

Desain dan Evaluasi Prototipe Jaringan Sensor Nirkabel untuk Monitoring Lahan Persawahan di Kabupaten Gowa

Andi Muhammad Nur Hidayat¹, A. Zulfan Donangsyah^{2*}, Aldin Ihsan³, Muh. Rihan⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Informatika, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Indonesia

¹ andi.nurhidayat@uin-alauddin.ac.id, ² zlvndonangsyah@gmail.com, ³ aldin.ihsan084@gmail.com, ⁴ mr1303.m@gmail.com

Diajukan: 7 Oktober 2025 | Direvisi: 5 Januari 2026 | Diterima: 6 Januari 2026 | Diterbitkan: 9 Februari 2026

Abstract

Continuous monitoring of the environmental conditions of rice fields is an important aspect in improving the efficiency of agricultural management and supporting food security, especially in Gowa Regency which has extensive and limited rice fields so that manual monitoring is less effective and unable to provide real-time data. This study aims to design and launch a prototype of a wireless sensor network (WSN) based on Arduino and XBee modules to combine environmental parameters such as temperature, air humidity, and soil moisture in rice fields. The research method used is a field experiment by implementing three sensor nodes and one central node that communicate using the ZigBee protocol in a star topology, where data is sent periodically every five minutes and analyzed descriptively quantitatively. The evaluation system is carried out based on network coverage parameters, connection stability, and sensor accuracy by comparing the measurement results to standard measuring instruments. The results of the study indicate that the WSN system is capable of reaching a maximum communication distance of 120 meters in open areas with an average data packet loss of 3%, while in areas with physical obstacles the effective range decreases to around 80 meters. Sensor accuracy testing shows a measurement deviation of $\pm 1^{\circ}\text{C}$ for temperature, $\pm 2\%$ RH for air humidity, and $\pm 3\%$ for soil moisture, which are still within the tolerance limits of agricultural applications. Based on these results, it can be concluded that the developed WSN prototype has reliable performance, is able to provide real-time and consistent environmental data, and is suitable for use as a rice field monitoring system and as a basis for data-based decision making in supporting the implementation of precision agriculture in Gowa Regency.

Keywords: Agricultural Monitoring, Arduino, Gowa Regency, Wireless Sensor Network, XBee.

Abstrak

Pemantauan kondisi lingkungan lahan persawahan secara kontinyu merupakan aspek penting dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan pertanian dan mendukung ketahanan pangan, khususnya di Kabupaten Gowa yang memiliki lahan persawahan luas dan terbatas sehingga pemantauan manual menjadi kurang efektif dan tidak mampu menyediakan data secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan meluncurkan prototipe jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) berbasis Arduino dan modul XBee untuk menggabungkan parameter lingkungan berupa suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah pada lahan persawahan. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen lapangan dengan menerapkan tiga node sensor dan satu node pusat yang berkomunikasi menggunakan protokol ZigBee dalam topologi star, di mana data dikirimkan secara periodik setiap lima menit dan dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Sistem evaluasi dilakukan berdasarkan parameter jangkauan jaringan, stabilitas koneksi, dan akurasi sensor dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat ukur standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WSN mampu menjangkau komunikasi hingga jarak maksimal 120 meter pada area terbuka dengan rata-rata kehilangan paket data (packet loss) sebesar 3%, sedangkan pada area dengan hambatan fisik jangkauan efektif menurun hingga sekitar 80 meter. Pengujian akurasi sensor menunjukkan deviasi pengukuran sebesar $\pm 1^{\circ}\text{C}$ untuk suhu, $\pm 2\%$ RH untuk kelembaban udara, dan $\pm 3\%$ untuk kelembaban tanah, yang masih berada dalam batas toleransi aplikasi pertanian. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa prototipe WSN yang dikembangkan memiliki kinerja yang andal, mampu menyediakan data lingkungan secara real-time dan konsisten, serta layak digunakan sebagai sistem pemantauan lahan persawahan dan sebagai dasar pengambilan keputusan berbasis data dalam mendukung penerapan pertanian presisi di Kabupaten Gowa.

Kata kunci: Arduino, Jaringan Sensor Nirkabel, Kabupaten Gowa, Monitoring Pertanian, XBee

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0). Copyright (C) Author's.



1. PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor strategis bagi Kabupaten Gowa karena memiliki kontribusi besar dalam mendukung ketahanan pangan di wilayah Sulawesi Selatan. Sebagian besar masyarakat Kabupaten Gowa masih menggantungkan mata pencahariannya pada sektor pertanian, khususnya pertanian padi. Komoditas padi memiliki peran penting sebagai sumber pangan utama, sehingga keberlanjutan dan produktivitasnya perlu dijaga secara optimal. Untuk mencapai hasil panen yang maksimal, tanaman padi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembaban udara, dan kelembaban tanah [1].

Namun, hingga saat ini proses pemantauan kondisi lahan pertanian di Kabupaten Gowa masih banyak dilakukan secara manual. Petani biasanya mengandalkan pengamatan langsung atau alat ukur sederhana yang digunakan secara berkala. Metode ini membutuhkan waktu dan tenaga yang cukup besar serta berpotensi menimbulkan kesalahan pengukuran akibat keterbatasan manusia dan alat. Selain itu, pemantauan manual tidak mampu menyediakan data secara kontinu dan real-time, padahal perubahan kondisi lingkungan pada lahan pertanian dapat terjadi dengan cepat dan memengaruhi pertumbuhan tanaman padi [2].

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi membuka peluang baru dalam pengelolaan lahan pertanian yang lebih efisien. Salah satu teknologi yang dapat diterapkan adalah jaringan sensor nirkabel atau Wireless Sensor Network (WSN). WSN memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara otomatis dari berbagai titik pengukuran tanpa menggunakan kabel fisik. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan node-node sensor yang dapat ditempatkan di area persawahan untuk mengukur parameter lingkungan seperti temperatur, kelembaban udara, dan kelembaban tanah, kemudian mengirimkan data tersebut ke pusat pengolahan secara real-time [3].

Data yang diperoleh melalui sistem WSN dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan lahan pertanian. Informasi mengenai kondisi tanah dan lingkungan dapat membantu petani dalam menentukan waktu dan jumlah irigasi yang tepat, pemberian pupuk secara efisien, serta tindakan pencegahan terhadap kondisi yang berpotensi merugikan tanaman [4]. Dengan demikian, penggunaan WSN dapat mengurangi pemborosan sumber daya seperti air dan pupuk, sekaligus meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian padi.

Perkembangan teknologi Wireless Sensor Network (WSN) telah membuka peluang besar dalam mendukung sektor pertanian, khususnya dalam pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan WSN mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan melalui penyediaan data suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah secara kontinu dan akurat. Informasi tersebut menjadi dasar penting dalam penerapan presisi pertanian untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti udara dan pupuk serta meningkatkan produktivitas tanaman [5].

Penerapan WSN sejalan dengan konsep pertanian presisi (precision agriculture), yaitu pendekatan pengelolaan lahan berbasis data yang akurat, kontinu, dan terukur. Melalui sistem monitoring otomatis, petani dapat memperoleh informasi kondisi lahan secara cepat dan akurat sehingga keputusan yang diambil menjadi lebih tepat [6]. Selain meningkatkan hasil produksi, penerapan teknologi ini juga berpotensi menjadi model pengelolaan lahan pertanian modern yang dapat diterapkan di wilayah lain dengan karakteristik lingkungan yang serupa, khususnya di daerah agraris seperti Kabupaten Gowa.

2. METODE PENELITIAN/ALGORITMA

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan untuk menguji kinerja jaringan sensor nirkabel (WSN) dalam memantau kondisi lingkungan pada lahan persawahan di Kabupaten Gowa. Sistem yang digunakan terdiri dari beberapa node sensor dan satu node pusat yang saling terhubung melalui modul komunikasi XBee. Metode penelitian mencakup tahap perancangan sistem, implementasi di lapangan, dan evaluasi terhadap kinerja jaringan serta akurasi sensor.

2.1. Perancangan Sistem

Pada tahap ini, jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) dirancang menggunakan tiga node sensor dan satu node pusat. Setiap node sensor menggunakan Arduino Uno sebagai pengontrol utama dan dilengkapi dengan sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara serta sensor kelembaban tanah kapasitif untuk membaca kadar air tanah. Komunikasi antar node dilakukan menggunakan modul XBee dengan protokol ZigBee dalam topologi star, di mana seluruh sensor node mengirimkan data secara langsung ke node pusat. Topologi ini dipilih karena sederhana, mudah diimplementasikan, dan sesuai untuk skala lahan persawahan yang terbatas. Node pusat menggunakan Arduino Mega yang berfungsi sebagai pengumpul data dari seluruh node sensor dan terhubung ke komputer untuk proses penyimpanan dan pemantauan data. Pengiriman data dilakukan secara periodik dengan interval waktu lima menit untuk memperoleh informasi kondisi lingkungan yang representatif tanpa membebani jaringan dan mengonsumsi daya node.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis yang Digunakan

No	Sensor	Parameter	Rentang Ukur	Resolusi/Akurasi	Fungsi
1	DHT11	Suhu Udara	0–50°C	Resolusi 1°C	Mengukur suhu lingkungan
2	DHT11	Udara	Kelembapan relatif 20% - 90%	Resolusi 1% RH	Mengukur kelembapan udara
3	Sensor kelembapan tanah kapasitif	Tanah	0-100%	Sebuah analoag-10bit	Mengukur kadar air tanah

Spesifikasi teknis sensor yang digunakan dalam sistem WSN ditunjukkan pada Tabel diatas, yang mencakup jenis sensor, parameter yang diukur, jarak pengukuran, serta resolusi atau akurasi pembacaan. Informasi ini digunakan sebagai dasar dalam memancarkan kinerja dan akurasi sistem, khususnya pada tahap validasi data sensor dengan alat ukur pembanding. Dengan mengetahui karakteristik teknis masing-masing sensor, hasil pengukuran yang diperoleh dapat dianalisis secara lebih objektif dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi pemantauan lingkungan pertanian.

2.2. Implementasi Lapangan

Setelah proses perancangan, sistem diuji dan diterapkan di tiga titik lahan persawahan di Kabupaten Gowa yang memiliki karakteristik tanah berbeda, yaitu tanah lempung, berpasir, dan campuran. Sensor kelembapan tanah dipasang pada kedalaman 10 cm untuk mendapatkan kondisi tanah yang representatif, sedangkan sensor udara ditempatkan pada ketinggian 1,5 meter untuk mengurangi pengaruh langsung cuaca seperti hujan atau radiasi matahari.

Node sensor ditempatkan sesuai jarak yang mempertimbangkan jangkauan komunikasi XBee dan kondisi fisik lahan. Node pusat ditempatkan di area yang aman dan terhubung ke komputer untuk memantau data secara langsung. Langkah Implementasinya yaitu :

- Penempatan sensor pada tiga titik lahan dengan karakteristik tanah berbeda
- Instalasi sensor tanah pada kedalaman 10 cm
- Penempatan sensor udara pada ketinggian 1,5 m
- Penempatan node sesuai jangkauan komunikasi

2.2. Implementasi Lapangan Evaluasi Sistem

Evaluasi sistem dilakukan untuk mengukur kinerja jaringan dan keakuratan data sensor. Pengujian meliputi pengukuran jangkauan maksimal komunikasi antara node sensor dan node pusat, pengamatan stabilitas koneksi selama periode pemantauan, serta validasi data sensor dengan alat ukur pembanding. Data diperoleh selama pengujian dan dianalisis untuk mengetahui tingkat kehilangan paket, deviasi pengukuran, dan pola fluktuasi kondisi lingkungan. Validasi data sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sistem WSN terhadap thermo-hygrometer digital HTC-1 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara serta soil moisture meter analog XLUX SM300 untuk pengukuran kelembapan tanah. Adapun aspek yang perlu diperhatikan yaitu:

- Jangkauan jaringan dan penyebab penurunan sinyal
- Stabilitas koneksi berdasarkan persentase paket data yang hilang
- Akurasi sensor dibandingkan alat ukur standar

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

PBerdasarkan hasil pengujian, sistem Wireless Sensor Network (WSN) yang dikembangkan Berdasarkan hasil pengujian, sistem Wireless Sensor Network (WSN) yang dikembangkan mampu menjangkau komunikasi hingga jarak maksimal 120 meter pada area terbuka tanpa mengalami gangguan

koneksi yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa modul XBee yang digunakan memiliki kemampuan transmisi yang cukup andal untuk diterapkan pada lingkungan persawahan dengan kondisi terbuka. Jangkauan ini memungkinkan penempatan node sensor pada area lahan yang relatif luas tanpa memerlukan penambahan repeater atau node perantara.

Namun pada daerah yang memiliki kendala fisik seperti pepohonan dan bangunan, jangkauan jaringan efektif mengalami penurunan hingga sekitar 80 meter. Penurunan tersebut disebabkan oleh terjadinya redaman sinyal akibat penghalang fisik yang mengurangi kekuatan transmisi gelombang radio, dengan penurunan kekuatan sinyal mencapai sekitar 30%. Temuan ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja komunikasi nirkabel, sehingga perencanaan penempatan node sensor menjadi faktor penting untuk menjaga kinerja sistem WSN tetap optimal. Adapun hasil pengujian ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Hasil Pengujian

No	Parameter Uji	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Jangkauan Jaringan (Area Terbuka)	120 m	Tanpa hambatan fisik
2	Jangkauan jaringan (dengan hambatan)	80 m	Sinyal redaman $\pm 30\%$
3	Kehilangan paket rata-rata	3%	Stabil untuk <i>Real-Time</i>
4	Deviasi sensor suhu	$\pm 1^\circ\text{C}$	HTC-1
5	Sensor deviasi kelembaban udara	$\pm 2\%$ RH	HTC-1
6	Sensor kelembaban tanah	$\pm 3\%$	XLUX SM300

Hasil pengujian stabilitas koneksi menunjukkan bahwa sistem WSN mampu mempertahankan komunikasi data dengan tingkat resolusi yang baik selama periode pemantauan. Rata-rata kehilangan paket data (packet loss) yang tercatat berada pada kisaran 3%, yang mengindikasikan bahwa proses pengiriman data antar node sensor dan node pusat berlangsung relatif stabil. Dalam kondisi cuaca normal, seluruh node sensor mampu mengirimkan data secara konsisten sesuai interval waktu yang telah ditentukan.

Stabilitas koneksi ini didukung oleh penggunaan protokol ZigBee pada modul XBee yang dirancang untuk komunikasi nirkabel jarak menengah dengan konsumsi daya rendah. Meskipun pada kondisi tertentu, seperti meningkatnya jarak atau adanya hambatan fisik, kualitas koneksi dapat mengalami penurunan sementara, sistem secara umum tetap mampu menjaga kontinuitas pengiriman data. Dengan tingkat stabilitas tersebut, sistem WSN dinilai telah memenuhi kebutuhan monitoring lingkungan pertanian secara periodik dan real-time.

Evaluasi akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pada sistem WSN dengan alat ukur standar sebagai pembanding. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor suhu memiliki deviasi sebesar $\pm 1^\circ\text{C}$, sensor kelembaban udara memiliki deviasi sekitar $\pm 2\%$ RH, serta sensor kelembaban tanah menunjukkan deviasi sekitar $\pm 3\%$ dibandingkan alat referensi. Nilai deviasi tersebut masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan lingkungan pertanian.

Selain itu, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan pembacaan yang stabil dan konsisten selama periode pengujian. Sensor kelembaban tanah secara khusus mampu mencatat perubahan kadar air tanah yang terjadi akibat aktivitas irigasi dan perubahan kondisi lingkungan. Konsistensi data ini menunjukkan bahwa sistem sensor yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi lahan secara akurat, sehingga layak digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan irigasi dan pemantauan pertumbuhan tanaman.

3.1. Kinerja dan Efektivitas Sistem WSN dalam Monitoring Lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WSN mampu berfungsi dengan baik dalam melakukan pemantauan kondisi lingkungan lahan pertanian secara real-time. Data yang diperoleh dari sensor—meliputi kelembaban tanah, temperatur, dan kelembaban udara—terbukti memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk mendukung praktik pertanian presisi. Kelembaban tanah yang terpantau secara berkelanjutan memungkinkan petani menentukan waktu irigasi yang paling efisien, sehingga penggunaan air dapat dioptimalkan dan risiko kekeringan atau kelebihan air dapat diminimalkan. Pola fluktuasi yang

terekam juga memperlihatkan hubungan langsung antara kegiatan irigasi dan kondisi kelembaban tanah, sehingga memberikan gambaran yang jelas mengenai respons lahan terhadap perlakuan tertentu.

Sistem juga menunjukkan stabilitas koneksi yang relatif baik, ditandai dengan rendahnya persentase paket data yang hilang. Jarak jangkauan yang dapat mencapai 120 meter pada area terbuka menjadi bukti bahwa sistem dapat digunakan pada lahan luas, meskipun tetap dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Secara keseluruhan, performa ini menunjukkan bahwa WSN merupakan solusi yang efektif dalam meningkatkan kualitas monitoring lahan pertanian dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat berdasarkan data aktual.

3.2. Faktor Pembatas dan Peluang Pengembangan Sistem

Meskipun sistem menunjukkan performa yang baik, terdapat sejumlah faktor yang membatasi kinerjanya. Hambatan fisik seperti pepohonan dan bangunan terbukti mengurangi kekuatan sinyal hingga 30%, sehingga penempatan node perlu direncanakan secara strategis. Cuaca ekstrem juga berpotensi mengganggu transmisi data serta memengaruhi sensor yang tidak memiliki perlindungan yang memadai. Keterbatasan daya pada node yang menggunakan baterai konvensional menjadi tantangan tersendiri dalam operasional jangka panjang. Penggunaan energi terbarukan seperti panel surya serta manajemen daya berbasis sleep mode dapat menjadi solusi untuk meningkatkan masa operasional.

Interferensi dari perangkat nirkabel lain merupakan faktor lain yang perlu diperhitungkan. Pemilihan frekuensi dan konfigurasi XBee yang tepat akan sangat berpengaruh terhadap kualitas komunikasi jaringan. Di sisi lain, sistem ini memiliki peluang besar untuk dikembangkan lebih lanjut. Integrasi dengan cloud computing memungkinkan akses data jarak jauh melalui perangkat mobile, sementara penambahan sensor-sensor lanjutan seperti sensor pH dan nutrisi tanah dapat memperluas cakupan monitoring. Tidak hanya itu, penggabungan sistem dengan aktuator otomatis seperti pompa irigasi serta penerapan algoritma kecerdasan buatan dapat mengubah WSN menjadi sistem otomatis yang mampu melakukan tindakan adaptif secara mandiri. Peluang pengembangan ini membuka jalan bagi penerapan pertanian presisi yang lebih komprehensif dan efisien.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem Wireless Sensor Network (WSN) berbasis Arduino dan XBee yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan lahan persawahan di Kabupaten Gowa secara real-time dan berkelanjutan. Kinerja sistem menunjukkan hasil yang baik, ditunjukkan oleh jangkauan komunikasi yang dapat mencapai 120 meter pada area terbuka serta tingkat stabilitas koneksi yang tinggi dengan rata-rata kehilangan paket data sebesar 3% , sehingga sistem dinilai andal untuk diterapkan pada lingkungan pertanian.

Dari sisi akurasi, sensor temperatur, kelembaban udara, dan kelembaban tanah yang digunakan dalam sistem menunjukkan tingkat deviasi yang relatif rendah dan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan lingkungan pertanian. Sensor mampu memberikan data yang konsisten dan representatif dalam menggambarkan kondisi lahan, sehingga informasi yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan terkait pengelolaan irigasi dan pemantauan kondisi tanaman.

Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sistem, antara lain hambatan fisik di lapangan, kondisi cuaca, keterbatasan daya pada node sensor, serta potensi interferensi sinyal nirkabel. Meskipun demikian, secara keseluruhan hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WSN yang dikembangkan layak dan efektif digunakan sebagai solusi pemantauan lahan persawahan serta memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut dalam mendukung penerapan pertanian presisi di Kabupaten Gowa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Natalia and T. Sutabri, “Rancangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis IoT untuk Pertanian Padi,” *Switch: Jurnal Sains dan Teknologi Informasi*, vol. 2, no. 6, 2025, doi:10.62951/switch.v2i6.282.
- [2] G. Ou, “Design and experiment of an Internet of Things-based wireless soil monitoring system,” *Agriculture*, vol. 15, no. 5, 2025.

- [3] N. P. S. and S. Baulkani, “A review of wireless sensor networks in agriculture,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 2022.
- [4] N. Reagan, “Smart water management for precision irrigation using real-time sensor networks,” *International Journal of Irrigation Water Management (IJIWM)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [5] A. Abdollahi, K. Rejeb, A. Rejeb, M. M. Mostafa, dan S. Zailani, “Wireless Sensor Networks in Agriculture: Insights from Bibliometric Analysis,” *Sustainability*, vol. 13, no. 21, p. 12011, 2021.
- [6] P. Musa, H. Sugeru, and E. P. Wibowo, “Wireless sensor networks for precision agriculture: A review of NPK sensor implementations,” *Sensors*, vol. 24, no. 1, 2024
- [7] N. Ambarwati, “Analisis implementasi wireless sensor network (WSN) pada smart agriculture untuk pemantauan tanaman: Kajian literatur,” *Karapan Network Journal*, 2025.
- [8] Y. Liu, “Design and implementation of smart agriculture system based on wireless sensor networks,” *Advances in Computer, Signals and Systems*, vol. 7, pp. 105–112, 2023.
- [9] FH El-Fouly, M. Kachout, RA Ramadan, AJ Alzahrani, JS Alshudukhi, dan IM Alseadoon, “Routing Hemat Energi dan Andal untuk Komunikasi Real-time dalam Jaringan Sensor Nirkabel,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 3, hlm. 13959–13966, Juni 2024.
- [10] M. A. Rahman, M. R. Islam, and M. M. Hasan, “Arduino and XBee based wireless sensor network for smart agriculture,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 350–356, 2021.
- [11] T. Kamila A.S., R. Solihin, N. Novita Sari, et al., “Penerapan wireless sensor network untuk aplikasi pemantauan lahan pertanian berbasis Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266,” in *Proc. The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung, Indonesia, 2021.
- [12] I. P. Sari, A. Novita, A.-K. Al-Khowarizmi, F. Ramadhani, dan A. Satria, “Pemanfaatan Internet of Things (IoT) pada Bidang Pertanian Menggunakan Arduino UnoR3,” *Blend Sains Jurnal Teknik*, vol. 2, no. 4, pp. 337–343, Jun. 2024.
- [13] R. Tang, N. K. Aridas, dan M. S. A. Talip, “Design of Wireless Sensor Network for Agricultural Greenhouse Based on Improved Zigbee Protocol,” *Agriculture*, vol. 13, no. 8, p. 1518, Jul. 2023.
- [14] K. F. Haque, A. Abdelgawad, dan K. Yelamarthi, “Comprehensive performance analysis of ZigBee communication: An experimental approach with XBee S2C module,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3245, Apr. 2022, doi:10.3390/s22093245.
- [15] A. Rizwan, M. A. Shah, dan S. Ahmed, “Design and Implementation of ZigBee Based Wireless Sensor Network for Precision Agriculture Monitoring,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 111234–111245, 2023.