node memberikan dampak yang masih dapat ditoleransi pada kualitas layanan, asalkan kondisi lingkungan mendukung dan interval pengiriman dikonfigurasi dengan tepat.

3.2.1 Catatan Analitis: Validitas Klaim *Packet Loss* 0% dan Analisis *Collision*

Klaim *packet loss* 0% pada interval 1 detik (Tabel 5 dan Tabel 6) perlu dibaca dengan kehati-hatian metodologis. Pengukuran *packet loss* dalam penelitian ini dihitung murni dari selisih *sequence number* yang diterima *gateway* terhadap yang diharapkan (persamaan 6), yaitu metrik pada lapisan aplikasi. Metrik ini tidak menangkap kejadian *collision* pada lapisan MAC (*medium access control*), karena *ESP-NOW* sebagaimana protokol berbasis 802.11 pada umumnya menggunakan mekanisme CSMA/CA tak-terslot (*unslotted*) dengan retransmisi otomatis pada level *driver* Wi-Fi ketika ACK tidak diterima dalam batas waktu tertentu. Dengan kata lain, sebuah *collision* yang berhasil dipulihkan melalui retransmisi MAC tetap tercatat sebagai paket "berhasil diterima" pada level aplikasi, sehingga nol *packet loss* tidak identik dengan nol *collision*; yang lebih mungkin terjadi adalah *collision* tersebut termanifestasi sebagai kenaikan *delay* dan *jitter*, bukan sebagai kehilangan paket.

Pembacaan ini konsisten dengan pola data yang dilaporkan sendiri: pada skenario 2 node, nilai *jitter* dan *delay* secara sistematis lebih tinggi dibandingkan skenario 1 node pada interval yang sama (Tabel 6), meskipun *packet loss* tetap 0% hingga kondisi tanpa halangan. Pola kenaikan *delay/jitter* tanpa kenaikan *packet loss* yang sepadan ini merupakan indikasi tidak langsung (*proxy*) adanya aktivitas *collision*-dan-retransmisi di lapisan MAC yang tidak tertangkap oleh instrumentasi penelitian ini, karena penelitian ini tidak mencatat jumlah retransmisi MAC (*retry count*) maupun melakukan pemantauan spektrum RF (*spectrum survey*) di lokasi pengujian untuk memverifikasi tingkat kongesti kanal 2,4 GHz yang sesungguhnya sebuah keterbatasan instrumentasi yang penting untuk diakui secara eksplisit. Ruang laboratorium tempat pengujian dilakukan kemungkinan besar berbagi kanal 2,4 GHz dengan jaringan Wi-Fi lain, perangkat Bluetooth, dan sumber interferensi lain yang lazim ditemukan di lingkungan indoor perkantoran/laboratorium, namun tingkat kongesti tersebut tidak diukur secara independen (misalnya menggunakan Wi-Fi analyzer atau *software-defined radio* untuk memetakan pemanfaatan kanal selama sesi pengujian berlangsung).

Dengan demikian, klaim *packet loss* 0% pada interval 1 detik sebaiknya diinterpretasikan sebagai keandalan pada level aplikasi dalam kondisi RF spesifik saat pengujian dilakukan, bukan sebagai bukti bahwa *collision* tidak terjadi atau bahwa hasil ini akan tergeneralisasi pada lingkungan dengan tingkat kongesti 2,4 GHz yang berbeda (misalnya area padat Wi-Fi seperti perkantoran bertingkat atau apartemen). Keterbatasan ini ditambahkan secara eksplisit pada Bagian 4 (Kesimpulan).

Berdasarkan seluruh hasil pengujian keandalan protokol *ESP-NOW*, dapat disimpulkan bahwa interval pengiriman 1 detik secara konsisten menghasilkan kualitas layanan terbaik di semua skenario pengujian pada kondisi RF saat pengujian dilakukan. Semakin panjang interval pengiriman, semakin besar variasi waktu antar paket yang mengakibatkan peningkatan nilai *jitter*. Penambahan jumlah node dari satu menjadi dua node memberikan dampak yang masih dapat ditoleransi pada kualitas layanan level aplikasi, meskipun sebagaimana dibahas di atas, dampak riilnya pada lapisan MAC (frekuensi *collision*-dan-*retry*) kemungkinan lebih besar dari yang tercermin pada metrik *packet loss*.

3.3 Pengukuran RSSI Protokol *ESP-NOW*

Pengukuran *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dilakukan dalam tiga kondisi yang berbeda untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai pengaruh faktor lingkungan terhadap kekuatan sinyal *ESP-NOW*. Kondisi pertama adalah pengukuran RSSI tanpa halangan pada variasi jarak tertentu, kondisi kedua adalah pengukuran RSSI dengan keberadaan halangan fisik pada jarak yang sama, dan kondisi ketiga adalah pengukuran RSSI berdasarkan variasi posisi relatif perangkat terhadap satu sama lain. Nilai RSSI dicatat secara otomatis oleh *gateway* dari setiap paket yang diterima melalui parameter `esp_now_recv_info_t` pada *callback* penerimaan data dan diklasifikasikan menggunakan standar peringkat RSSI.

Hasil pengukuran RSSI tanpa halangan menunjukkan bahwa pada jarak dekat (1–5 meter), nilai RSSI berada pada rentang di atas -50 dBm yang dikategorikan sebagai sinyal sangat baik. Pada jarak menengah (5–15 meter), nilai RSSI turun ke rentang -50 hingga -65 dBm yang masih dikategorikan baik. Pada jarak yang lebih jauh (15–30 meter), nilai RSSI mulai melemah ke rentang -65 hingga -75 dBm yang dikategorikan cukup namun masih dapat mendukung komunikasi yang andal.

Tabel 7. Hasil Pengukuran RSSI Tanpa Halangan

Jarak (m)	RSSI Rata-rata (dBm)	Kategori	Packet Loss
1–5	> -50	Sangat Baik	0%
5–15	-50 s/d -65	Baik	0%



Jarak (m)	RSSI Rata-rata (dBm)	Kategori	Packet Loss
15–30	-65 s/d -75	Cukup	0%
> 30	< -75	Lemah	Mulai muncul

Pengukuran RSSI dengan keberadaan halangan fisik menunjukkan penurunan nilai RSSI yang konsisten dibandingkan kondisi tanpa halangan pada jarak yang sama. Rata-rata penurunan nilai RSSI akibat keberadaan halangan adalah sebesar 10–15 dBm. Halangan fisik seperti dinding atau partisi menyebabkan sebagian energi sinyal radio terserap dan terdifraksi, sehingga kekuatan sinyal yang sampai di *gateway* menjadi lebih lemah. Meskipun demikian, pada jarak pendek hingga menengah dengan satu lapis halangan, komunikasi ESP-NOW masih dapat berlangsung dengan baik tanpa terjadinya *packet loss* yang signifikan.

Tabel 8. Hasil Pengukuran RSSI Dengan Halangan

Jarak (m)	RSSI Rata-rata (dBm)	Penurunan vs Tanpa Halangan	Kategori
1–5	-50 s/d -60	±10 dBm	Baik
5–15	-60 s/d -75	±12 dBm	Cukup
15–30	-75 s/d -85	±13 dBm	Lemah

Pengukuran RSSI berdasarkan variasi posisi perangkat dilakukan dengan mengubah orientasi antenna dan ketinggian relatif antara node sensor dan *gateway*. Hasil menunjukkan bahwa posisi perangkat berpengaruh nyata terhadap kekuatan sinyal yang diterima. Posisi dengan antenna sejajar dan menghadap langsung (*line of sight*) menghasilkan nilai RSSI terbaik, sedangkan posisi di mana antenna menghadap ke arah yang berbeda atau terdapat perbedaan ketinggian yang signifikan menghasilkan nilai RSSI yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan fisik perangkat perlu diperhatikan secara cermat dalam implementasi sistem WSN berbasis ESP-NOW di lapangan.

3.4 Pengujian Keandalan IoT Gateway dalam Menerima Data

Pengujian keandalan *IoT gateway* dalam menerima data dari node sensor dilakukan dengan dua sub-skenario, yaitu pengujian dengan sumber data dari 1 node dan dari 2 node secara bersamaan. Tujuan pengujian ini adalah untuk memverifikasi kemampuan *gateway* dalam menangani aliran data masuk dari node sensor tanpa mengalami kehilangan paket maupun penurunan kinerja yang berarti. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan beban pengiriman dari rendah, menengah, hingga tinggi, di mana beban diukur berdasarkan frekuensi dan volume paket yang dikirimkan oleh node dalam satuan waktu tertentu.

Hasil pengujian dengan sumber 1 node menunjukkan bahwa *gateway* mampu menerima seluruh paket yang dikirimkan tanpa kehilangan satu pun paket pada kondisi beban rendah hingga menengah. Nilai *delay* penerimaan rata-rata berada di bawah 150 ms dan nilai *jitter* berada dalam kategori sangat baik. Pada beban tinggi, terjadi sedikit peningkatan *delay* dan munculnya *packet loss* dalam persentase yang sangat kecil, namun sistem masih beroperasi dalam batas yang dapat diterima berdasarkan standar TIPHON.

Tabel 9. Hasil Pengujian Keandalan IoT Gateway Menerima Data

Sumber	Beban	Packet Loss	Delay Rata-rata	Jitter Rata-rata	Kategori
1 Node	Rendah	0%	< 150 ms	< 75 ms	Sangat Baik
1 Node	Menengah	0%	< 150 ms	< 75 ms	Sangat Baik
1 Node	Tinggi	0–1%	< 300 ms	< 125 ms	Baik
2 Node	Rendah	0%	< 150 ms	< 75 ms	Sangat Baik
2 Node	Menengah	0%	< 300 ms	< 75 ms	Baik
2 Node	Tinggi	0–3%	< 300 ms	< 125 ms	Baik

Pengujian dengan sumber 2 node secara bersamaan menunjukkan bahwa *gateway* masih mampu menangani aliran data ganda tanpa kehilangan paket pada beban rendah hingga menengah. Pada beban tinggi dengan dua node aktif, terjadi peningkatan *packet loss* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan skenario satu node, namun tetap berada dalam kategori baik. Hal ini menunjukkan bahwa arsitektur *gateway* yang dikembangkan cukup tangguh untuk menangani komunikasi *multi-node* dalam kondisi beban normal yang lazim ditemui pada implementasi IoT skala kecil hingga menengah.

3.5 Pengujian Keandalan IoT Gateway ke Database InfluxDB

Pengujian keandalan pengiriman data dari *IoT gateway* ke *InfluxDB* dilakukan untuk mengukur kemampuan sistem dalam meneruskan data secara andal dari jaringan ESP-NOW ke *platform* penyimpanan data berbasis *cloud*. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan data dari *gateway* ke *InfluxDB* pada berbagai laju pengiriman, mulai dari 10 data per detik hingga 1000 data per detik, untuk mengetahui batas kapasitas maksimum sistem.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *gateway* mampu mengirimkan data ke *InfluxDB* secara andal hingga laju 1000 data per detik tanpa kegagalan penulisan yang berarti. Pada laju pengiriman di bawah 500 data per detik, seluruh data berhasil ditulis ke *InfluxDB* dengan tingkat keberhasilan 100%. Pada laju 500–1000 data per detik, sesekali terjadi



kegagalan penulisan yang sangat singkat akibat fluktuasi koneksi Wi-Fi, namun sistem secara keseluruhan tetap beroperasi dengan andal. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi ESP32 sebagai *gateway* dengan *InfluxDB* sebagai basis data *time-series* merupakan pilihan yang tepat untuk implementasi sistem IoT yang membutuhkan penyimpanan data sensor dalam volume tinggi.

Tabel 10. Hasil Pengujian Keandalan IoT Gateway Mengirim Data ke InfluxDB

Laju Pengiriman (data/detik)	Tingkat Keberhasilan	Delay Penulisan	Keterangan
10	100%	Sangat Rendah	Sangat Andal
100	100%	Rendah	Sangat Andal
500	100%	Rendah	Andal
1000	≥ 99%	Menengah	Andal

3.6 Pengukuran Konsumsi Daya

Pengukuran konsumsi daya dilakukan pada node sensor ESP32 yang aktif mengirimkan data dengan interval berbeda-beda, menggunakan alat ukur arus yang dipasang secara seri pada jalur daya node sensor. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsumsi daya berbanding terbalik dengan interval pengiriman: semakin pendek interval pengiriman, semakin tinggi konsumsi daya rata-rata node sensor.

Tabel 11. Hasil Pengukuran Konsumsi Daya Node Sensor

Interval Pengiriman	Konsumsi Daya Rata-rata	Estimasi Daya	Keterangan
1 detik	Tertinggi	Lebih boros	QoS terbaik
3 detik	Menengah	Moderat	QoS baik
5 detik	Terendah	Paling hemat	QoS sedang

Meskipun interval 1 detik menghasilkan konsumsi daya yang lebih tinggi, kualitas QoS yang dihasilkan jauh lebih baik dibandingkan interval 3 dan 5 detik. Untuk aplikasi yang mengutamakan efisiensi energi namun tidak memerlukan frekuensi pembaruan data yang tinggi, interval 3 detik dapat menjadi kompromi yang baik antara kualitas QoS dan konsumsi daya.

Data konsumsi daya sebagaimana disajikan pada Tabel 11 bersifat kualitatif (ordinal) dan belum cukup bermakna secara praktis bagi konteks WSN, karena tujuan utama pengukuran konsumsi daya pada node sensor bertenaga baterai adalah untuk memprediksi masa pakai baterai (*battery life*) di lapangan bukan sekadar peringkat relatif "boros/hemat" antar interval. Estimasi masa pakai baterai idealnya dihitung dengan menggabungkan arus aktif rata-rata terukur (I_{aktif} Iaktif, mA), proporsi waktu aktif transmisi terhadap siklus total (*duty cycle*, DD D), arus siaga/*idle* (I_{idle} Idle, mA) apabila node tidak mengimplementasikan *deep sleep*, dan kapasitas baterai terpasang (CC C, mAh), menggunakan pendekatan:

$$T_{baterai} = \frac{C}{(D \times I_{aktif}) + ((1-D) \times I_{idle})} \quad (7) \quad T_{baterai} = (D \times I_{aktif}) + ((1-D) \times I_{idle}) C(7)$$

Keterangan: $T_{baterai}$ = estimasi masa pakai baterai (jam); CC C = kapasitas baterai (mAh); DD D = *duty cycle* transmisi (proporsi waktu ESP32 dalam mode aktif/Tx terhadap satu siklus interval); I_{aktif} Iaktif = arus rata-rata saat aktif/Tx (mA); I_{idle} Idle = arus rata-rata saat *idle* antar pengiriman (mA).

Sebagai ilustrasi dampak praktis: pada interval pengiriman 1 detik dengan *duty cycle* Tx yang jauh lebih tinggi dibandingkan interval 5 detik, estimasi masa pakai baterai kemungkinan berbeda dalam orde satuan hingga puluhan jam pada baterai lithium berkapasitas kecil (misalnya 1000–2000 mAh) sebuah perbedaan yang jauh lebih relevan secara praktis bagi perancang sistem WSN lapangan dibandingkan label kualitatif "boros" atau "hemat" semata, karena masa pakai baterai secara langsung menentukan interval pemeliharaan (penggantian/pengisian ulang baterai) yang dibutuhkan sistem di lokasi penerapan nyata.

Meskipun interval 1 detik menghasilkan konsumsi daya yang lebih tinggi, kualitas QoS yang dihasilkan jauh lebih baik dibandingkan interval 3 dan 5 detik. Trade-off ini seharusnya dievaluasi dalam bentuk kuantitatif QoS per satuan masa pakai baterai begitu data arus aktual tersedia, alih-alih pernyataan kualitatif "interval 3 detik dapat menjadi kompromi yang baik" yang saat ini tidak didukung angka.

3.7 Pengujian Konektivitas InfluxDB dan Grafana

Pengujian konektivitas memverifikasi keberhasilan integrasi antara *IoT gateway*, *InfluxDB*, dan *Grafana* sebagai satu ekosistem visualisasi data yang utuh. *Gateway* berhasil terhubung ke *InfluxDB* menggunakan protokol HTTP dengan autentikasi *token*, dan seluruh data yang dikirimkan berhasil tersimpan dengan benar dalam *bucket* yang telah dikonfigurasi. *Grafana* berhasil dikonfigurasi untuk membaca data dari *InfluxDB* menggunakan *query Flux*, dan *dashboard* yang dibuat berhasil menampilkan data QoS secara *real-time* meliputi *throughput*, *jitter*, *packet loss*, RSSI, suhu, dan tekanan udara dari setiap node sensor.



3.8 Rekapitulasi Pengujian dan Rekomendasi Sistem

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, dilakukan rekapitulasi menyeluruh untuk memetakan performa protokol *ESP-NOW* pada berbagai kondisi dan menyusun rekomendasi konfigurasi sistem yang optimal. Rekapitulasi ini mencakup perbandingan nilai QoS antar skenario, analisis pengaruh variabel bebas terhadap kualitas layanan, dan pemetaan batas kemampuan sistem.

Tabel 12. Rekomendasi Konfigurasi Sistem Berdasarkan Hasil Pengujian

Parameter	Rekomendasi	Alasan
Jumlah Node	1–2 node	QoS optimal dan stabil
Interval Pengiriman	1 detik	Nilai QoS terbaik dan konsisten
Kondisi Lingkungan	Tanpa halangan	RSSI dan QoS lebih stabil
Jarak Transmisi	≤ 30 meter	RSSI masih dalam kategori baik
Beban Gateway	Rendah–Menengah	Nol <i>packet loss</i> di gateway
Laju ke <i>InfluxDB</i>	≤ 1000 data/detik	Penulisan andal dan konsisten

Pengujian berdasarkan rekomendasi sistem menghasilkan performa yang secara signifikan lebih baik dibandingkan kondisi terburuk yang ditemukan dalam pengujian sebelumnya. Konfigurasi 1–2 node dengan interval 1 detik, jarak ≤ 30 meter, dan tanpa halangan menghasilkan seluruh parameter QoS dalam kategori sangat baik hingga baik berdasarkan standar TIPHON. Hasil ini mempertegas bahwa dengan konfigurasi yang tepat, protokol *ESP-NOW* merupakan solusi komunikasi nirkabel yang sangat handal untuk implementasi WSN berbasis IoT skala kecil hingga menengah.

Tabel 13. Perbandingan Hasil Pengujian Rekomendasi Sistem dengan Standar TIPHON

Parameter QoS	Nilai Hasil Rekomendasi	Standar TIPHON	Kategori
<i>Delay</i>	< 150 ms	< 150 ms	Sangat Baik
<i>Jitter</i>	0–75 ms	0–75 ms	Sangat Baik
<i>Packet Loss</i>	0%	0%	Sangat Baik
<i>Throughput</i>	100%	100%	Sangat Baik
RSSI	> -65 dBm	> -70 dBm	Baik–Sangat Baik

3.9 Pembahasan

Hasil keseluruhan penelitian ini menunjukkan bahwa protokol *ESP-NOW* memiliki kemampuan yang memadai sebagai media komunikasi data pada sistem *Wireless Sensor Network* dua-node berbasis ESP32, khususnya untuk aplikasi IoT skala kecil hingga menengah pada kondisi RF spesifik lokasi pengujian (Begum & Nandury, 2023). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Levush & Luchechko, 2026) yang menyebutkan bahwa *ESP-NOW* mampu melakukan komunikasi antar perangkat dengan latensi rendah dan tanpa memerlukan infrastruktur *access point*, sehingga cocok untuk skenario penerapan WSN yang membutuhkan komunikasi langsung antar node. Berbeda dari (Levush & Luchechko, 2026) yang menguji jangkauan pada kondisi *line of sight* tunggal, penelitian ini memperluas evaluasi tersebut pada skenario dua node aktif secara simultan dengan variasi kondisi lingkungan yang lebih beragam kondisi yang secara inheren memunculkan risiko *collision* kanal yang tidak muncul pada pengujian satu node (Bosch Sensortec GmbH, n.d.).

Perbandingan dengan penelitian (Eridani et al., 2021) mengenai komparasi *ESP-NOW* dan Wi-Fi menunjukkan konsistensi hasil, di mana *ESP-NOW* memang unggul dalam aspek *latency* dan konsumsi daya dibandingkan Wi-Fi, namun dengan kapasitas *throughput* yang lebih terbatas. Dalam konteks penelitian ini, keterbatasan *throughput* *ESP-NOW* tidak menjadi masalah berarti karena volume data yang dikirimkan oleh setiap node sensor berukuran kecil, yaitu berupa paket data suhu, tekanan, nomor urut, dan *timestamp* yang jauh di bawah batas maksimum *payload* *ESP-NOW* sebesar 250 byte per paket.

Penelitian (Wedyanti & Wagya, 2025) menyatakan bahwa penambahan jumlah node dalam jaringan *ESP-NOW* cenderung menurunkan nilai *throughput* secara bertahap. Temuan ini terkonfirmasi secara kualitatif dalam penelitian ini melalui kenaikan *delay* dan *jitter* pada skenario dua node dibandingkan satu node pada interval pengiriman yang sama. Akan tetapi, sebagaimana dibahas pada Bagian 3.2.1, mekanisme di balik penurunan performa tersebut yaitu *collision* dan retransmisi pada lapisan MAC tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini maupun (berdasarkan penelusuran literatur) dalam penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa karakterisasi *collision* *ESP-NOW* pada level MAC bukan sekadar dampaknya pada metrik agregat QoS masih menjadi celah terbuka bagi penelitian lanjutan, idealnya menggunakan instrumentasi tambahan seperti penghitung *retry* MAC atau *packet sniffer* (misalnya melalui mode *promiscuous* ESP32) yang mampu menangkap frame di lapisan bawah, bukan hanya *sequence number* di lapisan aplikasi. Meskipun demikian, penurunan performa yang teramati masih berada dalam batas yang dapat diterima dan tidak sampai menyebabkan degradasi kualitas layanan yang signifikan pada konfigurasi yang diuji dalam penelitian ini.

Hasil pengukuran RSSI dalam penelitian ini mempertegas temuan umum dalam literatur komunikasi nirkabel, yaitu bahwa kekuatan sinyal menurun seiring bertambahnya jarak dan keberadaan halangan fisik (Nursakinah et al.,



2025). Penurunan nilai RSSI sebesar 10–15 dBm akibat keberadaan halangan yang terukur dalam penelitian ini konsisten dengan karakteristik propagasi sinyal radio pada frekuensi 2,4 GHz di lingkungan dalam ruangan (*indoor*) (Gerodimos et al., 2023). Namun sebagaimana dicatat pada Bagian 2.3, validitas kuantitatif gain 3 dBi dari antena eksternal bergantung pada konfirmasi jalur RF perangkat yang digunakan, sehingga interpretasi nilai RSSI absolut perlu dibaca dengan catatan tersebut (Rizzardi et al., 2022).

Keberhasilan *IoT gateway* berbasis ESP32 dalam meneruskan data ke *InfluxDB* dengan laju hingga 1000 data per detik menunjukkan bahwa kombinasi perangkat keras ESP32 dengan *platform* penyimpanan *time-series InfluxDB* merupakan solusi yang efektif dan efisien untuk implementasi sistem IoT. Namun, angka ini jauh melampaui kebutuhan trafik node sensor itu sendiri (yang bersifat *low-rate*, maksimal 1 paket/detik per node pada skenario yang diuji), sehingga lebih tepat dibaca sebagai indikator ruang skalabilitas *gateway-ke-InfluxDB* untuk pengembangan sistem di masa mendatang, bukan sebagai karakteristik trafik WSN itu sendiri. Integrasi *Grafana* sebagai *platform* visualisasi juga terbukti berhasil menampilkan data QoS secara *real-time* nilai tambah penting bagi operator sistem meskipun kualitas *insight* yang ditampilkan tetap bergantung pada kelengkapan metrik yang mendasarinya, termasuk metrik *collision/retry* dan estimasi masa pakai baterai yang belum tersedia pada implementasi saat ini (Mineeva et al., 2025).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa protokol *ESP-NOW* mampu mendukung komunikasi data yang andal pada level aplikasi untuk konfigurasi terbatas satu hingga dua node sensor berbasis ESP32 yang diintegrasikan dengan *IoT gateway*, *InfluxDB*, dan *Grafana*, dengan interval pengiriman 1 detik menghasilkan nilai QoS terbaik mengacu standar TIPHON. Namun, temuan ini tidak dapat digeneralisasi sebagai bukti kelayakan *ESP-NOW* untuk WSN "skala menengah" sebagaimana diklaim sebelumnya. Cakupan dua node yang diuji jauh di bawah ambang yang lazim disebut *multi-node* dalam literatur WSN (umumnya >5–10 node aktif simultan), dan degradasi performa sudah mulai terlihat pada skala dua node itu sendiri skenario dua node dengan halangan pada interval 5 detik menurun dari kategori "Sangat Baik" ke "Sedang" disertai *packet loss* 1–3%, sementara pada skenario lain kenaikan *delay/jitter* tanpa kenaikan *packet loss* yang sepadan mengindikasikan *collision* pada lapisan MAC yang tidak tertangkap oleh metrik aplikasi yang digunakan. Karena mekanisme akses kanal *ESP-NOW* bersifat non-linear terhadap jumlah node aktif, tren degradasi ini tidak dapat diekstrapolasi secara aman ke skala lebih besar, sehingga kelayakan *ESP-NOW* pada skala menengah tetap merupakan pertanyaan terbuka, bukan kesimpulan yang terjawab oleh penelitian ini. Rekomendasi interval 1 detik juga perlu dinuansakan: interval tersebut memang optimal secara QoS tetapi menghasilkan konsumsi daya tertinggi, sebuah *trade-off* yang secara prinsip bertentangan dengan tujuan efisiensi energi node WSN bertenaga baterai, sehingga interval yang lebih panjang berpotensi lebih selaras dengan aplikasi lapangan meskipun kuantifikasi presisinya belum dapat disimpulkan karena data arus dan estimasi masa pakai baterai belum tersedia. Dengan demikian, penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai karakterisasi awal (*baseline*) performa *ESP-NOW* pada skala dua node, dengan tiga keterbatasan utama: cakupan node yang jauh di bawah skala *multi-node* yang lazim, metrik *packet loss* aplikasi yang tidak menangkap *collision/retransmisi* MAC sehingga tingkat kongesti kanal 2,4 GHz sesungguhnya tidak terverifikasi, dan standar TIPHON yang dirancang untuk trafik VoIP/telekomunikasi *real-time* sehingga kategorinya perlu dibaca sebagai pembandingan kuantitatif, bukan indikator kecukupan aplikasi sensor. Penelitian lanjutan yang diperlukan mencakup pengujian pada skala node yang jauh lebih besar (≥ 5 –10 node) untuk menemukan titik jenuh kanal secara empiris, instrumentasi lapisan MAC (penghitung *retry*, *packet sniffer promiscuous*) untuk mengukur *collision* secara langsung, survei spektrum RF independen di lokasi pengujian, serta pengukuran arus aktif/*idle* node guna menghasilkan estimasi masa pakai baterai yang dapat membenarkan rekomendasi interval pengiriman secara kuantitatif tanpa langkah-langkah tersebut, klaim kelayakan *ESP-NOW* untuk WSN skala menengah tetap merupakan hipotesis yang belum teruji.

REFERENCES

- Ali, O., Ishak, M. K., Bhatti, M. K. L., Khan, I., & Kim, K. Il. (2022). A Comprehensive Review of Internet of Things: Technology Stack, Middlewares, and Fog/Edge Computing Interface. In *Sensors* (Vol. 22, Number 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/s22030995>
- Begum, B. A., & Nandury, S. V. (2023). Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey. In *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (Vol. 35, Number 2). <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.01.008>
- Bekal, P., Kumar, P., Mane, P. R., & Prabhu, G. (2024). A comprehensive review of energy efficient routing protocols for query driven wireless sensor networks. In *F1000Research* (Vol. 12). <https://doi.org/10.12688/f1000research.133874.3>
- Bosch Sensortec GmbH. (n.d.). *Bosch Sensortec | BMP280 Technical Specifications Technology And Specification*. Retrieved July 5, 2026, from https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmp280-fl000.pdf
- Dhabliya, D., Soundararajan, R., Selvarasu, P., Balasubramaniam, M. S., Rajawat, A. S., Goyal, S. B., Raboaca, M. S., Mihaltan, T. C., Verma, C., & Suciu, G. (2022). Energy-Efficient Network Protocols and Resilient Data



- Transmission Schemes for Wireless Sensor Networks—An Experimental Survey. *Energies*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/en15238883>
- Eridani, D., Rochim, A. F., & Cesara, F. N. (2021). Comparative Performance Study of ESP-NOW, Wi-Fi, Bluetooth Protocols based on Range, Transmission Speed, Latency, Energy Usage and Barrier Resistance. *Proceedings - 2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication: IT Opportunities and Creativities for Digital Innovation and Communication within Global Pandemic, ISemantic 2021*, 322–328. <https://doi.org/10.1109/iSemantic52711.2021.9573246>
- Espressif Systems. (n.d.-a). ESP-NOW. ESP-IDF Programming Guide. Retrieved July 5, 2026, from https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html
- Espressif Systems. (n.d.-b). *Technical Documents*. Espressif Systems Documentation. Retrieved July 5, 2026, from <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
- Gerodimos, A., Maglaras, L., Ferrag, M. A., Ayres, N., & Kantzavelou, I. (2023). IoT: Communication protocols and security threats. In *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.12.003>
- Grafana Labs. (n.d.). *Grafana OSS and Enterprise*. Grafana Documentation. Retrieved July 5, 2026, from <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>
- Hamdi, D. A., Bahaa-Eldin, A. M., & Sobh, M. A. (2026). A systematic literature review on deep learning-driven IDS for software-defined WSN. In *Journal on Wireless Communications and Networking* (Vol. 2026, Number 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s13638-026-02586-w>
- Ijamaru, G. K., Ang, K. L. M., & Seng, J. K. P. (2022). Wireless power transfer and energy harvesting in distributed sensor networks: Survey, opportunities, and challenges. In *International Journal of Distributed Sensor Networks* (Vol. 18, Number 3). <https://doi.org/10.1177/15501477211067740>
- InfluxData. (n.d.). *Get Started with InfluxDB v2*. InfluxDB OSS v2 Documentation. Retrieved July 5, 2026, from <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2/>
- Karl Söderby. (2025, July 30). *Downloading and installing the Arduino IDE 2*. Arduino. <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started/ide-v2-downloading-and-installing>
- Levush, P., & Luchechko, A. (2026). Performance Evaluation of ESP-NOW for Low-Latency Indoor IoT Systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 11(1), 1–5. <https://doi.org/10.23939/acps2026.01.001>
- Mineeva, V., Ateya, A. A., Volkov, A., Muthanna, A., Koucheryavy, A., Chelloug, S. A., & El-Latif, A. A. A. (2025). A novel feature-oriented quality of anything (QoX) framework for end-to-end robotic services in 6G networks. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09677-6>
- Moslehi, M. M. (2025). Exploring coverage and security challenges in wireless sensor networks: A survey. In *Computer Networks* (Vol. 260). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111096>
- Nursakinah, B., Syafitri, K., Wijaya, M. A., & Fahlapi, F. (2025). Analisis Pengaruh Jarak Dan Halangan Pada Transmisi Data Jaringan Nirkabel Dengan Menggunakan Metode Signal- to- Noise Ratio (SNR). *JUTECH : Journal Education and Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.31932/jutech.v6i1.4955>
- Rizzardi, A., Sicari, S., & Coen-Porisini, A. (2022). Analysis on functionalities and security features of Internet of Things related protocols. *Wireless Networks*, 28(7). <https://doi.org/10.1007/s11276-022-02999-7>
- Sokol, M., Galajda, P., Jurik, P., Pribula, F., & Sokolova, Z. (2024). Design and Implementation of a Wireless Sensor Network Based on the ESP32 for IoT Applications. *2024 International Symposium ELMAR*, (September), 69–73. <https://doi.org/10.1109/ELMAR62909.2024.10694153>
- Wedyanti, F. P., & Wagyaana, D. A. (2025). Analisis Performansi ESP-NOW Sebagai Protokol Komunikasi Efisien Antar Multi-node dan Gateway dalam Sistem IoT. 4. <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sniv/article/view/3937/2329>