

Perancangan dan Evaluasi Kinerja Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis ZigBee untuk Monitoring Data Center

I Made Sastra Dwikiarta^{1*} Kadek Agus Mahabojana Dwi Prayoga², I Nengah Ludra Antara³

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

³Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali

Email: ¹sastradwikiarta@warmadewa.ac.id, ²mahabojana@warmadewa.ac.id, ³ludraantara62@gmail.com

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

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel (WSN); ZigBee; IEEE 802.15.4; Monitoring Data Center; Kualitas Layanan (QoS)	Penelitian ini membahas perancangan dan evaluasi kinerja jaringan sensor nirkabel (<i>Wireless Sensor Network/WSN</i>) berbasis ZigBee IEEE 802.15.4 untuk monitoring lingkungan data center. Sistem terdiri atas node sensor yang melakukan akuisisi parameter lingkungan dan node koordinator sebagai penerima data. Evaluasi kinerja dilakukan melalui pengujian <i>Received Signal Strength Indicator</i> (RSSI), <i>delay</i>, <i>packet loss</i>, dan perubahan tegangan baterai terhadap variasi jarak komunikasi. Pengujian dilakukan pada lingkungan <i>outdoor</i> sebagai karakterisasi awal kinerja komunikasi sistem. Uji jangkauan menggunakan perangkat lunak X-CTU menunjukkan bahwa komunikasi ZigBee masih dapat terdeteksi hingga jarak 19 m, sedangkan evaluasi QoS dilakukan pada jarak 1–12 m dan komunikasi terputus pada pengujian 13 m. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan jarak komunikasi diikuti oleh penurunan kualitas transmisi, yang ditunjukkan oleh peningkatan <i>delay</i> hingga 6,6 detik dan <i>packet loss</i> sebanyak 55 dari 126 paket yang dikirim pada jarak 12 m. Pengamatan kondisi sumber daya selama interval pengujian 10 menit menunjukkan penurunan tegangan baterai sebesar 0,32–0,68 V pada variasi jarak yang diuji. Perubahan tegangan baterai tidak menunjukkan kecenderungan linier terhadap pertambahan jarak komunikasi sehingga digunakan sebagai indikator perubahan kondisi sumber daya selama pengujian dan tidak merepresentasikan konsumsi daya secara langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak komunikasi berpengaruh terhadap kinerja jaringan ZigBee, terutama pada <i>delay</i> dan <i>packet loss</i>. Sistem yang dikembangkan menunjukkan potensi penggunaan ZigBee sebagai media komunikasi WSN untuk monitoring lingkungan data center, dengan penempatan node dan jarak komunikasi sebagai faktor penting dalam implementasinya.
Keywords: Wireless Sensor Network (WSN); ZigBee; IEEE 802.15.4; Data Center Monitoring; Quality of Service (QoS)	This study presents the design and performance evaluation of a ZigBee IEEE 802.15.4-based Wireless Sensor Network (WSN) for data center environmental monitoring. The system consists of sensor nodes for environmental parameter acquisition and a coordinator node for data reception. Network performance was evaluated based on Received Signal Strength Indicator (RSSI), delay, packet loss, and battery voltage changes under varying communication distances. The experiments were conducted in an outdoor environment as an initial characterization of the system's communication performance. A communication range test using X-CTU software indicated that the ZigBee link could still be detected at a distance of 19 m, while the QoS evaluation was conducted at distances of 1–12 m, with communication loss observed at 13 m. The results showed that increasing communication distance degraded transmission performance, as indicated by a delay of up to 6.6 s and the loss of 55 out of 126 transmitted packets at a distance of 12 m. Battery condition monitoring during the 10-minute test interval showed a voltage decrease ranging from 0.32 to 0.68 V across the tested communication distances. The battery voltage changes did not exhibit a linear trend with increasing communication distance; therefore, they were used as an indicator of changes in the power-source condition during testing and did not represent direct power consumption measurements. The results demonstrate that communication distance affects ZigBee network performance, particularly delay and packet loss. The developed system demonstrates the potential of ZigBee as a WSN communication technology for data center environmental monitoring, with node placement and communication distance being important considerations for practical implementation.

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



1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong penerapan sistem monitoring berbasis sensor pada berbagai infrastruktur kritis, termasuk data center. Data center membutuhkan kondisi lingkungan yang terkontrol untuk menjaga kontinuitas layanan dan keandalan perangkat komputasi. Perubahan suhu dan kelembaban, kondisi pencahayaan, getaran, serta gangguan pada sumber daya listrik dapat menjadi indikator kondisi lingkungan maupun operasional yang perlu dipantau secara periodik [1], [11]. Oleh karena itu, sistem monitoring data center tidak hanya membutuhkan kemampuan akuisisi data dari sejumlah sensor, tetapi juga komunikasi yang andal, konsumsi daya yang rendah, serta fleksibilitas dalam penempatan perangkat sensor.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *Wireless Sensor Network* (WSN), yaitu jaringan yang terdiri atas sejumlah node sensor dengan kemampuan akuisisi, pemrosesan, dan komunikasi data menuju node koordinator atau *gateway*. Dibandingkan sistem monitoring berbasis kabel, WSN memberikan fleksibilitas dalam instalasi dan pengembangan jumlah node serta memungkinkan integrasi dengan sistem IoT [2], [3]. Namun, implementasi WSN memiliki beberapa tantangan, terutama keterbatasan sumber daya pada node sensor [4], [5], kualitas propagasi sinyal, interferensi komunikasi nirkabel, serta perubahan *Quality of Service* (QoS) akibat jarak dan kondisi lingkungan [6]–[8]. Faktor tersebut menjadi penting pada aplikasi monitoring karena penurunan kualitas komunikasi dapat menyebabkan keterlambatan maupun kehilangan data sensor.

ZigBee yang mengacu pada IEEE 802.15.4 merupakan salah satu teknologi komunikasi yang dikembangkan untuk aplikasi dengan laju data relatif rendah dan kebutuhan daya terbatas. Karakteristik tersebut menjadikan ZigBee relevan untuk implementasi WSN dengan kebutuhan komunikasi berdaya rendah [4], [5], [10]. Meskipun demikian, kinerja komunikasi ZigBee dipengaruhi oleh jarak, kondisi propagasi, konfigurasi jaringan, serta lingkungan pengoperasian. Haque et al. [6] melalui pengujian eksperimental XBee menunjukkan bahwa perubahan kondisi komunikasi berpengaruh terhadap karakteristik kinerja ZigBee. Azevedo dan Santos [8] juga menunjukkan bahwa kondisi propagasi *non-line-of-sight* (NLOS) memengaruhi performa jaringan ZigBee. Sementara itu, evaluasi ZigBee pada lingkungan bangunan menunjukkan bahwa karakteristik propagasi dan kondisi implementasi menjadi faktor penting terhadap performa jaringan [7]. Dengan demikian, karakterisasi kinerja jaringan tetap diperlukan sebelum ZigBee diterapkan pada suatu skenario monitoring tertentu.

Kinerja WSN dapat dievaluasi melalui beberapa parameter komunikasi, antara lain *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), delay, dan *packet loss*. RSSI memberikan informasi mengenai kekuatan sinyal yang diterima, sedangkan delay menunjukkan waktu yang dibutuhkan dalam proses pengiriman data dan *packet loss* merepresentasikan tingkat kehilangan paket selama proses transmisi. Penelitian Fitriani et al. [13] menunjukkan bahwa RSSI pada komunikasi ZigBee dapat digunakan untuk mengevaluasi karakteristik penerimaan sinyal pada kondisi lingkungan tertentu. Selain itu, posisi dan penempatan node juga dapat memengaruhi parameter QoS jaringan sensor berbasis ZigBee [14]. Penelitian yang lebih baru menunjukkan bahwa delay tetap menjadi parameter penting dalam optimasi komunikasi jaringan sensor ZigBee [15]. Dengan demikian, evaluasi RSSI, delay, dan *packet loss* diperlukan untuk mengidentifikasi perubahan kualitas komunikasi akibat variasi kondisi dan jarak antar-node. Selain QoS, kondisi sumber daya node juga menjadi aspek penting dalam implementasi WSN karena node sensor umumnya memiliki sumber daya yang terbatas [4], [5]. Dalam penelitian ini, kondisi sumber daya diamati melalui perubahan tegangan baterai selama interval pengujian sebagai indikator kondisi sumber daya node, tanpa merepresentasikannya sebagai pengukuran konsumsi daya secara langsung.

Penelitian sebelumnya telah membahas WSN dari berbagai perspektif. Implementasi WSN untuk monitoring lingkungan telah dilakukan dengan fokus pada akuisisi dan pengiriman data sensor [2], [3], [12], sedangkan penelitian lain mengevaluasi kinerja ZigBee/XBee berdasarkan karakteristik komunikasi, propagasi, RSSI, maupun parameter QoS [6]–[9], [13]–[15]. Penelitian mengenai IEEE 802.15.4 juga menunjukkan bahwa efisiensi energi, konfigurasi komunikasi, dan mekanisme protokol merupakan aspek penting dalam karakteristik operasional jaringan [4], [5], [10]. Meskipun demikian, berdasarkan studi yang digunakan dalam penelitian ini, evaluasi eksperimental prototipe WSN berbasis ZigBee yang secara bersamaan menganalisis RSSI, delay, dan *packet loss* serta mengamati perubahan tegangan baterai pada variasi jarak komunikasi dalam konteks monitoring lingkungan data center masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan karakterisasi eksperimental yang mengintegrasikan aspek kualitas komunikasi dan kondisi sumber daya node dalam satu skenario pengujian.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kinerja WSN berbasis ZigBee IEEE 802.15.4 untuk monitoring lingkungan data center. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis RSSI, delay, *packet loss*, dan perubahan tegangan baterai pada variasi jarak komunikasi antar-node. Pengujian komunikasi dilakukan pada lingkungan *outdoor* sebagai karakterisasi awal terhadap kinerja prototipe sebelum implementasi pada lingkungan operasional data center. Kontribusi penelitian ini terletak pada evaluasi eksperimental

prototipe WSN yang mengintegrasikan pengukuran QoS dan pengamatan perubahan tegangan baterai untuk mengidentifikasi karakteristik jaringan terhadap variasi jarak komunikasi sebagai dasar pertimbangan penempatan node pada sistem monitoring data center.

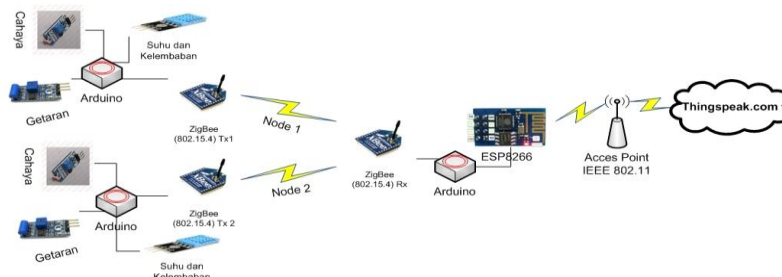
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Arsitektur Sistem

Sistem yang dikembangkan berupa *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ZigBee IEEE 802.15.4 untuk monitoring parameter lingkungan data center. Arsitektur sistem terdiri atas node sensor sebagai perangkat akuisisi dan pengirim data serta node koordinator sebagai penerima dan pengumpul data. Data yang diterima selanjutnya ditampilkan melalui *Graphical User Interface* (GUI) dan diteruskan ke sistem monitoring berbasis web.

Node sensor melakukan akuisisi parameter suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan getaran. Data hasil pengukuran diproses oleh mikrokontroler dan ditransmisikan melalui modul ZigBee menuju node koordinator. Komunikasi ZigBee pada tahap pengujian dikonfigurasi secara *point-to-point* agar pengaruh jarak terhadap karakteristik komunikasi dapat diamati secara langsung tanpa pengaruh mekanisme *routing* multi-hop.

Sistem menggunakan dua teknologi komunikasi, yaitu IEEE 802.15.4 pada komunikasi antara node sensor dan koordinator serta IEEE 802.11 pada sisi *gateway* untuk meneruskan data menuju jaringan internet. Arsitektur tersebut memungkinkan proses akuisisi dan komunikasi sensor dipisahkan dari proses pengiriman data menuju sistem monitoring berbasis web.



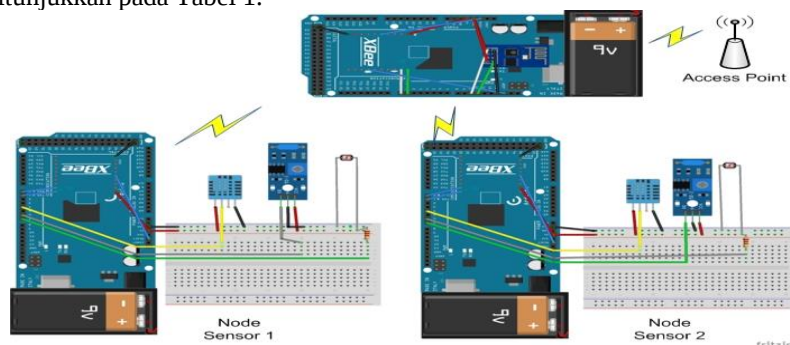
Gambar. 1 Arsitektur Wireless Sensor Network Berbasis ZigBee

2.2 Perangkat Keras dan Konfigurasi Jaringan

Setiap node sensor menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai unit pemrosesan utama yang terhubung dengan modul XBee Series 1 untuk komunikasi nirkabel berbasis IEEE 802.15.4. Sistem terdiri atas dua node yang dikonfigurasi dalam topologi *point-to-point*. Node pengirim melakukan akuisisi data sensor dan mengirimkan data melalui XBee, sedangkan node penerima menerima data untuk selanjutnya diteruskan ke sistem monitoring.

Parameter lingkungan diperoleh menggunakan sensor DHT11 untuk pengukuran suhu dan kelembaban, Light Dependent Resistor (LDR) untuk mendeteksi intensitas cahaya, dan ADXL345 untuk mendeteksi getaran. Konfigurasi komunikasi XBee dilakukan menggunakan perangkat lunak X-CTU dengan *baud rate* 9600 bps.

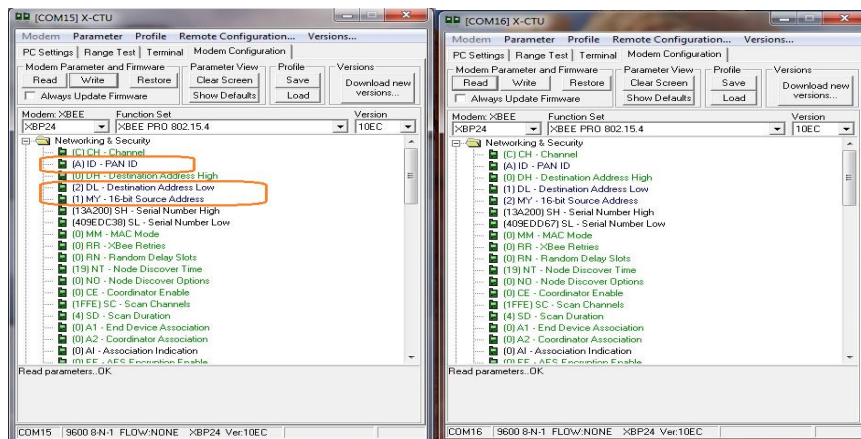
Kedua perangkat XBee menggunakan PAN ID 1803 agar berada pada jaringan yang sama. Pada sisi pengirim (Tx), parameter *Source Address* (MY) dikonfigurasi sebesar 20 dan *Destination Address Low* (DL) sebesar 10, sedangkan pada sisi penerima (Rx), MY dikonfigurasi sebesar 10 dan DL sebesar 20. Konfigurasi tersebut memungkinkan komunikasi dua arah antara kedua node selama proses pengujian. Rincian perangkat keras dan konfigurasi jaringan ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Perangkat Keras dan Konfigurasi Jaringan

Tabel 1. Pengaturan Parameter PAN ID, DL, dan MY Pada XBee Series1

Parameter	Konfigurasi
Mikrokontroler	Arduino Mega 2560
Modul komunikasi	XBee Series 1
Standar komunikasi	IEEE 802.15.4
Topologi pengujian	Point-to-point
PAN ID	1803
MY Tx / Rx	20 / 10
DL Tx / Rx	10 / 20
Baud rate	9600
Sensor suhu/kelembaban	DHT 11
Sensor cahaya	LDR
Sensor getaran	ADXL345
Jumlah node	2 Node



Gambar 3. (a) Konfigurasi ZigBee 802.15.4 (b) Konfigurasi Parameter ZigBee 802.15.4 (Tx) Konfigurasi Parameter ZigBee 802.15.4 (Rx)

- PAN ID (*Personal Area Network Identity*) adalah ID yang digunakan untuk komunikasi antara perangkat ZigBee 802.15.4 (intrapersonal komunikasi) dalam satu jaringan.
- Parameter DL (*Destination Address Low*) merupakan sebuah parameter penerima data yang didefinisikan pada ZigBee 802.15.4.
- Parameter MY (*Source Address*) merupakan sebuah parameter pengiriman data yang didefinisikan pada ZigBee 802.15.4.

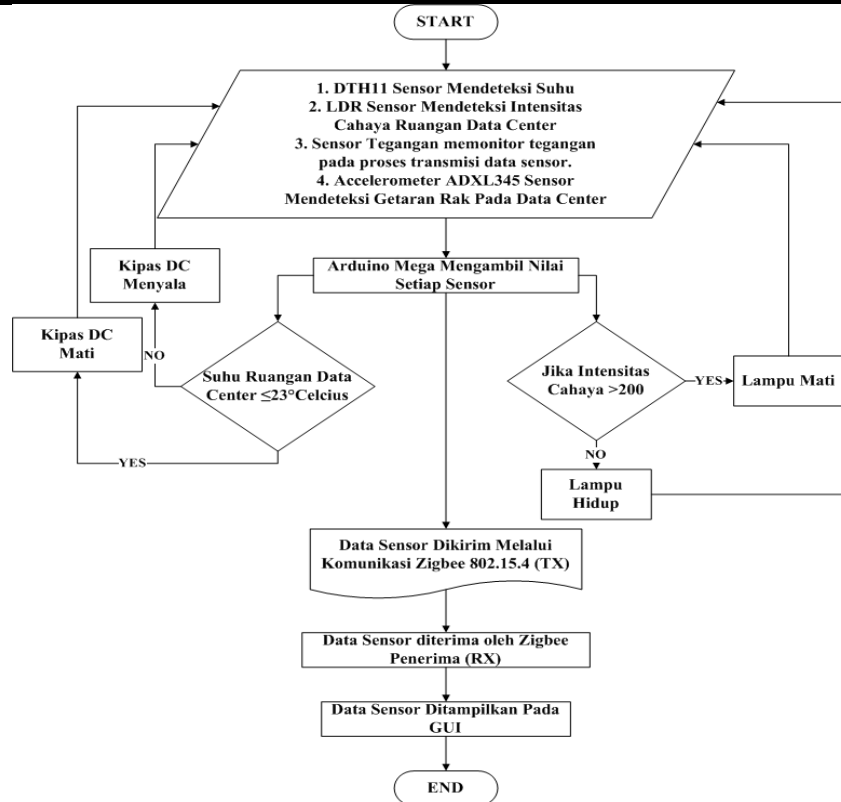
2.3 Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan pada lingkungan *outdoor* untuk melakukan karakterisasi awal terhadap kinerja komunikasi prototipe. Node pengirim dan penerima ditempatkan pada variasi jarak tertentu untuk mengevaluasi pengaruh jarak terhadap kualitas komunikasi ZigBee IEEE 802.15.4.

Pengujian dibagi menjadi dua skenario. Skenario pertama merupakan pengujian jangkauan komunikasi menggunakan perangkat lunak X-CTU untuk mengidentifikasi kemampuan terbentuknya komunikasi antara perangkat Tx dan Rx. Pada pengujian ini komunikasi masih dapat terdeteksi hingga jarak 19 m.

Skenario kedua merupakan pengujian kinerja QoS, meliputi *delay* dan *packet loss*. Pengujian dilakukan secara bertahap pada jarak 1–12 m. Pada pengujian berikutnya pada jarak 13 m, komunikasi tidak dapat dipertahankan sehingga data QoS tidak diperoleh. Dengan demikian, jarak 19 m pada penelitian ini merepresentasikan hasil pengujian jangkauan menggunakan X-CTU dan tidak digunakan sebagai batas operasional QoS jaringan.

Pengujian perubahan tegangan baterai dilakukan pada variasi jarak 1, 3, 5, 7, 9, 11, dan 13 m dengan durasi pengamatan 10 menit pada setiap kondisi pengujian. Tegangan baterai sebelum dan setelah pengujian diukur menggunakan avometer untuk memperoleh nilai penurunan tegangan (ΔV) selama proses pengujian.



Gambar 4. Skenario Pengujian

2.4 Parameter Pengukuran

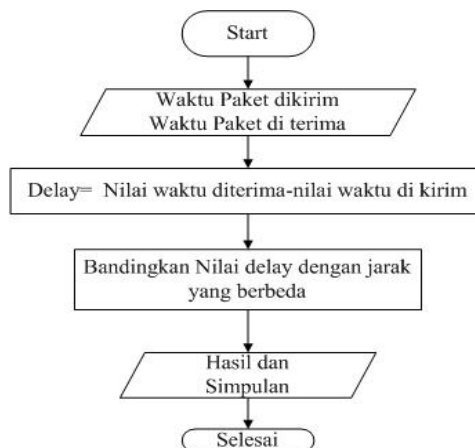
Evaluasi kinerja jaringan dilakukan dengan mengukur beberapa parameter utama, yaitu:

- Received Signal Strength Indicator* (RSSI):
- RSSI digunakan untuk merepresentasikan kekuatan sinyal yang diterima oleh perangkat penerima dan dinyatakan dalam dBm. Nilai RSSI digunakan untuk mengamati perubahan kualitas penerimaan sinyal akibat variasi jarak komunikasi. Nilai yang semakin negatif menunjukkan kekuatan sinyal yang semakin rendah.
- Delay*

Delay didefinisikan sebagai selisih waktu antara paket dikirimkan oleh node pengirim dan paket diterima pada sisi penerima.

$$Delay = T_{receive} - T_{send} \quad (1)$$

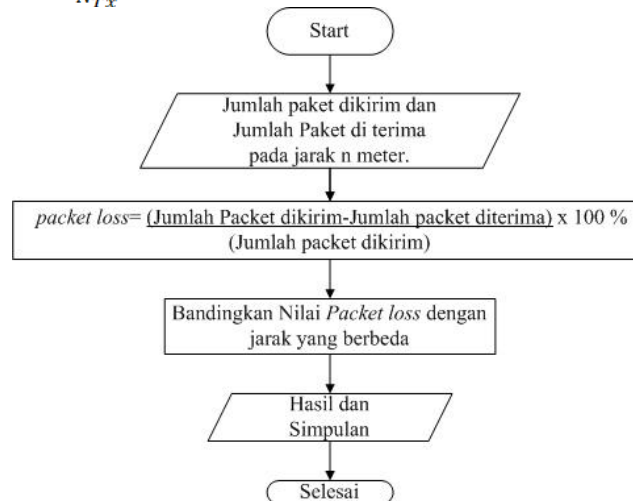
Nilai *delay* digunakan untuk mengevaluasi perubahan waktu pengiriman data terhadap peningkatan jarak komunikasi.

Gambar 5. Proses pengambilan data *Delay*

d. Packet Loss

Packet loss dihitung berdasarkan selisih antara jumlah paket data yang dikirimkan dan jumlah paket yang berhasil diterima oleh node koordinator. Parameter ini digunakan untuk menilai keandalan komunikasi ZigBee pada berbagai jarak.

$$\text{Packet Loss (\%)} = \frac{N_{Tx} - N_{Rx}}{N_{Tx}} \times 100\% \quad (2)$$

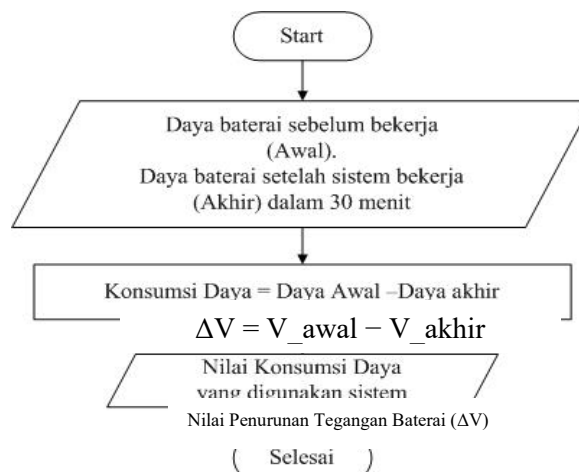
Gambar 6. Proses pengambilan data *Packet Loss*

e. Perubahan Tegangan Baterai

Perubahan tegangan baterai diamati untuk mengetahui kondisi sumber daya node selama proses komunikasi. Pengukuran dilakukan menggunakan avometer dengan mencatat tegangan baterai sebelum dan setelah pengujian pada setiap variasi jarak komunikasi. Setiap pengujian dilakukan selama interval 10 menit. Penurunan tegangan baterai dihitung menggunakan persamaan 3 :

$$\Delta V = V_{\text{awal}} - V_{\text{akhir}} \quad (3)$$

Dengan ΔV merupakan penurunan tegangan baterai (V), V_{awal} merupakan tegangan baterai sebelum pengujian (V), dan V_{akhir} merupakan tegangan baterai setelah pengujian (V). Parameter ini digunakan untuk mengamati perubahan kondisi sumber daya selama pengujian dan tidak merepresentasikan pengukuran konsumsi daya secara langsung.



Gambar 7. Proses Pengukuran Perubahan Tegangan Baterai

2.5 Metode Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif-kuantitatif untuk mengevaluasi hubungan antara variasi jarak komunikasi dengan karakteristik jaringan. Analisis QoS dilakukan terhadap parameter RSSI, *delay*, dan *packet loss*.

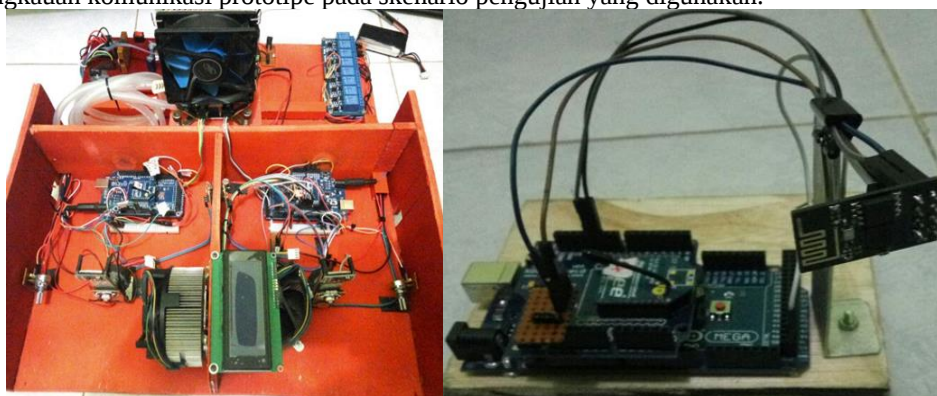
Data *packet loss* dianalisis berdasarkan perbandingan jumlah paket yang dikirim dan diterima pada setiap variasi jarak. Selain itu, perubahan tegangan baterai dianalisis berdasarkan selisih tegangan sebelum dan setelah interval pengujian 10 menit. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan parameter terhadap jarak komunikasi.

Analisis dilakukan secara deskriptif dan tidak digunakan untuk menyatakan hubungan sebab-akibat secara statistik. Hasil pengujian digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik operasional prototipe dan batasan implementasinya sebagai sistem monitoring lingkungan data center.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

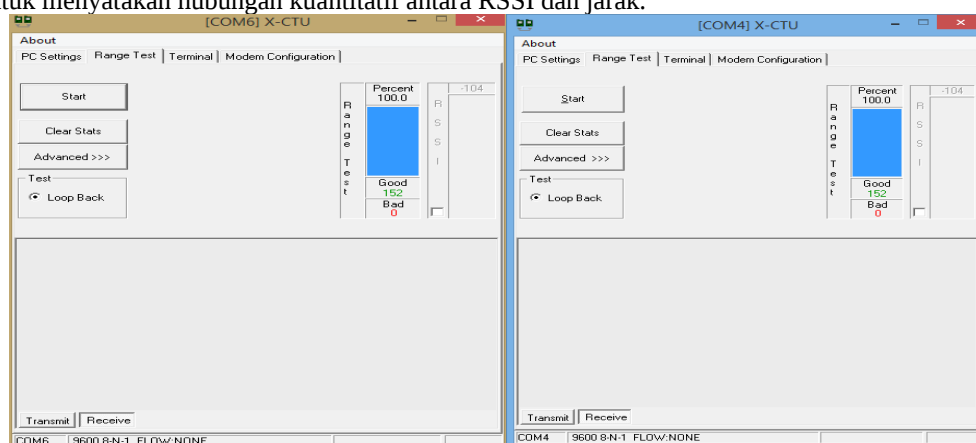
3.1 Kinerja Kekuatan Sinyal (RSSI)

Pengujian RSSI dilakukan untuk mengamati karakteristik kekuatan sinyal komunikasi ZigBee antara node pengirim dan penerima. Berdasarkan pengujian jangkauan menggunakan perangkat lunak X-CTU, komunikasi antara kedua perangkat masih dapat terdeteksi hingga jarak 19 m pada kondisi pengujian *outdoor*. Hasil tersebut menunjukkan kemampuan jangkauan komunikasi prototipe pada skenario pengujian yang digunakan.



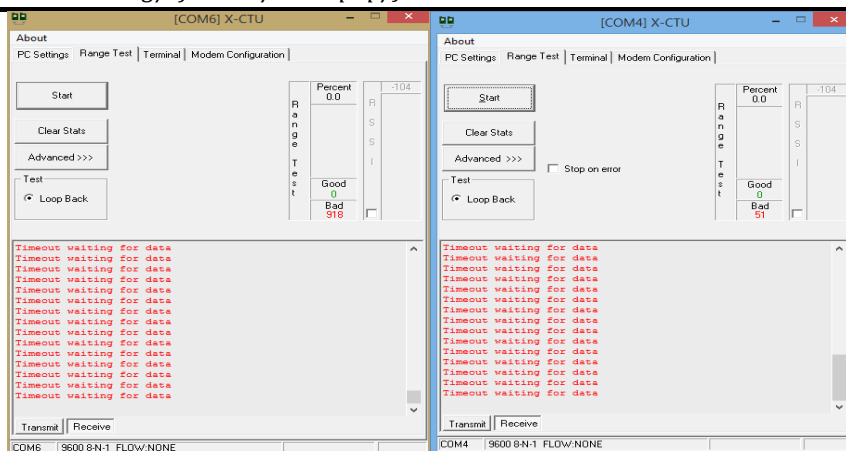
Gambar 8. (a) Hasil rancangan perangkat keras pada sisi pengirim (Tx); (b) hasil rancangan perangkat keras pada sisi penerima (Rx).

Secara umum, peningkatan jarak komunikasi menyebabkan pelemahan kekuatan sinyal yang diterima akibat karakteristik propagasi gelombang radio. Namun, karena penelitian ini tidak menyajikan data numerik RSSI pada setiap variasi jarak, hasil pengujian RSSI digunakan terutama sebagai karakterisasi jangkauan komunikasi dan tidak digunakan untuk menyatakan hubungan kuantitatif antara RSSI dan jarak.



Gambar 9. Hasil Pengujian Jarak 1 meter Komunikasi ZigBee dengan Software X-CTU (a) Tx (b) Rx

Jarak 19 m pada pengujian ini merepresentasikan kondisi ketika komunikasi masih dapat terdeteksi menggunakan X-CTU dan tidak menunjukkan bahwa komunikasi pada jarak tersebut memiliki kualitas QoS yang sama dengan pengujian pada jarak yang lebih pendek. Hal ini dibedakan dari pengujian *delay* dan *packet loss* yang dilakukan pada jarak 1–12 m.



Gambar 10. Hasil Pengujian Jarak 19 meter Komunikasi ZigBee dengan Software X-CTU

3.2 Analisis Delay Pengiriman Data

Pengukuran *delay* menunjukkan bahwa waktu tunda pengiriman data meningkat seiring dengan bertambahnya jarak komunikasi. Pada jarak dekat, *delay* berada pada nilai rendah dan relatif stabil, sedangkan pada jarak yang lebih jauh terjadi peningkatan *delay* yang lebih signifikan.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Delay* Terhadap Jarak Komunikasi ZigBee

No	Jarak	Delay Sistem	
		(Interval Pengiriman Data)	Rata – rata Delay Pengiriman
1.	1 meter	1 Detik	0 Detik
2.	2 meter	1 Detik	0 Detik
3.	3 meter	1 Detik	0 Detik
4.	4 meter	1 Detik	1 Detik
5.	5 meter	1 Detik	2 Detik
6.	6 meter	1 Detik	2 Detik
7.	7 meter	1 Detik	2 Detik
8.	8 meter	1 Detik	2 Detik
9.	9 meter	1 Detik	2 Detik
10.	10 meter	1 Detik	2,5 Detik
11.	11 meter	1 Detik	3,5 Detik
12.	12 meter	1 Detik	6,6 Detik

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan *delay* seiring bertambahnya jarak komunikasi. Pada jarak 1–3 m tidak teridentifikasi tambahan *delay* pengiriman, sedangkan pada jarak 4 m diperoleh *delay* sebesar 1 detik. Pada jarak 5–9 m, *delay* meningkat menjadi 2 detik, kemudian menjadi 2,5 detik pada 10 m dan 3,5 detik pada 11 m. Nilai *delay* tertinggi diperoleh pada jarak 12 m sebesar 6,6 detik.

Peningkatan *delay* pada jarak yang lebih jauh menunjukkan adanya penurunan kinerja komunikasi pada kondisi pengujian. Meskipun kelemahan kualitas komunikasi secara teoritis dapat memengaruhi waktu penerimaan paket, penelitian ini tidak melakukan pengukuran terhadap mekanisme *retransmission* maupun faktor protokol lainnya secara terpisah. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh digunakan untuk menunjukkan kecenderungan hubungan antara peningkatan jarak dan *delay* pada prototipe yang diuji, tanpa menyatakan hubungan sebab-akibat secara langsung.

3.3 Analisis Packet Loss

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *packet loss* cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak komunikasi. Pada jarak 1–3 m, seluruh paket yang dikirim berhasil diterima sehingga *packet loss* sebesar 0%. Kehilangan paket mulai teridentifikasi pada jarak 4 m, yaitu 3 dari 120 paket atau sebesar 2,50%.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Packet Loss* Terhadap Jarak Komunikasi ZigBee

Jarak	Data Terkirim	Data Diterima	Paket Hilang	<i>Packet Loss</i> (%)	Keterangan
1 Meter	119	119	0		Tersambung
2 Meter	115	115	0		Tersambung
3 Meter	119	119	0		Tersambung
4 Meter	120	117	3	2,50%	Tersambung
5 Meter	116	102	14	12,07%	Tersambung
6 Meter	119	102	17	14,29%	Tersambung
7 Meter	120	101	19	15,83%	Tersambung
8 Meter	119	89	30	25,21%	Tersambung
9 Meter	117	76	41	35,04%	Tersambung
10 Meter	108	62	46	42,59%	Tersambung
11 Meter	122	73	49	40,16%	Tersambung
12 Meter	126	71	55	43,65%	Tersambung
13 Meter	-	-	-	-	Terputus

Peningkatan kehilangan paket semakin terlihat pada jarak komunikasi yang lebih jauh. Pada jarak 8 m diperoleh *packet loss* sebesar 25,21%, kemudian meningkat menjadi 35,04% pada 9 m, 42,59% pada 10 m, 40,16% pada 11 m, dan 43,65% pada 12 m. Pada pengujian 13 m komunikasi tidak dapat dipertahankan sehingga proses pengiriman dan penerimaan paket tidak dapat dilakukan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jarak komunikasi pada kondisi pengujian diikuti oleh penurunan keandalan penerimaan paket. Meskipun secara umum terdapat kecenderungan peningkatan *packet loss*, perubahan nilainya tidak selalu linier terhadap jarak, sebagaimana terlihat pada jarak 10 dan 11 m. Oleh karena itu, hasil ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik empiris komunikasi ZigBee pada prototipe yang diuji.

3.4 Analisis Perubahan Tegangan Baterai Node Sensor

Pengukuran tegangan baterai dilakukan sebelum dan setelah pengujian selama interval 10 menit pada setiap variasi jarak komunikasi. Berdasarkan Tabel 4, penurunan tegangan baterai berada pada rentang 0,32–0,68 V. Penurunan tegangan terkecil sebesar 0,32 V diperoleh pada pengujian jarak 1 m, sedangkan penurunan terbesar sebesar 0,68 V diperoleh pada jarak 3 m. Nilai penurunan tegangan pada jarak 5, 7, 9, 11, dan 13 m masing-masing sebesar 0,61; 0,36; 0,35; 0,50; dan 0,64 V.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Perubahan Tegangan Baterai terhadap Jarak Komunikasi

Jarak (m)	Waktu Pengiriman (menit)	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Penurunan Tegangan (ΔV)
1	10	11,98	11,66	0,32
3	10	10,52	9,84	0,68
5	10	9,66	9,05	0,61
7	10	9,02	8,66	0,36
9	10	8,47	8,12	0,35
11	10	8,05	7,55	0,5
13	10	7,98	7,34	0,64

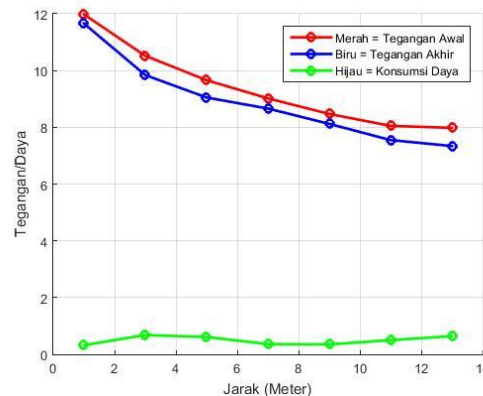
Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan tegangan baterai tidak membentuk kecenderungan yang meningkat secara linier terhadap penambahan jarak komunikasi. Oleh karena itu, data tersebut digunakan sebagai indikator perubahan kondisi sumber daya selama pengujian dan tidak digunakan untuk menyatakan konsumsi daya maupun efisiensi energi secara langsung.

3.5 Analisis Kinerja Jaringan terhadap Variasi Jarak Komunikasi

Berdasarkan hasil pengujian delay dan *packet loss*, peningkatan jarak komunikasi menunjukkan kecenderungan penurunan kinerja jaringan ZigBee. Pada jarak 1–3 m, komunikasi menunjukkan kondisi yang relatif baik dengan delay tambahan sebesar 0 detik dan *packet loss* sebesar 0%. Ketika jarak komunikasi meningkat, nilai delay dan *packet loss*

juga cenderung meningkat. Pada jarak 12 m diperoleh delay tertinggi sebesar 6,6 detik dan packet loss sebesar 43,65%, sedangkan pada jarak 13 m komunikasi tidak dapat dipertahankan pada skenario pengujian QoS.

Hasil pengujian jangkauan menggunakan X-CTU menunjukkan bahwa komunikasi masih dapat terdeteksi hingga 19 m. Perbedaan antara hasil pengujian jangkauan tersebut dan pengujian QoS menunjukkan bahwa keberadaan koneksi komunikasi tidak secara langsung merepresentasikan kualitas layanan yang memadai. Dengan demikian, evaluasi implementasi WSN perlu mempertimbangkan tidak hanya kemampuan perangkat untuk membentuk koneksi, tetapi juga karakteristik *delay* dan keberhasilan penerimaan paket pada jarak operasional yang digunakan.



Gambar 11. Perubahan Tegangan Baterai terhadap Variasi Jarak Komunikasi

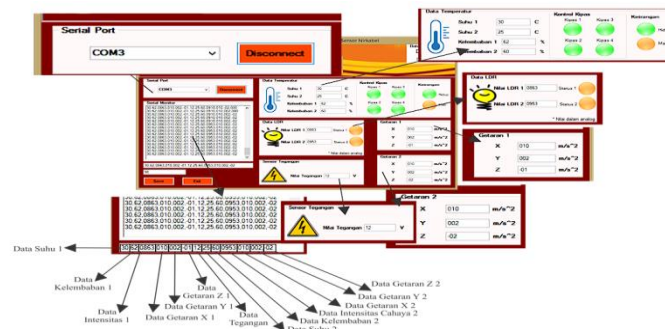
Sementara itu, penurunan tegangan baterai selama interval pengujian 10 menit berada pada rentang 0,32–0,68 V dan tidak menunjukkan kecenderungan linier terhadap pertambahan jarak komunikasi. Oleh karena itu, parameter tersebut hanya digunakan sebagai indikator perubahan kondisi sumber daya selama pengujian dan tidak digunakan untuk menyatakan adanya *trade-off* antara QoS dan efisiensi energi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak komunikasi merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan kinerja prototipe WSN berbasis ZigBee. Penempatan node pada implementasi monitoring data center perlu mempertimbangkan karakteristik komunikasi aktual agar *delay* dan *packet loss* tetap sesuai dengan kebutuhan sistem.

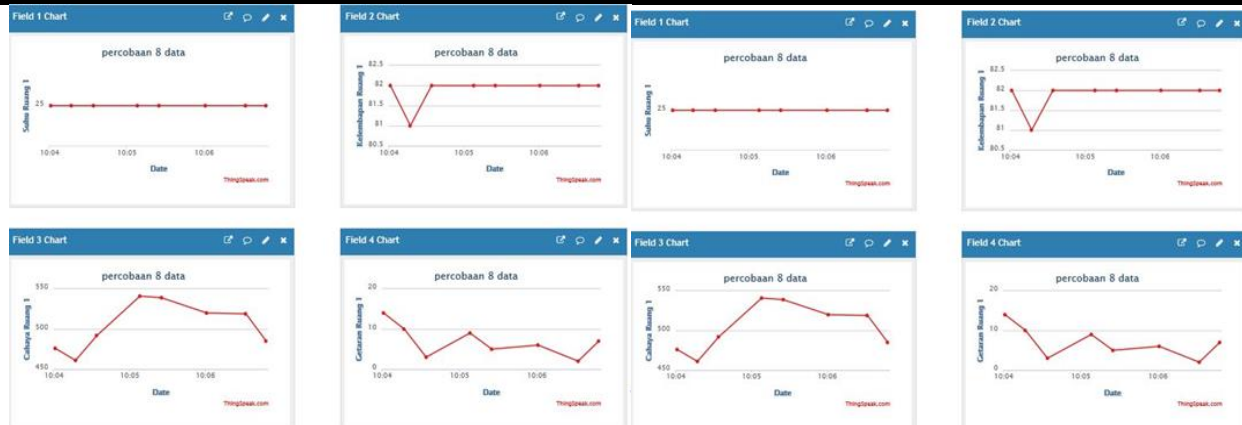
3.6 Realisasi GUI dan Transfer Data ke Web

Pengujian GUI dilakukan untuk memverifikasi keberhasilan penerimaan dan visualisasi data sensor yang dikirimkan dari node sensor melalui jaringan komunikasi yang dirancang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan getaran dari masing-masing node dapat diterima dan ditampilkan pada GUI sesuai dengan parameter sensor yang digunakan. Hasil realisasi antarmuka dan penerimaan data sensor ditunjukkan pada Gambar 12.

Data sensor selanjutnya diteruskan melalui koneksi internet menuju sistem monitoring berbasis web. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data dari delapan parameter sensor dapat diteruskan dan divisualisasikan pada *field* yang telah dikonfigurasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Hasil tersebut menunjukkan bahwa prototipe mampu menjalankan alur akuisisi, transmisi, penerimaan, dan visualisasi data sensor dari node sensor hingga sistem monitoring berbasis web.



Gambar 12. Hasil Pengujian Pengiriman Data Sensor ke GUI

Gambar 13. Hasil pengiriman data ke internet *field* 1-8

Keterangan Gambar 13:

Field 1 = Data sensor Suhu ruang 1

Field 2 = Data sensor Kelembaban ruang 1

Field 3 = Data sensor Cahaya ruang 1

Field 4 = Data sensor Getaran ruang 1

Field 5 = Data sensor Suhu ruang 2

Field 6 = Data sensor Kelembaban ruang 2

Field 7 = Data sensor Cahaya ruang 2

Field 8 = Data sensor Getaran ruang 2

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengevaluasi prototipe *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ZigBee IEEE 802.15.4 untuk monitoring lingkungan data center. Sistem mampu melakukan akuisisi parameter suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan getaran serta mengirimkan data dari node sensor menuju node koordinator untuk selanjutnya divisualisasikan melalui GUI dan sistem monitoring berbasis web. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak komunikasi memengaruhi kinerja jaringan, terutama pada parameter *delay* dan *packet loss*. Pada jarak 1–3 m diperoleh *delay* tambahan sebesar 0 detik dan *packet loss* sebesar 0%, sedangkan pada jarak 12 m *delay* meningkat menjadi 6,6 detik dengan *packet loss* sebesar 43,65%. Pada pengujian QoS jarak 13 m, komunikasi tidak dapat dipertahankan. Sementara itu, pengujian jangkauan menggunakan X-CTU menunjukkan bahwa komunikasi masih dapat terdeteksi hingga 19 m, yang menunjukkan bahwa keberadaan koneksi tidak secara langsung merepresentasikan kualitas layanan yang memadai. Pengamatan kondisi sumber daya selama interval pengujian 10 menit menghasilkan penurunan tegangan baterai sebesar 0,32–0,68 V dan tidak menunjukkan kecenderungan linier terhadap pertambahan jarak komunikasi. Oleh karena itu, perubahan tegangan tersebut digunakan sebagai indikator kondisi sumber daya selama pengujian dan tidak merepresentasikan konsumsi daya secara langsung. Secara keseluruhan, prototipe WSN berbasis ZigBee menunjukkan potensi untuk digunakan pada sistem monitoring lingkungan data center, dengan jarak komunikasi dan penempatan node sebagai faktor penting dalam menjaga kinerja jaringan. Penelitian selanjutnya direkomendasikan melakukan pengujian pada lingkungan indoor data center, mengukur konsumsi energi secara langsung menggunakan pengukuran arus dan tegangan, serta mengevaluasi topologi multi-node untuk memperoleh karakteristik sistem yang lebih representatif terhadap kondisi implementasi sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Universitas Warmadewa atas dukungan kelembagaan, fasilitas, dan lingkungan akademik yang kondusif sehingga kegiatan penelitian dan penyusunan artikel ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Direktur Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Warmadewa beserta seluruh jajaran atas dukungan, kebijakan, serta fasilitasi program penelitian yang diberikan. Dukungan tersebut sangat berarti dalam mendorong peningkatan kualitas pelaksanaan penelitian dan publikasi karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Sharif, U. Al-Mamun, F. Kabir, F. Nazeen, and J. Sobah, "A review on data center monitoring system using smart sensor network," vol. 2, no. 2, 2022, doi: 10.5281/zenodo.6496816.

- [2] A. Zafra-Pérez, J. Medina-García, C. Boente, J. A. Gómez-Galán, A. Sánchez de la Campa, and J. D. de la Rosa, “Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 15, no. 9, p. 102208, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102208>.
- [3] R. M. Woo-García *et al.*, “Implementation of a Wireless Sensor Network for Environmental Measurements,” *Technologies (Basel)*, vol. 12, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.3390/technologies12030041.
- [4] A. Khalifeh, R. Tanash, M. AlQudah, and S. Al-Agtash, “Enhancing energy efficiency of IEEE 802.15.4- based industrial wireless sensor networks,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 33, p. 100460, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100460>.
- [5] B. Bougard, F. Catthoor, D. Daly, A. Chandrakasan, and W. Dehaene, *Energy Efficiency of the IEEE 802.15.4 Standard in Dense Wireless Microsensor Networks: Modeling and Improvement Perspectives*. 2005. doi: 10.1109/DATE.2005.136.
- [6] 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, May 2022, doi: 10.3390/s22093245.
- [7] Z. Liu, Y. Li, L. Zhao, R. Liang, and P. Wang, “Comparative Evaluation of the Performance of ZigBee and LoRa Wireless Networks in Building Environment,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/electronics11213560.
- [8] J. A. Azevedo and F. E. Santos, “Performance Evaluation of Directional Antennas in ZigBee Networks under NLOS Propagation Conditions,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/electronics11132032.
- [9] I. M. S. Dwikiarta, I. P. Y. Prabhadika, and I. A. R. Dewinta, “Quality of Service (QoS) Prototype Smart Bulding Protocol ZigBee 802.15.4 Xbee Series 1 berbasis Jaringan Sensor Nirkabel,” *DIKE : Jurnal Ilmu Multidisiplin*, vol. 2, no. 2, pp. 37–45, Aug. 2024, doi: 10.69688/dike.v2i2.101.
- [10] S. Li, Y. Yuan, and G. Pan, “An Efficient SS-MAC Protocol for IEEE 802.15.4-Based WSNs of Cluster Tree Topology,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/electronics13132520.
- [11] R. Kusumah, H. I. Islam, and S. Sobur, “Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Ruang Data Center,” *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 7, no. 1, 2023, doi: 10.30871/jaic.v7i1.5199.
- [12] M. Bourdeau, J. Wacytens, N. Aouani, P. Basset, and E. Nefzaoui, “A Wireless Sensor Network for Residential Building Energy and Indoor Environmental Quality Monitoring: Design, Instrumentation, Data Analysis and Feedback,” *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5580, 2023, doi: 10.3390/s23125580.
- [13] R. Fitriani, D. B. Putra, D. H. Akhadi, and B. F. Riyalda, “Analisis Received Signal Strength Indicator (RSSI) Menggunakan Protokol ZigBee sebagai Media Transmisi Data Landslide Early Warning System (LEWS) di Area Bervegetasi Rapat: Studi Kasus Desa Cililin, Bandung Barat,” *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 2023, doi: 10.55981/jtl.2023.984.
- [14] I. R. B. Tola, S. Y. Doo, and D. E. D. G. Pollo, “Pemodelan dan Simulasi Pengaruh Posisi dan Ketinggian Nodal Sensor terhadap Quality of Services (QoS) Jaringan Sensor Nirkabel Menggunakan Protokol ZigBee,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i2.445.
- [15] “Optimization of Delay Time in ZigBee Sensor Networks for Smart Home Systems Using a Smart-Adaptive Communication Distribution Algorithm,” *Electronics*, vol. 14, no. 15, p. 3127, 2025, doi: 10.3390/electronics14153127.