



Pemrosesan *Query* Pada Sistem Monitoring Lingkungan Berbasis Jaringan Sensor Nirkabel

Gunawan Halim*¹, Mohammad Fajar*², Abdul Munir*³

Program Studi Teknik Informatika, STMIK Kharisma Makassar¹²³

Jl. Baji Ateka No. 20, Makassar , 90132, Sulawesi Selatan, Indonesia¹²³

gunawan_14@kharisma.ac.id*¹, fajar@kharisma.ac.id*², abdulmunir@kharisma.ac.id*³

Kata Kunci :

Jaringan Sensor
Nirkabel;
IoT;
Arduino;
nRF24L01;
Pemrosesan
Query.

ABSTRAK

Pada jaringan sensor nirkabel dan *Internet of Things* (IoT), komunikasi antar *node* umumnya dilakukan satu arah dari *node* sensor ke *node* pengumpul. Akan tetapi, untuk kondisi tertentu, komunikasi diperlukan secara dua arah, dimana pengguna melakukan permintaan data yang lebih spesifik dari *node* yang tersebar, tanpa harus menunggu *node-node* tersebut mengirimkan data pengindraannya secara terjadwal. Studi ini bertujuan untuk mendesain pemrosesan permintaan data (*query*) pada sistem monitoring kondisi lingkungan berbasis jaringan sensor nirkabel dan IoT. Arduino dan modul komunikasi nRF24L01 digunakan sebagai platform pengembangan prototip yang berbiaya rendah dan andal, serta dirancang sebanyak 11 jenis *query* berbeda yang dapat digunakan oleh pengguna. Uji coba prototip dilahan pertanian menunjukkan pemrosesan *query* pada jarak *node* sensor dan *base station* 30 meter memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, dari 50 data *query* yang dikirim terdapat 4 *query* gagal, dengan tingkat akurasi sebesar 92%, dan untuk jarak 60 meter tingkat akurasi sebesar 80% masih dapat ditoleransi. Selain itu, hasil simulasi model numerik pengukuran kinerja jaringan menunjukkan jarak ≤ 70 meter merupakan jarak ideal yang dapat digunakan dengan tingkat akurasi komunikasi dan efisiensi energi yang cukup baik, sementara jarak >70 meter dapat diterapkan dengan penambahan strategi tertentu seperti pemakaian *node repeater*.

Keywords

Wireless sensor
network;
IoT;
Arduino;
nRF24L01;
Query
Processing;

ABSTRACT

In wireless sensor network (WSN) and Internet of Things (IoT) systems, inter-node communication is predominantly unidirectional, in which sensor nodes transmit data to a central collection node. Nevertheless, certain scenarios necessitate bidirectional communication, enabling users to request specific data from distributed nodes without reliance on scheduled transmissions. The objective of this study is to develop a data query processing mechanism suitable for environmental monitoring systems based on WSN and IoT architectures. Arduino microcontrollers and the nRF24L01 communication module were utilized as a cost-effective and reliable prototyping platform, with eleven distinct query types designed to facilitate user interaction. Field experiments conducted in an agricultural setting revealed that the query processing system achieved a satisfactory accuracy rate at a sensor-to-base-station distance of 30 meters—specifically, 4 out of 50 transmitted queries failed, resulting in an accuracy of 92%. At a distance of 60 meters, an accuracy rate of 80% was deemed acceptable. Moreover, a numerical simulation model indicated that distances of up to 70 meters constitute the optimal operational range, affording both robust communication accuracy and enhanced energy efficiency. Distances exceeding 70 meters necessitate supplementary strategies, such as the deployment of repeater nodes.



PENDAHULUAN

Jaringan sensor nirkabel (JSN) dan *Internet of Things* (IoT) merupakan teknologi yang paling banyak digunakan untuk sistem monitoring dan kendali cerdas terhadap lingkungan atau objek tertentu. Kemampuan jaringan sensor nirkabel untuk digunakan pada lingkungan yang keras seperti lingkungan yang tidak memiliki infrastruktur energi dan teknologi komunikasi merupakan faktor penting yang menjadikannya sebagai pilar utama bagi *Internet of Things* (Landaluce et al., 2020), (Khalifeh et al., 2021). Perpaduan kedua teknologi menghasilkan banyak aplikasi modern saat ini dibidang kesehatan, militer, industri, lingkungan, *smart cities*, hingga komersial (Hassan et al., 2020), (Zijie et al., 2023). Pada jaringan sensor, perangkat yang disebut node sensor disebar, kemudian melakukan pengindraan dan mengirim hasilnya ke pusat data untuk pemrosesan lebih lanjut. Hasil pemrosesan disajikan ke pengguna atau sistem lain yang membutuhkan informasi dalam pengambilan keputusan. Gambar 1 memperlihatkan sebuah node sensor yang telah dikembangkan dan diterapkan dalam penelitian ini untuk membaca kondisi lahan persawahan berupa suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah, kemudian mengirim hasil pengindraannya ke jaringan internet untuk diproses dan disajikan ke pengguna akhir.



Gambar 1. Node Sensor di Lahan Pertanian

Alur data atau komunikasi antar node dalam sistem JSN dan IoT umumnya dilakukan satu arah dari node sensor ke node pengumpul atau *base station*. Node sensor diprogram untuk melakukan pengindraan objek atau lingkungan dan mengirim hasilnya berdasarkan periode waktu tertentu ke node pengumpul. Pengiriman data dapat pula dilakukan jika terjadi kondisi tertentu, seperti pada sistem deteksi kebakaran, dimana node sensor mengirim hasil pengindraan atau notifikasi apabila dideteksi adanya api, baik itu menggunakan sensor temperatur, gas dan infrared (Roque & Padilla, 2020), (Suhartini et al., 2023) ataupun yang menggunakan kamera (Altowajjri et al., 2021), (Lee et al., 2023). Sementara untuk kondisi-kondisi tertentu, komunikasi diperlukan secara dua arah. Misalnya



pengguna menginginkan data tertentu dari node yang tersebar, tanpa harus menunggu node tersebut mengirimkannya secara terjadwal. Hal ini memungkinkan pengguna melakukan permintaan data atau informasi yang diistilahkan sebagai *query* ke jaringan sensor sesuai kebutuhannya, kemudian node-node di jaringan memberikan data yang diminta. Selain itu, model komunikasi seperti ini dapat menjadi solusi alternatif untuk mengurangi jumlah komunikasi data pada sistem yang memerlukan efisiensi pemakaian sumber energi node sensor. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mendesain pemrosesan *query* pada jaringan sensor nirkabel dan IoT, sehingga pengguna dapat melakukan permintaan data sesuai kebutuhan ke jaringan sensor. Studi ini diharapkan memberikan informasi penting dan rujukan terkait perancangan komunikasi dua arah untuk proses *query* pada sistem berbasis jaringan sensor dan IoT.

METODE PENELITIAN

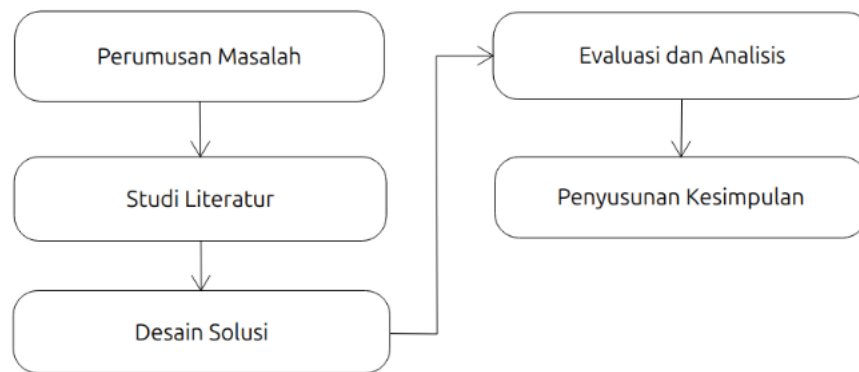
Bagian ini menguraikan tahapan-tahapan penelitian termasuk pengumpulan data melalui studi literatur dan observasi, teknik evaluasi serta analisis hasil pengujian.

1. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu:

- **Perumusan masalah penelitian.** Pada tahapan ini, masalah penelitian dirumuskan dengan jelas dalam bentuk kalimat tanya yang perlu dijawab, yaitu bagaimana rancangan dan kinerja pemrosesan *query* di jaringan sensor berbasis IoT. Dimana pengguna dapat melakukan permintaan data ke node sensor.
- **Studi literatur,** tahapan selanjutnya mengumpulkan informasi dan referensi terkait komunikasi jaringan sensor, secara khusus model komunikasi dan *query* di jaringan sensor nirkabel.
- **Merancang solusi yang diusulkan,** pada tahapan ini disusun rancangan arsitektur sistem, model *query* yang digunakan, perangkat lunak, platform dan rancangan perangkat keras node yang mendukung penelitian.
- **Evaluasi dan analisis hasil.** Evaluasi rancangan solusi diuji di lingkungan terbatas yang telah disesuaikan yaitu di lingkungan persawahan dan melalui model simulasi numerik berupa perhitungan matematis untuk mengukur secara langsung (observasi) kinerja sistem. *Sink* atau node koordinator dan node sensor dipasang di beberapa titik tertentu, node sensor yang digunakan merupakan node untuk mendeteksi suhu dan kelembapan udara serta kelembapan tanah yang sesuai untuk aplikasi monitoring kondisi lingkungan. Sementara node *sink* untuk mengumpulkan hasil pengindraan. Data yang diperoleh di analisis berdasarkan *query* yang dikirim. Analisis hasil melibatkan parameter kinerja jaringan sensor.
- **Penyusunan kesimpulan.** Pada tahapan ini, kesimpulan penelitian disusun berdasarkan evaluasi dan analisis kinerja jaringan sensor yang telah dilakukan.

Gambar 2 memperlihatkan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Tahapan Penelitian

2. Evaluasi dan Analisis

Pada penelitian ini, evaluasi dibagi dalam dua tahap, evaluasi pertama dilakukan di lahan terbuka persawahan terbatas menggunakan prinsip pengujian *black-box* untuk mengamati apakah *query* yang dimasukkan melalui *base station* dapat dikirim ke node sensor, dan node sensor mengirim hasil atau data sesuai permintaan. Dua node sensor, satu *sink* bertindak sebagai koordinator yang terhubung dengan laptop sebagai *base station*-nya digunakan dalam evaluasi ini. Untuk evaluasi kedua yaitu dilakukan model simulasi numerik dan analisis kinerja jaringan sensor nirkabel yang dirancang, berdasarkan sejumlah parameter seperti berapa besar rasio sinyal yang gagal akibat gangguan atau *signal to noise ratio* (SNR), persentase paket yang gagal diterima atau *packet error rate* (PER), tingkat akurasi pengiriman data atau *packet delivery ratio* (PDR) dan efisiensi energi. Berikut formula yang digunakan untuk menghitung parameter-parameter kinerja tersebut.

$$SNR = \frac{\text{Daya sinyal}}{\text{Daya noise}} \times 100\% \quad (1)$$

$$PDR = \frac{\text{jumlah data diterima}}{\text{jumlah data dikirim}} \times 100\% \quad (2)$$

$$PER = \frac{\text{jumlah paket error}}{\text{jumlah paket dikirim}} \times 100\% \quad (3)$$

$$n = \frac{E_{\text{berhasil}}}{E_{\text{Total}}} \times 100\% \quad (4)$$

Untuk efisiensi energi akan berbanding langsung dengan *Packet Delivery Ratio* (PDR). Evaluasi kinerja melalui model simulasi numerik menggunakan konfigurasi perangkat yang diuji pada lingkungan nyata dengan data empiris yang telah dikumpulkan.

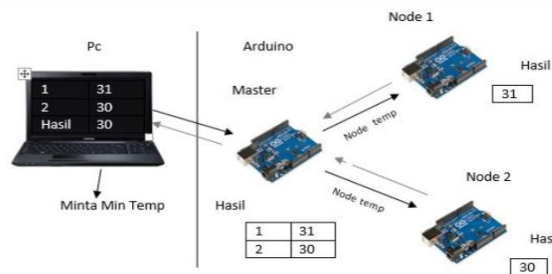
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil studi berupa desain arsitektur sistem usulan, desain node, desain struktur pesan, dan hasil evaluasi.



1. Desain Arsitektur Sistem

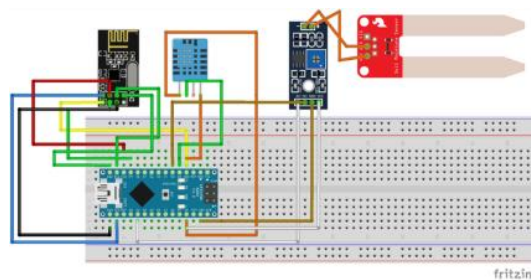
Query dilakukan oleh pengguna yang diterima oleh *PC base station*, kemudian diteruskan ke node koordinator (*master*). Node *master* menyebarkan *query (broadcast)* ke node-node di jaringan sensor yang berada pada jangkauannya. Node sensor mengirim data hasil *query* ke node *master* untuk diberikan ke *PC base station* dan diteruskan ke perangkat pengguna. Rancangan arsitektur sistem ini disajikan sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Node-node di jaringan sensor dirancang menggunakan platform berbasis Arduino.



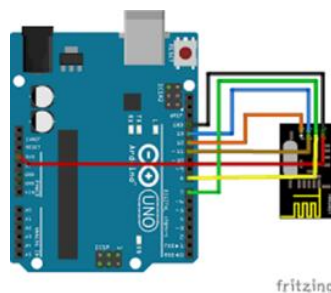
Gambar 3. Desain Arsitektur Sistem Pemrosesan *Query*

2. Desain Node Sensor dan Node Sink

Rancangan node sensor terdiri dari mikrokontroler arduino Nano, modul komunikasi nRF24L01 dan sensor DHT11 untuk penginderaan temperatur dan kelembaban udara, serta sensor kelembaban tanah. Sementara node *sink (master)* menggunakan platform arduino Uno dan modul komunikasi nRF24L01. Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan desain kedua node yang digunakan.



Gambar 4. Desain Node Sensor



Gambar 5. Desain Node Sink (*Master*)



3. Desain Struktur Pesan (Payload)

Struktur pesan yang digunakan dalam komunikasi di jaringan dibagi menjadi dua, yang pertama struktur pesan yang berisi *Query*. Struktur ini digunakan untuk pengiriman data *query* dari *base station* ke node sensor. Struktur yang kedua yaitu hasil *query*, berisi data hasil penginderaan yang dikirim oleh node sensor ke node pengumpul (*master*). Gambar 6 menunjukkan ilustrasi struktur kedua pesan yang digunakan.

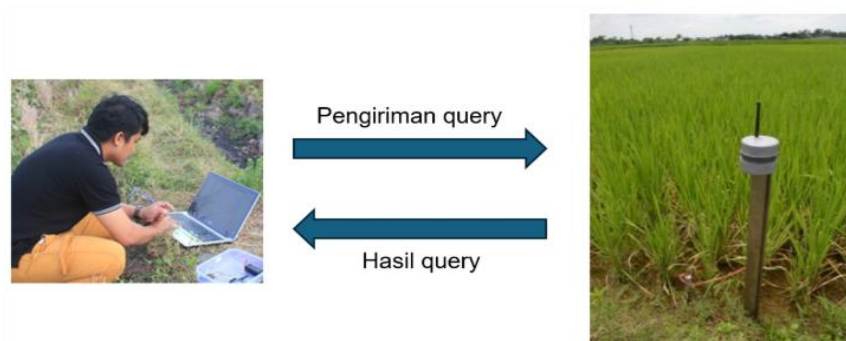


Gambar 6. Struktur Pesan Dalam Komunikasi di Jaringan

Data suhu/kelembapan merupakan hasil penginderaan node sensor, yaitu suhu dan kelembapan udara. Node Id merupakan identitas node yang juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi tempat atau lokasi node tersebut berada. Rancangan *query* terdiri dari sebelas perintah, diantaranya yaitu: **Max Temp** untuk meminta data temperatur tertinggi, **Min Temp** untuk meminta data temperatur terendah, **Rata-Rata Temp** untuk meminta data rata-rata temperatur, **Min Kelembapan** untuk meminta data kelembapan udara terendah, **Max Kadar Air** untuk meminta data kadar air tertinggi, dan **Ubah Sampling Time** untuk meminta node sensor mengubah periode pembacaan data.

4. Hasil Evaluasi

Dalam pengujian ini, digunakan dua prototip node sensor yang dilengkapi dengan sensor suhu, kelembapan udara dan kelembapan tanah yang di tempatkan pada lahan persawahan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Jarak uji masing-masing antara node sensor dengan *base station* mulai dari 30 meter, 50 meter, 80 meter dan 100 meter. *Query* dimasukkan melalui *base station* yang diteruskan oleh *sink* atau node koordinator ke kedua node sensor. Hasil *query* dikirim kembali ke *base station* untuk pemrosesan lebih lanjut.



Gambar 7. Evaluasi Pemrosesan *Query* di Lahan Persawahan



Jumlah data yang diambil sebanyak 50 data dari 5 jenis *query* yang diuji. Sebagaimana ditunjukkan pada contoh data di Tabel 1 untuk tiga jenis *query*. Terlihat bahwa data yang dikembalikan oleh node sensor sesuai dengan permintaan *query* yang dikirimkan melalui *base station*. Untuk kinerja jaringan, pada jarak 30 meter sebanyak 46 data *query* berhasil dilakukan dan terdapat 4 data *error* atau *loss*, tingkat akurasi masih cukup baik dan andal yaitu sebesar 92%. Untuk jarak 60 meter, data *error* meningkat sebanyak 10 data, tingkat akurasi sebesar 80% masih dapat ditoleransi. Sementara untuk jarak 90 meter data *error* sebanyak 18 data, kinerja sistem sudah mulai menurun, tingkat akurasi sebesar 64%, sementara untuk jarak 120 meter, data *error* sebanyak 33, mengindikasikan sistem komunikasi yang sudah tidak efektif, dengan tingkat akurasi hanya sebesar 34%.

Tabel 1. Potongan Data Hasil Pengujian Akurasi *Query* Untuk Jarak 30 Meter

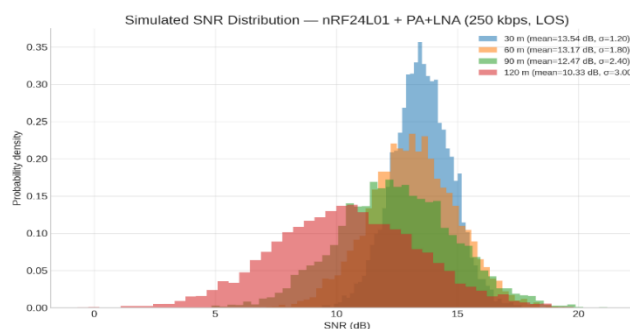
No.	Jenis <i>Query</i>	Node Sensor 1			Node Sensor 2			Hasil
		Temp	Moist	Soil Moist	Temp	Moist	Soil Moist	
1	Max Temp	35	-	-	38	-	-	38
2		35	-	-	48	-	-	48
3		34	-	-	50	-	-	50
4		35	-	-	53	-	-	53
5		33	-	-	53	-	-	53
6	Min Temp	35	-	-	53	-	-	35
7		35	-	-	53	-	-	35
8		33	-	-	53	-	-	33
9		34	-	-	48	-	-	34
10		35	-	-	45	-	-	35
11	Rata-Rata Temp	35	-	-	43	-	-	56
12		35	-	-	41	-	-	55
13		34	-	-	39	-	-	53
14		34	-	-	36	-	-	52
15		35	-	-	35	-	-	52

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan numerik untuk mengukur kinerja node sensor berbasis platform Arduino dengan modul komunikasi nRF24L01 pada konfigurasi satu node sensor dan satu *sink* dengan variasi jarak 30 meter, 60 meter, 90 meter dan 120 meter. Setiap skenario mengirimkan 1000 paket dengan ukuran 127 byte pada kecepatan transmisi 250 kbps sesuai modul nRF24L01 yang digunakan. Parameter fisik yaitu tegangan 3.3 V dan arus



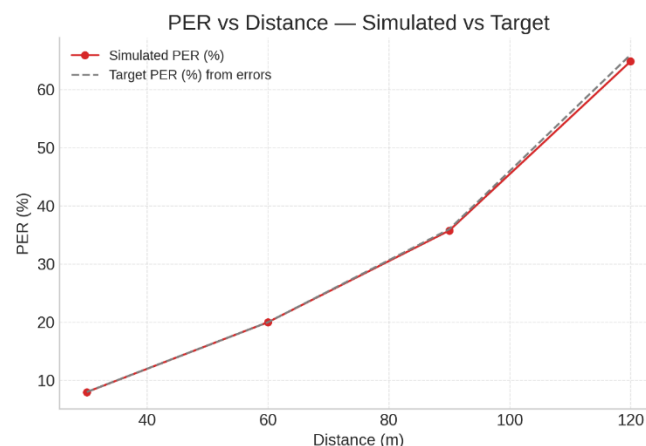
transmisi 17.4 mA. Analisis dilakukan terhadap parameter SNR, PER, PDR, dan efisiensi energi sistem.

Sebagaimana disajikan pada Gambar 8, rata-rata SNR menurun, mengindikasikan sinyal semakin lemah saat jarak bertambah, sebaran SNR melebar dimana variabilitas meningkat akibat efek *multipath* dan interferensi. Pada jarak 30 meter, nilai SNR rata-rata sekitar 13.5 dB, cukup tinggi untuk menjamin keandalan komunikasi. Namun, pada jarak 120 meter, SNR turun menjadi ≈ 10.3 dB, yang mendekati ambang batas sensitivitas penerima (sekitar -90 dBm untuk modul nRF24L01 pada 250 kbps). Hal ini menjelaskan meningkatnya kesalahan transmisi secara signifikan pada jarak jauh. Semakin jauh node dari *sink*, semakin lemah daya sinyal diterima akibat kehilangan daya propagasi dan naik turunnya kekuatan sinyal. Sehingga jarak < 90 meter merupakan jarak yang dapat digunakan. Untuk jarak 120 meter diperlukan strategi peningkatan performa jaringan seperti penerapan mekanisme *multi hop* melalui node perantara (*repeater*) agar sinyal dapat diperkuat.



Gambar 8. Distribusi SNR untuk nRF24L01 (250 kbps)

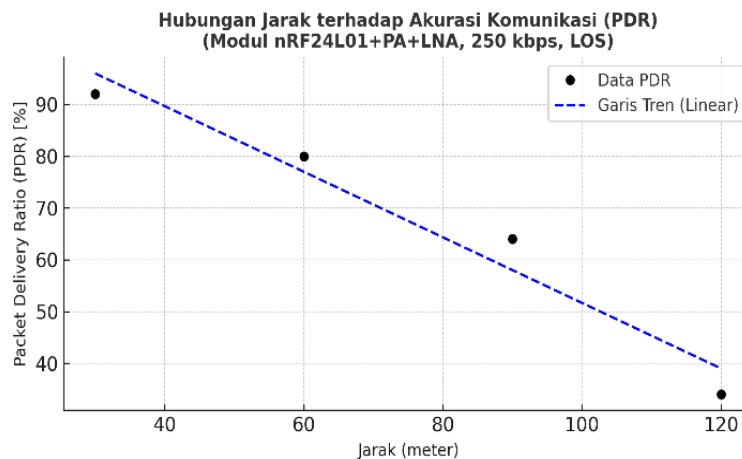
Berkaitan dengan kondisi SNR, maka untuk parameter *packet error rate* (PER), terlihat jarak 30 meter nilai PER rendah ($\sim 8\%$) yang mengindikasikan data *error* rendah dan komunikasi sangat *reliable* atau dapat diandalkan. Pada jarak 60 meter, nilai PER naik menjadi $\sim 20\%$, mulai terlihat adanya penurunan performa, namun masih dalam batas dapat diterima untuk komunikasi di jaringan sensor secara periodik. Pada jarak 90 meter, nilai PER $\sim 36\%$, dimana keandalan komunikasi menurun signifikan, sehingga memerlukan strategi retransmisi untuk menjaga integritas data. Sementara pada jarak 120 meter, PER telah mendekati 65%, menunjukkan sebagian besar paket tidak diterima, sistem berada di ambang kegagalan komunikasi. Sehingga, sebagaimana pada parameter SNR sebelumnya, maka jarak < 90 meter merupakan kondisi ideal pada sistem ini. Grafik hasil pengujian simulasi PER ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hubungan rata-rata PER terhadap jarak (*Distance*)

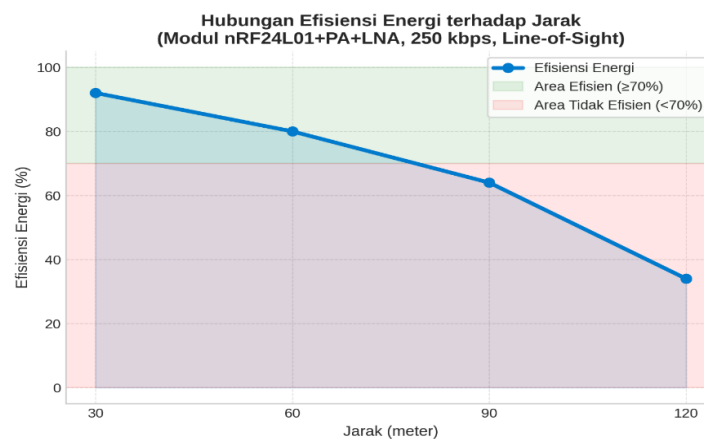


Untuk hubungan antara jarak dan akurasi komunikasi (PDR) yang disajikan pada Gambar 10, menunjukkan tren penurunan *Packet Delivery Ratio* (PDR) seiring bertambahnya jarak transmisi. Untuk 30 meter, nilai akurasi (PDR) $\approx 92\%$, transmisi sangat andal. Untuk 60 meter dengan persentase PDR $\approx 80\%$, mulai terlihat adanya ketidakstabilan sinyal akibat *multipath*, interferensi atau *fading*, meskipun penurunan tingkat akurasi masih dapat ditoleransi. Untuk 90 meter, nilai PDR $\approx 64\%$, terjadi penurunan akurasi secara signifikan. Sementara jarak 120 meter, tingkat akurasi (PDR) $\approx 34\%$, banyak paket hilang, komunikasi menjadi tidak stabil. Hal ini menunjukkan jarak ideal yaitu < 90 meter.



Gambar 10. Hubungan antara jarak dan akurasi komunikasi (PDR)

Sementara untuk parameter efisiensi energi sebagaimana disajikan pada Gambar 11, memperlihatkan bahwa efisiensi energi menurun terhadap peningkatan jarak. Pada jarak 30 meter, efisiensi energi mencapai sekitar 92%, menandakan sebagian besar paket data dikirim dengan sukses tanpa memerlukan retransmisi yang berarti. Ketika jarak meningkat menjadi 60 meter, efisiensi menurun menjadi 80%, namun masih berada dalam area operasi efisien (zona hijau). Penurunan yang lebih tajam terjadi setelah 90 meter, di mana efisiensi energi jatuh ke 64%, menandakan semakin banyak energi terbuang untuk mengirim ulang paket akibat meningkatnya kesalahan transmisi (PER). Pada 120 meter, efisiensi hanya mencapai 34%, menunjukkan sistem berada pada kondisi tidak efisien (zona merah), di mana konsumsi energi per paket berhasil menjadi sangat tinggi.



Gambar 11. Hubungan antara efisiensi energi dan jarak



Hasil evaluasi terhadap kinerja parameter yang telah ditunjukkan, mencerminkan *trade-off* dalam komunikasi nirkabel antara jarak jangkauan dan efisiensi energi. Peningkatan jarak memperbesar *path loss* dan menurunkan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), yang pada akhirnya meningkatkan jumlah paket *error* dan menurunkan akurasi komunikasi (PDR). Berdasarkan hasil ini, disimpulkan bahwa jarak operasi optimal untuk sistem komunikasi berbasis nRF24L01+PA+LNA (250 kbps) yang digunakan dalam kondisi garis pandang langsung dan tidak adanya penghalang (LOS) berada pada ≤ 70 meter, di mana efisiensi energi dan reliabilitas masih tinggi, serta konsumsi daya sistem tetap terjaga.

SIMPULAN DAN SARAN

Dari evaluasi prototip yang dilakukan pada sistem monitoring kondisi lingkungan persawahan memperlihatkan, *query* berhasil dikirim melalui *base station* ke jaringan sensor, kemudian node sensor mengirim data hasil pengindraan sesuai *query* tersebut. Hal ini memperlihatkan bahwa pemrosesan *query* untuk komunikasi dua arah pada jaringan sensor nirkabel dapat terlaksana. Uji coba dilahan pertanian dan model simulasi numerik pengukuran kinerja dengan konfigurasi prototip berbasis Arduino serta modul komunikasi nRF24L01, diketahui bahwa jarak ≤ 70 meter merupakan jarak ideal yang dapat digunakan dengan kinerja jaringan termasuk efisiensi energi yang baik, sementara jarak >70 meter dapat diterapkan dengan penambahan strategi tertentu seperti pemakaian node perantara untuk memperkuat sinyal (*repeater*). Selain itu, uji coba dilahan pertanian menunjukkan pemrosesan *query* pada jarak node sensor dan *base station* 30 meter memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, dimana dari 50 data *query* yang dilakukan terdapat 4 *query* gagal, dengan tingkat akurasi sebesar 92%, dan untuk jarak 60 meter tingkat akurasi sebesar 80% masih dapat ditoleransi. Hal ini mengindikasikan pemrosesan *query* cukup andal diterapkan pada sistem monitoring lingkungan berbasis jaringan sensor nirkabel.

Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan evaluasi dan analisis kinerja pemrosesan *query* melalui perangkat pengguna yang terhubung ke jaringan internet atau melibatkan perangkat *Internet of Things*.

DAFTAR PUSTAKA

- Altowaijri, A. H., Alfaihi, M. S., Alshawi, T. A., Ibrahim, A. B., & Alshebeili, S. A. (2021). A Privacy-Preserving Iot-Based Fire Detector. *IEEE Access*, 9, 51393–51402. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069588>
- Begum, B. A., & Nandury, S. V. (2023). Data Aggregation Protocols For WSN And Iot Applications – A Comprehensive Survey. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(2), 651–681. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUCI.2023.01.008>
- Cai, Z., & Shi, T. (2020). Distributed Query Processing in the Edge Assisted IoT Data Monitoring System. *IEEE Internet of Things Journal*, PP, 1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3026988>
- Fajar, M., Litan, J., Munir, A., & Halid, A. (2017). Energy Efficiency using Data Filtering Approach on Agricultural Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Engineering and Information Technology*, 9, 192–197.
- Hassan, R., Qamar, F., Hasan, M. K., Aman, A. H. M., & Ahmed, A. S. (2020). Internet Of Things And Its Applications: A Comprehensive Survey. In *Symmetry* (Vol. 12, Issue 10, pp. 1–29). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/sym12101674>
- Khalifeh, A., Darabkh, K. A., Khasawneh, A. M., Alqaisieh, I., Salameh, M., Alabdala, A., Alrubaye,



- S., Alassaf, A., Al-Hajali, S., Al-Wardat, R., Bartolini, N., Bongiovannim, G., & Rajendiran, K. (2021). Wireless Sensor Networks For Smart Cities: Network Design, Implementation And Performance Evaluation. *Electronics (Switzerland)*, 10(2), 1–28. <https://doi.org/10.3390/electronics10020218>
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A Review Of Iot Sensing Applications And Challenges Using RFID And Wireless Sensor Networks. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20092495>
- Lanzolla, A., & Spadavecchia, M. (2021). Wireless Sensor Networks For Environmental Monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1–3. <https://doi.org/10.3390/s21041172>
- Lee, C.-H., Lee, W.-H., & Kim, S.-M. (2023). Development of IoT-Based Real-Time Fire Detection System Using Raspberry Pi and Fisheye Camera. *Applied Sciences*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/app13158568>
- Li, X., Zhou, Z., Guo, J., Wang, S., & Zhang, J. (2019). Aggregated Multi-Attribute Query Processing In Edge Computing For Industrial Iot Applications. *Computer Networks*, 151, 114–123. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2019.01.022>
- Madden, S. R., Franklin, M. J., Hellerstein, J. M., Berkeley, U. C., & Hong, W. (2004). *TinyDB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks 1*.
- Murthy, M. Y. B., & Koteswararao, A. (2024). Applications, merits and demerits of WSN with IoT: a detailed review. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 17(1), 68–88. <https://doi.org/10.1504/IJAACS.2024.135941>
- Nourildean, S. W., Hassib, M. D., & Mohammed, Y. A. (2022). Internet Of Things Based Wireless Sensor Network: a review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(1), 246–261. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i1.pp246-261>
- Roque, G., & Padilla, V. S. (2020). LPWAN Based IoT Surveillance System for Outdoor Fire Detection. *IEEE Access*, 8, 114900–114909. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003848>
- Suhartini, S., Peslinof, M., & Ficky Afrianto, M. (2023). Rancang Bangun Sistem Deteksi Kebakaran pada Ruangan Berbasis Internet of Things (IoT). *Satuan Tulisan Riset Dan Inovasi Teknologi*, 7(3), 329–338.
- Surenther, I., Sridhar, K. P., & Roberts, M. K. (2024). Enhancing Data Transmission Efficiency In Wireless Sensor Networks Through Machine Learning-Enabled Energy Optimization: A grouping model approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102644. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102644>
- Zijie, F., Al-Shareeda, M. A., Saare, M. A., Manickam, S., & Karuppayah, S. (2023). Wireless Sensor Networks In The Internet Of Things: Review, Techniques, Challenges, And Future Directions. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 31(2), 1190–1200. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v31.i2.pp1190-1200>