

Pengembangan Arsitektur Monitoring Lingkungan Berbasis Jaringan Hybrid ZigBee–WiFi dengan Penyimpanan Data Lokal

I Made Sastra Dwikiarta¹, I Made Adi Bhaskara², I Gede Wira Darma³

^{1,2,3}Teknik Komputer, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa, Bali

Email: ¹sastradwikiarta@warmadewa.ac.id, ²adibhaskara@warmadewa.ac.id, ³igedewiradarma@warmadewa.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹sastradwikiarta@warmadewa.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Hybrid ZigBee–WiFi Internet of Things Wireless Sensor Network Monitoring Lingkungan Data Logging Availability	Ketergantungan sistem monitoring <i>Internet of Things</i> (IoT) terhadap konektivitas WiFi dan internet dapat mengganggu kontinuitas pemantauan ketika jaringan eksternal mengalami gangguan. Penelitian ini mengembangkan arsitektur monitoring lingkungan berbasis jaringan hybrid ZigBee–WiFi dengan penyimpanan data lokal untuk mempertahankan layanan monitoring pada sisi lokal. Sistem terdiri atas dua node sensor, yaitu Transmitter 1 (TX1) dan Transmitter 2 (TX2), berbasis Arduino Uno dan XBee Series 1, serta satu Receiver Gateway berbasis Arduino UNO D1 R32 ESP32. ZigBee digunakan sebagai jaringan komunikasi lokal antara node dan gateway, sedangkan WiFi digunakan untuk monitoring daring melalui platform Blynk. Monitoring lokal direalisasikan menggunakan aplikasi Microsoft Visual Studio yang juga mendukung proses data logging. Pengujian dilakukan dalam tiga sesi dengan memanfaatkan log TX1, TX2, dan RX Gateway yang diselaraskan berdasarkan timestamp. Hasil pengujian menghasilkan 2.957 record pada RX dari 3.047 slot waktu satu detik, dengan kontinuitas pencatatan dan availability gabungan sebesar 97,05%. Rata-rata inter-arrival time sebesar 1,030 detik, dengan interval maksimum 5 detik dan 84 jeda penerimaan lebih dari satu detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan proses monitoring dan pencatatan pada sebagian besar periode pengujian, meskipun masih terdapat variasi kontinuitas penerimaan antar-sesi. Pengukuran PDR dan delay secara <i>packet-level</i> belum dapat dilakukan secara absolut karena data logger belum menggunakan sequence number dan timestamp pengiriman-penerimaan beresolusi sub-detik. Temuan tersebut menjadi dasar untuk penyempurnaan protokol komunikasi dan metode pengukuran pada penelitian selanjutnya.
Keywords: Hybrid ZigBee–WiFi Internet of Things Wireless Sensor Network Environmental Monitoring Data Logging Availability	Dependence of <i>Internet of Things</i> (IoT) monitoring systems on WiFi and internet connectivity can disrupt monitoring continuity when external network access is unavailable. This study develops an environmental monitoring architecture based on a hybrid ZigBee–WiFi network with local data storage to maintain local monitoring services. The system consists of two sensor nodes, Transmitter 1 (TX1) and Transmitter 2 (TX2), based on Arduino Uno and XBee Series 1, and an Arduino UNO D1 R32 ESP32 receiver gateway. ZigBee is used as the local communication network between sensor nodes and the gateway, while WiFi provides online monitoring through the Blynk platform. Local monitoring is implemented using a Microsoft Visual Studio application that also supports data logging. Three test sessions were conducted using TX1, TX2, and gateway RX logs synchronized based on timestamps. The experiments produced 2,957 RX records from 3,047 one-second time slots, yielding combined recording continuity and system availability of 97.05%. The average inter-arrival time was 1.030 s, with a maximum interval of 5 s and 84 reception gaps longer than one second. These results indicate that the system can maintain monitoring and data recording for most of the test period, although variations in reception continuity were still observed between sessions. Absolute <i>packet-level</i> PDR and delay could not be determined because the logger did not include sequence numbers and sub-second transmission-reception timestamps. These findings provide a basis for improving the communication protocol and measurement methodology in future studies.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong penerapan sistem monitoring berbasis sensor untuk memperoleh informasi kondisi lingkungan secara kontinu dan *real-time*. Integrasi sensor, perangkat komputasi, dan jaringan komunikasi memungkinkan data dari lingkungan fisik dikumpulkan, diproses, dan disajikan kepada pengguna melalui berbagai platform digital [1]. Penerapan teknologi tersebut semakin relevan pada lingkungan yang memerlukan pemantauan kondisi secara berkelanjutan, seperti ruang server, laboratorium, fasilitas pendidikan, dan bangunan pintar. Parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, intensitas cahaya, serta getaran dapat digunakan sebagai indikator kondisi operasional suatu fasilitas dan sebagai dasar untuk mendukung tindakan pemeliharaan secara lebih cepat [13], [17]. Dalam implementasinya, banyak sistem monitoring IoT menggunakan WiFi sebagai media komunikasi utama karena tersedia secara luas dan mudah diintegrasikan dengan layanan internet dan cloud. Pendekatan tersebut memberikan keuntungan berupa akses monitoring jarak jauh dan kemudahan integrasi dengan aplikasi berbasis web maupun perangkat bergerak. Namun, ketergantungan yang tinggi terhadap konektivitas WiFi dan internet juga menjadi salah satu kelemahan sistem. Ketika koneksi jaringan mengalami gangguan, proses pengiriman data menuju server atau platform cloud dapat terhenti dan informasi kondisi lingkungan tidak dapat diakses secara optimal. Permasalahan tersebut menjadi lebih kritis pada lingkungan yang membutuhkan kontinuitas monitoring, karena kehilangan data pada periode tertentu dapat mengurangi kemampuan sistem dalam menggambarkan kondisi lingkungan secara menyeluruh.

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk membangun sistem monitoring terdistribusi dengan memanfaatkan sejumlah node sensor yang berkomunikasi secara nirkabel menuju gateway atau sink [2]. Salah satu teknologi yang banyak digunakan pada WSN adalah ZigBee yang berbasis standar IEEE 802.15.4. ZigBee dirancang untuk komunikasi data dengan kebutuhan bandwidth relatif rendah, konsumsi energi yang efisien, dan kemampuan membangun jaringan dengan beberapa perangkat [2], [8]. Berbagai penelitian telah menerapkan ZigBee dan modul XBee untuk monitoring lingkungan pada sektor pertanian, bangunan, area industri, maupun lokasi yang membutuhkan akuisisi data secara periodik [3], [5], [9]–[12]. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karakteristik komunikasi ZigBee memungkinkan jaringan sensor tetap beroperasi secara lokal tanpa harus bergantung secara langsung pada koneksi internet.

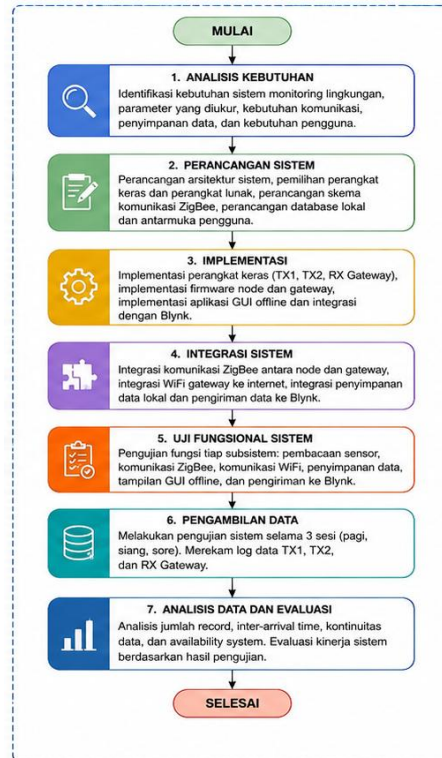
Penggunaan ZigBee secara mandiri belum sepenuhnya menyelesaikan kebutuhan monitoring jarak jauh. Sistem tetap membutuhkan mekanisme penghubung antara jaringan sensor lokal dengan jaringan berbasis IP agar data dapat diteruskan menuju aplikasi atau layanan cloud. Oleh karena itu, pendekatan hybrid yang mengombinasikan WSN lokal dengan jaringan WiFi melalui gateway menjadi salah satu alternatif yang relevan. Pada arsitektur hybrid, ZigBee dapat digunakan untuk mempertahankan komunikasi antara node sensor dan gateway, sedangkan WiFi berfungsi sebagai media akses menuju layanan monitoring daring [6], [7]. Gateway kemudian menjadi komponen penting yang tidak hanya meneruskan data, tetapi juga dapat melakukan pengolahan, parsing, dan penyimpanan data sebelum dikirim ke aplikasi [16], [19], [20].

Permasalahan yang kemudian muncul bukan hanya bagaimana data dapat dikirim dari sensor menuju aplikasi, tetapi juga bagaimana sistem dapat mempertahankan layanan monitoring ketika koneksi WiFi atau internet mengalami gangguan. Arsitektur yang terlalu bergantung pada cloud berpotensi kehilangan fungsi monitoring pada saat konektivitas eksternal terputus. Konsep *local-first monitoring* menjadi pendekatan dengan menempatkan penyimpanan dan visualisasi lokal pada gateway sebagai fungsi utama, sedangkan koneksi WiFi dan cloud digunakan sebagai jalur tambahan untuk akses jarak jauh. Pendekatan ini memungkinkan proses akuisisi dan pencatatan data tetap berlangsung meskipun konektivitas internet tidak tersedia. Dengan demikian, keandalan sistem tidak hanya dinilai berdasarkan keberhasilan komunikasi menuju cloud, tetapi juga berdasarkan kontinuitas pencatatan dan ketersediaan data pada sisi lokal. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan arsitektur monitoring lingkungan berbasis jaringan hybrid ZigBee–WiFi dengan penyimpanan data lokal. Sistem dirancang menggunakan dua node sensor berbasis Arduino Uno dan XBee Series 1 serta satu gateway berbasis Arduino UNO D1 R32 ESP32. ZigBee digunakan sebagai jaringan komunikasi lokal antara node sensor dan gateway, sedangkan WiFi digunakan untuk menyediakan akses monitoring daring melalui platform Blynk. Pada sisi lokal, aplikasi desktop berbasis Microsoft Visual Studio digunakan untuk menampilkan data secara *real-time* dan menyediakan fungsi data logging. Arsitektur ini dirancang agar fungsi monitoring lokal tetap dapat berjalan ketika koneksi WiFi tidak tersedia.

Kontribusi utama penelitian ini adalah merealisasikan prototipe monitoring hybrid multi-node yang mengintegrasikan komunikasi ZigBee, gateway ESP32, penyimpanan data lokal, GUI offline, dan monitoring online dalam satu arsitektur. Evaluasi sistem dilakukan melalui tiga sesi pengujian dengan menggunakan data log TX1, TX2, dan RX Gateway. Parameter yang dianalisis meliputi jumlah rekaman data, inter-arrival time, kontinuitas pencatatan, dan availability sistem. Hasil evaluasi diharapkan dapat memberikan gambaran empiris mengenai kemampuan sistem dalam mempertahankan layanan monitoring lokal serta mengidentifikasi keterbatasan teknis sebagai dasar pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

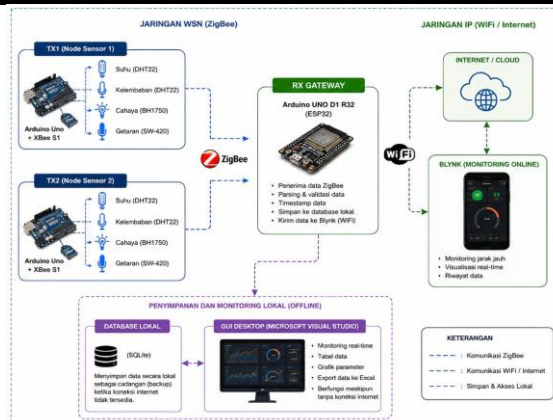
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan *Research and Development* (R&D) karena mencakup pengembangan prototipe, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta evaluasi berdasarkan data hasil pengujian. Pendekatan ini memungkinkan karakteristik komunikasi dan kontinuitas layanan diamati secara langsung pada prototipe yang telah direalisasikan [8]–[15]. Tahapan penelitian meliputi analisis kebutuhan, perancangan arsitektur, realisasi perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem, uji fungsional, pengambilan data log, dan analisis kinerja. Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

2.1 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem pada Gambar 2 terdiri atas dua node sensor, yaitu Transmitter 1 (TX1) dan Transmitter 2 (TX2), serta satu Receiver Gateway (RX). TX1 dan TX2 berfungsi mengakuisisi parameter lingkungan dan mengirimkan data menuju gateway menggunakan ZigBee. Gateway berfungsi sebagai koordinator jaringan ZigBee, pengolah data, penyimpan data lokal, serta penghubung ke jaringan WiFi. Pemisahan fungsi antara jaringan sensor lokal dan jaringan IP membentuk arsitektur hybrid yang memungkinkan monitoring lokal tetap berlangsung ketika konektivitas eksternal mengalami gangguan [6], [7], [16]. TX1 menggunakan Arduino Uno, XBee Series 1, XBee Shield Pro, modul daya multi-output 6–24 V ke 3,3 V/1 A dan 5 V/3 A, UPS Module 18650, sensor DHT11, LDR, ADXL345, dan sensor tegangan. TX2 menggunakan Arduino Uno, XBee Series 1, XBee Shield Pro, modul daya multi-output, UPS Module 18650, sensor DHT11, LDR, dan ADXL345. Penggunaan dua node memungkinkan pengujian komunikasi multi-node sehingga kemampuan gateway dalam menerima data dari beberapa sumber dapat diamati secara bersamaan [2], [7]. Receiver Gateway menggunakan Arduino UNO D1 R32 berbasis ESP32, XBee Series 1, XBee Shield Pro, modul daya multi-output, UPS Module 18650, dan antenna WiFi 2,4 GHz. ESP32 berfungsi sebagai penghubung antara jaringan ZigBee dan WiFi sekaligus sebagai pusat pemrosesan data. Pada sisi gateway dilakukan proses parsing, penyusunan data monitoring, penyimpanan lokal, dan penerusan data ke aplikasi monitoring. Penggunaan gateway sebagai titik integrasi antara jaringan sensor dan aplikasi merupakan pola yang umum digunakan dalam arsitektur IoT [16], [19], [20].



Gambar 2. Arsitektur/Topologi Sistem Monitoring Hybrid ZigBee–WiFi

Konfigurasi XBee dilakukan menggunakan Digi XCTU. Ketiga modul ditempatkan pada PAN ID 1803. Node TX1 dan TX2 menggunakan Destination Address Low (DL) 10, sedangkan gateway menggunakan alamat 10 sebagai identitas penerima. Parameter tersebut digunakan untuk memastikan seluruh perangkat berada pada domain jaringan yang sama dan membentuk hubungan komunikasi yang terarah [3], [5], [8]. Perangkat lunak pada TX1 dan TX2 dikembangkan menggunakan Arduino IDE. Program melakukan pembacaan sensor secara periodik, mengemas nilai hasil pengukuran ke dalam format paket data, dan mengirimkannya melalui antarmuka serial menuju XBee. Gateway menerima paket dari kedua node, melakukan parsing sesuai format protokol, kemudian menyediakan data untuk aplikasi Microsoft Visual Studio dan platform Blynk. Penggunaan dua media menghasilkan dua mode operasi, yaitu offline untuk monitoring lokal dan online untuk monitoring melalui internet.

2.2 Analisis Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dalam tiga sesi pengambilan data. Pada setiap sesi, data logger TX1, TX2, dan RX diaktifkan untuk merekam data beserta tanggal dan waktu. Ketiga sumber data kemudian diselaraskan berdasarkan rentang timestamp yang sama agar perbandingan dilakukan pada interval pengamatan yang identik. Pendekatan ini digunakan untuk mengurangi bias yang disebabkan oleh perbedaan waktu mulai dan berhenti antarperangkat. Analisis kinerja menggunakan empat indikator utama. Pertama, delivery berbasis rekaman digunakan untuk melihat perbedaan jumlah data yang tercatat pada transmitter dan gateway. Kedua, inter-arrival time dihitung sebagai selang waktu antarrekaman pada RX untuk menggambarkan kestabilan penerimaan data. Ketiga, kontinuitas pencatatan dihitung berdasarkan rasio slot waktu satu detik yang memiliki rekaman terhadap jumlah slot yang seharusnya tersedia. Keempat, availability sistem dihitung berdasarkan persentase slot waktu pengujian yang menghasilkan data monitoring [8], [18].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

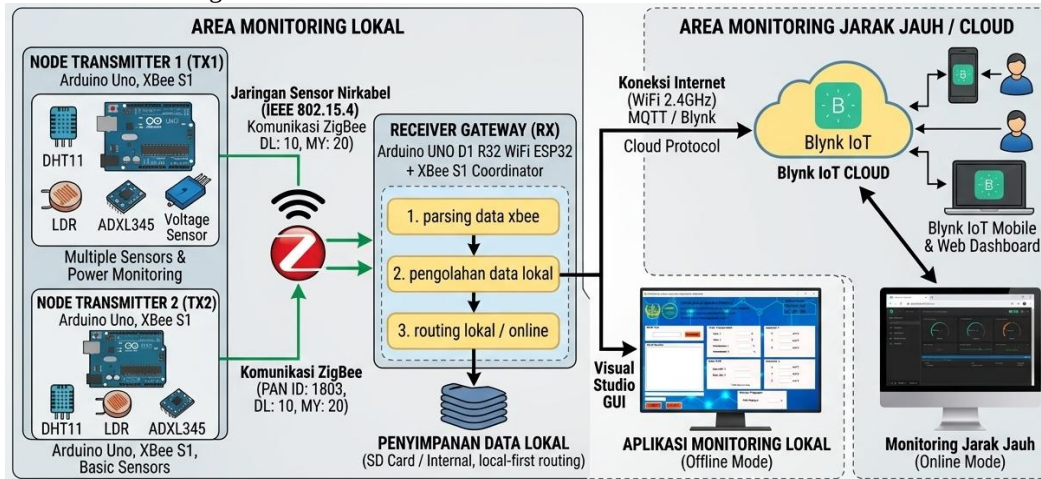
Hasil penelitian meliputi realisasi perangkat keras dan perangkat lunak, keberhasilan integrasi dua node sensor dengan gateway, pengujian fungsional, serta analisis tiga sesi pengujian berdasarkan data log TX1, TX2, dan RX Gateway. Pembahasan difokuskan pada hubungan antara arsitektur sistem yang dikembangkan dan karakteristik data hasil pengujian, sehingga kinerja sistem tidak hanya dinilai berdasarkan keberhasilan fungsi, tetapi juga berdasarkan kontinuitas penerimaan dan pencatatan data.

3.1 Realisasi dan Integrasi Sistem

Realisasi sistem menghasilkan dua node sensor, yaitu TX1 dan TX2, serta satu RX Gateway berbasis Arduino UNO D1 R32 ESP32. TX1 mengakuisisi suhu, kelembaban, intensitas cahaya, percepatan tiga sumbu, dan tegangan, sedangkan TX2 mengakuisisi suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan percepatan. Kedua transmitter mengirimkan data melalui XBee Series 1 menggunakan jaringan ZigBee, sedangkan gateway mengolah data dan menyediakan jalur monitoring lokal maupun daring. Struktur ini memungkinkan proses akuisisi dan pencatatan data tetap berlangsung pada sisi lokal ketika koneksi eksternal tidak tersedia.

Pada sisi perangkat lunak, gateway menerima data ZigBee, melakukan parsing, dan meneruskan informasi ke aplikasi Microsoft Visual Studio serta platform Blynk. Aplikasi desktop digunakan sebagai media monitoring lokal sekaligus data logging. Hasil uji fungsional menunjukkan bahwa pembacaan sensor, komunikasi kedua transmitter, proses parsing pada gateway, visualisasi pada GUI, pengiriman data ke Blynk, dan penyimpanan lokal dapat berjalan

sesuai dengan fungsi yang dirancang. Keberhasilan integrasi tersebut menjadi dasar sebelum dilakukan evaluasi keandalan berdasarkan data log.



Gambar 3. Arsitektur implementasi sistem monitoring hybrid ZigBee-WiFi

3.2 Rekapitulasi Data Pengujian

Pengujian dilakukan dalam tiga sesi pengambilan data. Untuk memperoleh perbandingan yang konsisten, data log TX1, TX2, dan RX diselaraskan berdasarkan rentang waktu bersama. Entri kosong pada data logger tidak dihitung sebagai data valid. Ringkasan hasil sinkronisasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Data Pengujian

Sesi	Durasi	Slot 1 detik	Record TX1	Record TX2	Record RX	Kontinuitas
1	1.000 s	1.001	976	982	979	97,80%
2	1.028 s	1.029	1.014	1.019	993	96,50%
3	1.016 s	1.017	1.009	1.012	985	96,85%
Gabungan	3.044 s	3.047	2.999	3.013	2.957	97,05%

3.3 Delivery Berbasis Record

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini berupa delivery berbasis rekaman, yaitu membandingkan jumlah rekaman yang tersedia pada gateway dengan pola data pada transmitter dalam rentang waktu yang sama. Karena data log tidak menyimpan sequence number untuk setiap paket, PDR pada tingkat paket tidak dapat dihitung secara absolut. Hasil tersebut digunakan sebagai indikator empiris dan tidak dimaksudkan sebagai pengganti pengukuran PDR berbasis sequence number.

Tabel 2. Perbandingan Record TX dan RX

Sesi	Record TX1	Record TX2	Record RX	Durasi Pengamatan	Sesi
1	976	982	979	1.000 detik	1
2	1.014	1.019	993	1.028 detik	2
3	1.009	1.012	985	1.016 detik	3
Total	2.999	3.013	2.957	3.044 detik	Total

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa selisih jumlah rekaman tidak selalu dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai kegagalan komunikasi ZigBee karena satu rekaman pada RX dapat memuat data dari dua node, sedangkan proses pencatatan juga dapat memengaruhi jumlah rekaman yang tersimpan. Oleh karena itu, hasil delivery digunakan secara hati-hati untuk menunjukkan adanya variasi penerimaan antar-sesi. Untuk memperoleh pengukuran PDR yang lebih akurat, setiap paket perlu dilengkapi dengan identitas unik sehingga paket yang hilang dapat ditelusuri secara individual.

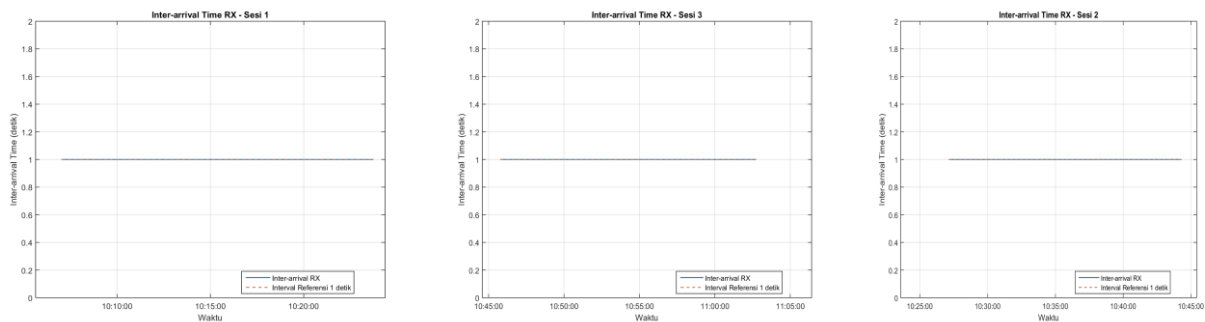
3.4 Analisis Inter-arrival Time

Inter-arrival time digunakan untuk menggambarkan kestabilan interval penerimaan data pada RX Gateway. Interval pengiriman nominal dari setiap node adalah sekitar satu detik. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa sebagian besar interval penerimaan berada pada satu detik, tetapi terdapat sejumlah interval yang lebih panjang.

Tabel 3. *Inter-arrival Time* Data RX

Sesi	Rata-rata	Minimum	Maksimum	Jeda > 1 detik
1	1,022 s	1 s	3 s	20
2	1,036 s	1 s	3 s	35
3	1,033 s	1 s	5 s	29
Gabungan	1,030 s	1 s	5 s	84

Nilai rata-rata *inter-arrival time* sebesar 1,030 detik pada gabungan seluruh sesi menunjukkan bahwa interval penerimaan secara umum mendekati periode pengiriman satu detik. Namun, terdapat 84 kejadian dengan interval lebih dari satu detik dan interval terpanjang sebesar lima detik pada Sesi 3. Pola tersebut menunjukkan bahwa meskipun sistem tetap beroperasi, terdapat beberapa periode ketika data tidak diterima atau tidak tercatat pada interval yang diharapkan.

Gambar 4. *Inter-arrival Time* RX terhadap Waktu Sesi 1–3

Pada grafik *inter-arrival time*, titik yang berada di sekitar satu detik merepresentasikan pola penerimaan normal sesuai dengan periode pengiriman. Titik yang meningkat hingga dua, tiga, atau lima detik menunjukkan adanya jeda penerimaan. Penyebaran titik tersebut pada seluruh sesi menunjukkan bahwa ketidakstabilan tidak bersifat permanen, tetapi muncul secara sporadis. Kondisi ini dapat berkaitan dengan buffering, pemrosesan serial, beban gateway, atau kondisi kanal komunikasi. Namun, data log yang tersedia belum cukup untuk menentukan penyebab secara spesifik.

3.5 Analisis Kontinuitas Pencatatan Data

Kontinuitas pencatatan berada pada rentang 96,50%–97,80% dengan nilai gabungan sebesar 97,05%. Sesi 1 menghasilkan kontinuitas tertinggi, sedangkan Sesi 2 menghasilkan nilai terendah. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gateway mampu mempertahankan proses pencatatan pada sebagian besar slot waktu pengujian. Sekitar 2,95% slot waktu tidak menghasilkan rekaman RX dalam rentang pengamatan yang digunakan sebagai acuan.

Tabel 4. Kontinuitas Pencatatan Data

Sesi	Durasi	Slot 1 detik	Record RX	Kontinuitas
1	1.000 s	1.001	979	97,80%
2	1.028 s	1.029	993	96,50%
3	1.016 s	1.017	985	96,85%
Gabungan	3.044 s	3.047	2.957	97,05%

Perbedaan kontinuitas antar-sesi menunjukkan bahwa kinerja sistem belum sepenuhnya konstan. Namun, tidak terdapat penurunan hingga tingkat yang menunjukkan terhentinya layanan secara total. Dari perspektif sistem monitoring, kondisi tersebut menunjukkan tingkat keberlanjutan pencatatan yang relatif tinggi sekaligus menunjukkan masih adanya ruang untuk optimasi guna mengurangi kehilangan interval pencatatan.

3.6 Analisis Availability sistem

Availability pada penelitian ini ditentukan berdasarkan keberadaan rekaman monitoring pada gateway selama slot waktu pengujian. Nilainya berada pada rentang 96,50%–97,80% dengan nilai gabungan sebesar 97,05%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa layanan monitoring tersedia pada sebagian besar waktu pengujian. Karena sistem

menggunakan jalur lokal pada gateway, nilai availability ini terutama merepresentasikan keberlangsungan layanan monitoring pada sisi lokal, bukan ketersediaan layanan internet atau cloud.

Tabel 5. Availability sistem

Sesi	Total Slot	Slot dengan Data	Availability
1	1.001	979	97,80%
2	1.029	993	96,50%
3	1.017	985	96,85%
Gabungan	3.047	2.957	97,05%

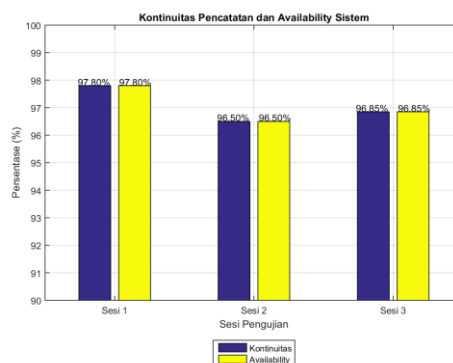
Hasil tersebut mendukung tujuan utama arsitektur hybrid, yaitu mempertahankan fungsi monitoring lokal ketika konektivitas eksternal mengalami gangguan. Dengan demikian, koneksi WiFi dan platform Blynk dapat diposisikan sebagai fasilitas akses tambahan, sedangkan proses akuisisi dan pencatatan lokal tetap menjadi fungsi utama gateway.

3.7 Temuan Utama dan Implikasi

Tiga temuan utama diperoleh dari hasil pengujian sebagai berikut;

- Sistem berhasil menjalankan komunikasi multi-node dan menghasilkan 2.957 rekaman pada gateway selama tiga sesi.
- Rata-rata inter-arrival time sebesar 1,030 detik menunjukkan pola penerimaan yang mendekati interval pengiriman satu detik, meskipun terdapat 84 interval dengan jeda lebih dari satu detik.
- Kontinuitas pencatatan dan availability gabungan mencapai 97,05%, sehingga sistem mampu mempertahankan layanan monitoring pada sebagian besar periode pengujian.

Di sisi lain, terdapat perbedaan jumlah rekaman antara transmitter dan gateway yang menunjukkan adanya keterbatasan dalam proses penerimaan atau pencatatan. Keterbatasan tersebut tidak mengurangi keberhasilan sistem secara keseluruhan, tetapi menunjukkan bahwa evaluasi berbasis rekaman masih memiliki ketidakpastian. Untuk meningkatkan ketelitian pengujian pada penelitian selanjutnya, protokol pengiriman perlu dilengkapi dengan sequence number, timestamp pengiriman dan penerimaan beresolusi lebih tinggi, serta penanda identitas TX1 dan TX2 pada gateway.



Gambar 5. Kontinuitas dan Availability Sistem per Sesi

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, integrasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa arsitektur monitoring lingkungan berbasis jaringan hybrid ZigBee-WiFi dapat direalisasikan untuk mendukung akuisisi data multi-node dan penyediaan layanan monitoring secara lokal maupun daring. Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan proses pencatatan data pada sebagian besar periode pengujian, meskipun masih ditemukan beberapa jeda penerimaan dan perbedaan jumlah record antara transmitter dan gateway. Temuan tersebut menjadi dasar untuk merumuskan kesimpulan penelitian sebagai berikut.

- Arsitektur sistem berhasil direalisasikan menggunakan dua node sensor TX1 dan TX2 berbasis Arduino Uno dan XBee Series 1 serta satu gateway berbasis Arduino UNO D1 R32 ESP32. Integrasi ZigBee sebagai jaringan sensor lokal dan WiFi sebagai jalur monitoring daring berhasil diwujudkan bersama aplikasi Microsoft Visual Studio dan platform Blynk.
- Gateway berhasil menjalankan fungsi utama berupa penerimaan data dari dua node, parsing data sensor, penyimpanan data lokal, serta penyediaan monitoring pada mode offline dan online. Hasil uji fungsional

menunjukkan fungsi pembacaan sensor, komunikasi ZigBee, parsing, GUI, Blynk, dan data logging dapat dijalankan sesuai rancangan.

3. Tiga sesi pengujian menghasilkan total 2.957 record pada RX Gateway dari rentang pengamatan 3.044 detik. Jumlah record pada TX1 dan TX2 masing-masing mencapai 2.999 dan 3.013, sehingga masih terdapat perbedaan jumlah record antara sumber data dan gateway yang menunjukkan adanya interval penerimaan atau pencatatan yang belum sepenuhnya konsisten.
4. Rata-rata inter-arrival time data RX pada tiga sesi adalah 1,030 detik dengan nilai maksimum 5 detik. Sebanyak 84 jeda dengan interval lebih dari satu detik ditemukan selama pengujian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penerimaan data secara umum mendekati interval pengiriman satu detik, tetapi masih terdapat jeda penerimaan pada beberapa periode.
5. Kontinuitas pencatatan data dan availability sistem masing-masing mencapai 97,05% secara gabungan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan layanan monitoring dan pencatatan pada sebagian besar periode pengujian, sehingga konsep local-first monitoring dapat direalisasikan pada tingkat operasional prototipe.
6. PDR dan delay komunikasi belum dapat diukur secara akurat pada tingkat paket karena data log belum menggunakan sequence number serta timestamp pengiriman dan penerimaan dengan resolusi sub-detik. Oleh karena itu, analisis pada penelitian ini menggunakan indikator delivery berbasis rekaman dan inter-arrival time sebagai pendekatan empiris.
7. Temuan jeda penerimaan, variasi jumlah record, dan keterbatasan instrumentasi menjadi dasar pengembangan berikutnya. Penelitian lanjutan perlu menambahkan sequence number, timestamp beresolusi lebih tinggi, dan identifikasi sumber paket TX1/TX2 pada gateway untuk meningkatkan ketelitian pengukuran PDR, packet loss, dan delay.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) Universitas Warmadewa atas dukungan pendanaan melalui Hibah Internal Universitas Warmadewa Skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) yang telah memungkinkan penelitian ini dilaksanakan dan diselesaikan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan akademik, teknis, administratif, dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Dukungan tersebut berkontribusi terhadap keberhasilan pengembangan prototipe, pelaksanaan pengujian, analisis data, dan penyusunan luaran penelitian.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI

Dalam penyusunan naskah ini, penulis menggunakan bantuan *artificial intelligence* (AI) secara terbatas untuk mendukung penyuntingan bahasa, perbaikan struktur penulisan, dan penyusunan elemen visual. Seluruh data kegiatan, hasil evaluasi, analisis, interpretasi, dan keputusan akhir terkait isi naskah telah diperiksa dan diverifikasi oleh penulis. Tanggung jawab penuh atas isi dan keakuratan naskah tetap berada pada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [2] P. Baronti, P. Pillai, V. W. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Computer Communications*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [3] F. Rofii, F. Hunaini, and S. Sholawati, "Kinerja jaringan komunikasi nirkabel berbasis XBee pada topologi bus, star, dan mesh," *Elkomika*, 2018.
- [4] I. R. B. Tola, S. Y. Doo, and D. E. D. G. Pollo, "Pemodelan dan simulasi QoS jaringan sensor nirkabel menggunakan ZigBee," *JTEIN*, 2023.
- [5] A. Akhriana, I. Irsal, M. I. Hidayat, and I. Inkasari, "Analisis pengiriman data pada WSN menggunakan modul XBee dan Wemos," *PROtek*, 2020.
- [6] H. Lv, L. Liu, J. Li, Y. Xu, and Y. Sheng, "Design of Hybrid Topology Wireless Sensor Network Nodes Based on ZigBee Protocol," *Electronics*, vol. 14, no. 1, p. 115, 2025, doi: 10.3390/electronics14010115.
- [7] M. A. Shakeri, A. Sadeghi-Niaraki, S.-M. Choi, and S. M. Riazul Islam, "Performance Analysis of IoT-Based Health and Environment WSN Deployment," *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5923, 2020, doi: 10.3390/s20205923.

- [8] K. F. Haque, A. Abdelgawad, and K. Yelamarthi, "Comprehensive Performance Analysis of Zigbee Communication: An Experimental Approach with XBee S2C Module," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3245, 2022, doi: 10.3390/s22093245.
- [9] Z. Zeng, F. Zeng, X. Han, H. Elkhouchlaa, Q. Yu, and E. Lü, "Real-time Monitoring of Environmental Parameters in a Commercial Gestating Sow House Using a ZigBee-Based Wireless Sensor Network," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 972, 2021, doi: 10.3390/app11030972.
- [10] E. P. Kho, S. N. D. Chua, S. F. Lim, L. C. Lau, and M. T. N. Gani, "Development of young sago palm environmental monitoring system with wireless sensor networks," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 193, p. 106723, 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.106723.
- [11] W.-H. Lee, H. Kim, C.-H. Lee, and S.-M. Kim, "Development of Digital Device Using ZigBee for Environmental Monitoring in Underground Mines," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 23, p. 11927, 2022, doi: 10.3390/app122311927.
- [12] R. Ouni and K. Saleem, "Framework for Sustainable *Wireless Sensor Network* Based Environmental Monitoring," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8356, 2022, doi: 10.3390/su14148356.
- [13] A. Lanzolla and M. Spadavecchia, "Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1172, 2021, doi: 10.3390/s21041172.
- [14] F. Wu, C. Rüdiger, and M. R. Yuce, "Real-time Performance of a Self-Powered Environmental IoT Sensor Network System," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 282, 2017, doi: 10.3390/s17020282.
- [15] A. Velasco, R. Ferrero, F. Gandino, B. Montrucchio, and M. Rebaudengo, "A Mobile and Low-Cost System for Environmental Monitoring: A Case Study," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 710, 2016, doi: 10.3390/s16050710.
- [16] P. Arroyo, J. L. Herrero, J. I. Suárez, and J. Lozano, "Wireless Sensor Network Combined with Cloud Computing for Air Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 691, 2019, doi: 10.3390/s19030691.
- [17] H. Hayat, T. Griffiths, D. Brennan, R. P. Lewis, M. Barclay, C. Weirman, B. Philip, and J. R. Searle, "The State-of-the-Art of Sensors and Environmental Monitoring Technologies in Buildings," *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3648, 2019, doi: 10.3390/s19173648.
- [18] L. Ortega-Gonzalez, M. Acosta-Coll, G. Piñeres-Espitia, and S. A. Butt, "Communication protocols evaluation for a wireless rainfall monitoring network in an urban area," *Heliyon*, vol. 7, no. 6, p. e07353, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07353.
- [19] N. X. Arreaga-Alvarado, R. Estrada, S. Blanc Clavero, and L. V. Rivas, "Smart Agriculture System based on IoT Reference Architecture and Service Choreography," *Procedia Computer Science*, vol. 241, pp. 104–113, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.08.016.
- [20] M. Yan, "Receive wireless sensor data through IoT gateway using web client based on border gateway protocol," *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e31625, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31625.