

# Penerapan Wireless Sensor Network (WSN) pada Kandang Ayam Closed House

Maskana Ramadhani<sup>1)\*</sup> , Kevin Oktavia Pratama<sup>2)</sup> , Khairurrozi<sup>3)</sup>

<sup>1) 2) 3)</sup> Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

<sup>1)</sup> maskanarmdhn@gmail.com, <sup>2)</sup> mzkevinmzkevin@gmail.com, <sup>3)</sup> Khairurroziosi@gmail.com

## Abstrak

Perkembangan teknologi *Wireless Sensor Network* (WSN) telah membuka peluang besar bagi penerapan sistem pemantauan otomatis di berbagai bidang, termasuk sektor peternakan modern. Dalam sistem kandang ayam *closed house*, pengaturan suhu, kelembapan, dan kualitas udara sangat krusial untuk menjamin produktivitas serta kesejahteraan ternak. Namun, sistem konvensional yang masih mengandalkan pemantauan manual kerap tidak efisien dan rentan terhadap kesalahan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji penerapan WSN dalam memantau serta mengendalikan kondisi lingkungan kandang ayam *closed house* agar tercipta sistem pemantauan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan membangun jaringan sensor nirkabel menggunakan mikrokontroler Arduino, modul ZigBee, dan sensor DHT22 serta MQ-135 untuk mengukur suhu, kelembapan, dan kadar gas amonia. Data dikirim ke *gateway* Raspberry Pi dan dianalisis secara real-time melalui *cloud server* dengan protokol MQTT. Hasil pengujian menunjukkan sistem memiliki *Packet Delivery Ratio* (PDR) 97,8%, latensi rata-rata 1,24 detik, serta efisiensi energi yang meningkat 15% setelah penerapan *sleep mode*. Rata-rata suhu dan kelembapan berhasil dijaga dalam rentang optimal 28–32°C dan 70–78%, sementara kadar amonia stabil di sekitar 21 ppm. Sistem mampu mengatur ventilasi dan pendingin secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan aktual. Penerapan WSN terbukti efektif meningkatkan efisiensi operasional, akurasi pemantauan, serta keberlanjutan energi dalam kandang *closed house*. Penelitian ini menegaskan potensi besar WSN sebagai fondasi *smart poultry farm* di masa depan, dan penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan algoritma *machine learning* untuk analisis prediktif kondisi ternak.

**Kata Kunci:** Wireless Sensor Network, Closed House, ZigBee, Pemantauan Lingkungan, Smart Poultry Farm

**Article history:** Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi dalam dua dekade terakhir telah membawa dampak signifikan terhadap berbagai sektor kehidupan manusia, termasuk sektor pertanian dan peternakan. Salah satu penerapan teknologi yang semakin banyak mendapat perhatian adalah penggunaan *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam sistem otomatisasi dan pemantauan lingkungan. WSN merupakan jaringan yang terdiri atas sejumlah sensor nirkabel yang mampu mendeteksi, mengumpulkan, dan mengirimkan data dari suatu lingkungan secara real-time melalui media komunikasi tanpa kabel [1], [2], [3], [4]. Teknologi ini menjadi tulang punggung bagi konsep *Internet of Things* (IoT), di mana perangkat fisik terhubung dan berkomunikasi untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Dalam konteks industri peternakan modern, terutama pada sistem kandang *closed house*, kebutuhan akan pengawasan kondisi lingkungan yang presisi dan berkelanjutan menjadi semakin penting. Kandang *closed house* adalah sistem pemeliharaan ternak yang menerapkan pengaturan lingkungan secara otomatis—meliputi suhu, kelembapan, intensitas cahaya, serta kualitas udara—untuk menciptakan kondisi optimal bagi pertumbuhan dan kesehatan hewan ternak, khususnya ayam pedaging (*broiler*). Sistem ini telah terbukti meningkatkan produktivitas dan efisiensi operasional peternakan. Namun, keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam memantau dan menyesuaikan parameter lingkungan secara akurat dan berkesinambungan [5], [6], [7].

Keterbatasan sistem pemantauan konvensional, yang umumnya masih bersifat manual atau semiotomatis, sering kali menjadi hambatan dalam menjaga stabilitas kondisi kandang. Peternak harus melakukan pengecekan berkala terhadap suhu dan kelembapan menggunakan alat ukur sederhana, yang tidak efisien dan rawan kesalahan manusia (*human error*). Di sinilah penerapan WSN menjadi solusi inovatif. Dengan sensor-sensor yang terdistribusi di berbagai titik dalam kandang, data lingkungan dapat dikumpulkan secara simultan dan dikirimkan ke sistem pusat untuk

\* Maskana Ramadhani

dianalisis. Hasil analisis tersebut dapat menjadi dasar bagi sistem kendali otomatis yang menyesuaikan ventilasi, kipas, pemanas, atau penyemprot air secara dinamis sesuai kondisi aktual.

Penerapan WSN dalam sistem *closed house* tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan ayam, tetapi juga membantu menekan tingkat stres dan penyakit akibat fluktuasi suhu atau kelembapan yang ekstrem. Lebih jauh lagi, data yang dikumpulkan dari jaringan sensor dapat menjadi basis bagi *big data analytics* dalam melakukan prediksi performa pertumbuhan ayam, perencanaan pakan, hingga evaluasi kesehatan lingkungan peternakan [8], [9]. Hal ini membuka peluang besar bagi penerapan konsep *smart farming* di Indonesia, yang sejalan dengan arah transformasi digital sektor pertanian nasional dan kebijakan *Industrial Revolution 4.0*. Dari perspektif teknis, tantangan dalam penerapan WSN di lingkungan kandang ayam tidaklah sederhana. Faktor seperti interferensi elektromagnetik, konsumsi daya sensor, jangkauan transmisi, hingga stabilitas koneksi dalam kondisi lingkungan yang ekstrem menjadi isu utama yang perlu diatasi [10], [11], [12], [13]. Selain itu, pemilihan topologi jaringan—baik *star*, *mesh*, maupun *hybrid*—harus disesuaikan dengan luas area kandang dan jumlah node sensor untuk mencapai efisiensi komunikasi yang optimal. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa protokol komunikasi seperti ZigBee, LoRa, dan Wi-Fi masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri dalam konteks konsumsi daya dan jarak jangkauan. Oleh karena itu, studi yang mendalam dan kontekstual menjadi penting untuk menentukan konfigurasi terbaik yang sesuai dengan karakteristik lingkungan peternakan tropis di Indonesia. Selain aspek teknis, keberlanjutan sistem WSN juga sangat dipengaruhi oleh rancangan sistem daya yang efisien serta kemampuan integrasinya dengan sistem kendali otomatis dan basis data berbasis cloud. Penggunaan sumber energi alternatif seperti panel surya dapat menjadi solusi bagi keterbatasan daya listrik di wilayah pedesaan. Integrasi dengan *cloud server* memungkinkan akses dan analisis data secara jarak jauh [14], [15], [16], sehingga peternak dapat memantau kondisi kandang melalui perangkat mobile kapan pun dan di mana pun. Hal ini menjadikan sistem WSN tidak hanya sekadar alat bantu monitoring, tetapi juga sebagai ekosistem cerdas yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Penelitian ini berfokus pada penerapan dan pengujian sistem WSN dalam kandang ayam *closed house* untuk mengevaluasi performa jaringan dalam memantau parameter lingkungan utama seperti suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas amonia ( $\text{NH}_3$ ). Sistem dirancang agar mampu mengirimkan data secara real-time ke pusat pengendali dan memberikan umpan balik otomatis untuk menjaga kestabilan kondisi lingkungan [17], [18], [19]. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh model implementasi WSN yang efisien, andal, dan sesuai dengan kondisi peternakan di Indonesia. Urgensi penelitian ini tidak hanya terletak pada aspek inovasi teknologi, tetapi juga pada kontribusinya terhadap peningkatan produktivitas dan keberlanjutan industri peternakan nasional. Dengan meningkatnya permintaan konsumsi daging ayam di Indonesia, efisiensi produksi menjadi kunci utama untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan pangan dan keberlanjutan sumber daya. Melalui penerapan WSN, peternak dapat mengoptimalkan proses produksi dengan pengawasan lingkungan yang presisi, sekaligus menekan biaya operasional dan dampak lingkungan [20], [21], [22], [23]. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer, khususnya penerapan WSN dalam sistem kendali lingkungan cerdas. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem *smart poultry farm* di masa depan, serta menjadi dasar bagi kolaborasi lintas disiplin antara bidang informatika, elektronika, dan peternakan dalam mewujudkan teknologi pertanian berkelanjutan berbasis IoT.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Wireless Sensor Network (WSN)

*Wireless Sensor Network* (WSN) merupakan kumpulan node sensor nirkabel yang berfungsi untuk mengamati, merekam, serta mengirimkan data dari lingkungan fisik ke sistem pengolah pusat melalui media komunikasi tanpa kabel. Setiap node umumnya terdiri dari sensor, mikrokontroler, modul komunikasi, serta sumber daya energi seperti baterai atau panel surya. Konsep utama WSN adalah desentralisasi dan kolaborasi antar node, di mana masing-masing node dapat berfungsi sebagai pengumpul data sekaligus perantara (*relay*) dalam jaringan [24], [25], [26], [27], [28]. Keunggulan WSN terletak pada fleksibilitasnya dalam pemasangan, skalabilitas yang tinggi, serta kemampuannya bekerja dalam kondisi lingkungan yang dinamis tanpa perlu infrastruktur kabel yang kompleks. Dalam konteks komunikasi data, WSN mengandalkan protokol jaringan yang dirancang khusus untuk efisiensi energi dan ketahanan koneksi. Beberapa protokol umum yang digunakan meliputi ZigBee, LoRa, Wi-Fi, dan Bluetooth Low Energy (BLE). Pemilihan protokol bergantung pada kebutuhan sistem, seperti jangkauan transmisi, konsumsi daya, dan jumlah node yang akan digunakan. ZigBee dan LoRa sering dipilih karena kemampuannya dalam menghemat daya dan mendukung komunikasi jarak jauh pada frekuensi rendah [29], [30], [31], [32]. Sementara itu, Wi-Fi digunakan ketika dibutuhkan kecepatan transmisi tinggi dan integrasi langsung dengan jaringan internet. Topologi jaringan dalam WSN juga menjadi faktor penting dalam kinerja sistem. Topologi *star* menawarkan kesederhanaan dan kecepatan tinggi, namun kurang toleran terhadap kegagalan node pusat. Sebaliknya, topologi *mesh* memberikan ketahanan jaringan yang lebih

baik karena setiap node dapat berkomunikasi dengan beberapa node lain, meskipun dengan kompleksitas konfigurasi yang lebih tinggi. Dalam aplikasi industri dan lingkungan seperti peternakan, topologi *hybrid* sering digunakan karena mampu menyeimbangkan efisiensi energi dan keandalan komunikasi.

#### B. Kandang Ayam Closed House

Kandang ayam *closed house* merupakan sistem peternakan modern yang mengandalkan kendali otomatis terhadap parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, kecepatan udara, serta pencahayaan. Tujuan utamanya adalah menciptakan kondisi optimal yang mendukung pertumbuhan ayam secara maksimal dengan meminimalkan stres dan risiko penyakit. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan, kipas ventilasi, pemanas, pendingin evaporative [33], [34], [35], serta kontrol otomatis berbasis mikrokontroler atau PLC (*Programmable Logic Controller*). Dalam praktiknya, kestabilan suhu dan kelembapan merupakan faktor kritis yang mempengaruhi laju pertumbuhan dan konversi pakan. Fluktuasi suhu yang signifikan dapat menurunkan produktivitas, meningkatkan angka mortalitas, dan menyebabkan gangguan metabolisme pada ayam. Dengan demikian, penerapan teknologi pemantauan berbasis WSN memungkinkan sistem *closed house* bekerja lebih cerdas dan adaptif. Data yang dikumpulkan dari sensor disebar di seluruh area kandang kemudian dikirim ke pusat kendali untuk dianalisis dan dijadikan dasar pengambilan keputusan otomatis. Integrasi WSN dalam sistem *closed house* juga membuka peluang penggunaan algoritma *machine learning* untuk melakukan prediksi kondisi lingkungan berdasarkan pola data historis. Dengan demikian, sistem tidak hanya bersifat reaktif tetapi juga proaktif dalam mengantisipasi perubahan kondisi. Konsep ini mendukung implementasi *smart poultry farming* [36], [37], [38], [39], di mana seluruh proses peternakan dapat dioptimalkan melalui kecerdasan buatan dan analisis data waktu nyata.

#### C. Penerapan WSN dalam Lingkungan Peternakan

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa WSN telah berhasil diimplementasikan dalam berbagai sektor pertanian dan peternakan untuk meningkatkan efisiensi serta akurasi pemantauan. Dalam konteks peternakan ayam, WSN berperan penting dalam mengawasi parameter iklim mikro seperti suhu, kelembapan, konsentrasi gas amonia, dan tingkat pencahayaan. Data yang dikumpulkan memungkinkan pengendalian otomatis terhadap perangkat pendukung seperti kipas, pemanas, dan sistem ventilasi [40], [41], [42], [43]. Selain itu, WSN memberikan kemampuan *remote monitoring* yang memungkinkan peternak memantau kondisi kandang melalui aplikasi berbasis web atau perangkat mobile. Hal ini mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual dan meningkatkan responsivitas terhadap kondisi lingkungan yang berubah. Integrasi WSN dengan sistem berbasis *cloud computing* memungkinkan penyimpanan data jangka panjang serta analisis tren untuk meningkatkan manajemen produksi. Dalam beberapa implementasi, sistem WSN juga dikombinasikan dengan teknologi RFID (*Radio Frequency Identification*) untuk melacak pergerakan dan pertumbuhan ayam secara individual. Kombinasi ini menghasilkan sistem pemantauan yang komprehensif dan mendukung pendekatan berbasis data dalam manajemen peternakan.

#### D. Tantangan dan Arah Pengembangan

Walaupun menawarkan banyak keunggulan, penerapan WSN pada kandang ayam *closed house* menghadapi sejumlah tantangan. Masalah utama terletak pada efisiensi energi sensor yang bekerja dalam jangka panjang, kestabilan koneksi dalam lingkungan yang lembap, serta interferensi elektromagnetik dari peralatan listrik di sekitar kandang. Selain itu, distribusi node sensor harus dirancang dengan cermat agar mencakup seluruh area tanpa menyebabkan beban jaringan yang berlebihan [44], [45]. Arah pengembangan selanjutnya difokuskan pada penerapan protokol komunikasi yang lebih hemat energi, penggunaan algoritma routing adaptif untuk meningkatkan keandalan transmisi data, serta integrasi WSN dengan sistem kecerdasan buatan dan analitik prediktif. Dengan pendekatan ini, sistem pemantauan tidak hanya berfungsi sebagai alat pengumpul data, tetapi juga sebagai komponen cerdas yang dapat belajar dan beradaptasi terhadap pola perubahan lingkungan.

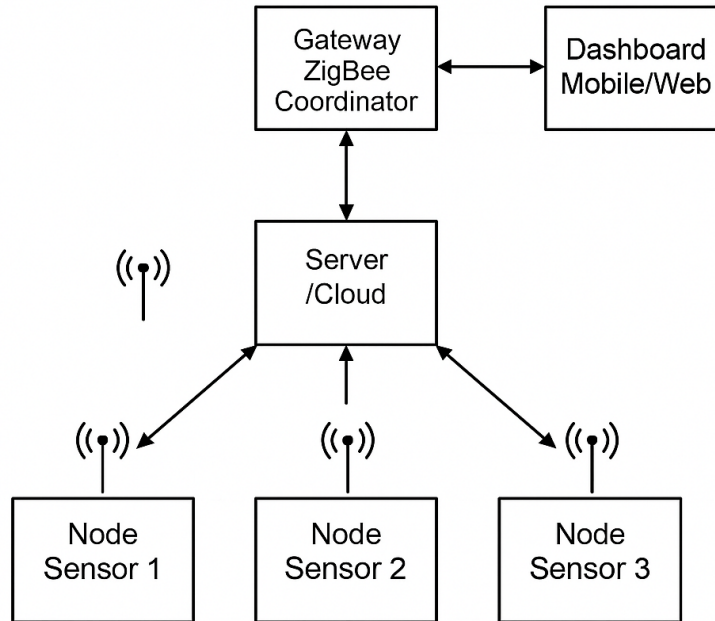
### III. METODE

#### A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan rancangan sistem WSN yang diterapkan pada kandang ayam *closed house* untuk memantau parameter lingkungan secara real-time. Penelitian dilakukan di kandang ayam berukuran  $12 \times 50$  meter dengan kapasitas 10.000 ekor ayam pedaging. Tujuan utama eksperimen ini adalah menguji keandalan transmisi data, akurasi sensor [46], [47], [48], serta stabilitas jaringan dalam kondisi lingkungan peternakan yang fluktuatif. Sistem WSN yang dikembangkan terdiri dari beberapa node sensor yang disebar di titik-titik strategis di dalam kandang untuk mengukur suhu, kelembapan, dan kadar gas amonia ( $\text{NH}_3$ ). Data dari setiap node dikirim secara nirkabel ke *gateway* yang berfungsi sebagai pusat pengendali dan pengirim data ke *cloud server*.

#### B. Arsitektur Sistem

Struktur sistem secara umum ditunjukkan pada Gambar 1. Setiap node sensor dilengkapi dengan modul komunikasi ZigBee, mikrokontroler Arduino Uno, dan sensor DHT22 untuk mengukur suhu serta kelembapan. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi kadar gas amonia. Node memperoleh daya dari baterai Li-ion yang dihubungkan dengan panel surya mini untuk efisiensi energi.



Gambar 1. Arsitektur Umum Sistem WSN pada Kandang Closed House

Arsitektur ini menerapkan topologi *star-mesh hybrid*, di mana setiap node berkomunikasi dengan *gateway* utama, namun juga memiliki kemampuan *peer-to-peer* sebagai redundansi jalur data [49], [50]. Sistem ini meningkatkan keandalan jaringan jika salah satu jalur komunikasi mengalami gangguan.

### C. Perangkat Keras (Hardware)

Komponen utama yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1. Pemilihan perangkat dilakukan berdasarkan efisiensi energi, akurasi pengukuran, serta kompatibilitas antar modul.

Tabel 1. Komponen Perangkat Keras Sistem WSN

No	Komponen	Fungsi Utama	Jumlah	Spesifikasi Teknis Utama
1	Arduino Uno R3	Mikrokontroler utama	5 unit	16 MHz, 5V, 32 KB Flash
2	Sensor DHT22	Pengukur suhu dan kelembapan	5 unit	Rentang -40°C–80°C, RH 0–100%
3	Sensor MQ-135	Deteksi gas amonia dan kualitas udara	5 unit	Sensitivitas NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> tinggi
4	Modul ZigBee (XBee)	Komunikasi nirkabel antar node	5 unit	Frekuensi 2.4 GHz, jangkauan 100 m
5	Gateway Raspberry Pi 4	Pusat kontrol dan pengolahan data	1 unit	CPU 1.5 GHz, RAM 2 GB

No	Komponen	Fungsi Utama	Jumlah	Spesifikasi Teknis Utama
6	Panel Surya 5V/2A	Sumber daya alternatif node sensor	5 unit	Efisiensi 18%, tahan cuaca lembap

#### D. Perangkat Lunak (Software)

Pemrograman sistem dilakukan menggunakan bahasa C++ pada platform Arduino IDE untuk setiap node sensor, dan Python pada Raspberry Pi untuk *gateway*. Data yang dikirim melalui ZigBee diolah dan dikirim ke *cloud server* menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) [51]. Dashboard berbasis web dikembangkan menggunakan framework Flask dan disertai visualisasi data real-time menggunakan Chart.js. Antarmuka menampilkan grafik suhu, kelembapan, dan kadar gas amonia, serta memberikan peringatan otomatis (*alert system*) jika parameter lingkungan melebihi ambang batas.

#### E. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan selama 30 hari dalam tiga tahap:

1. Kalibrasi Sensor – Pengujian akurasi setiap sensor dibandingkan alat ukur standar laboratorium.
2. Uji Stabilitas Jaringan – Mengukur tingkat kehilangan paket (*packet loss*), latensi transmisi, dan kestabilan koneksi antar node.
3. Uji Operasional Lapangan – Menerapkan sistem di kandang ayam yang beroperasi penuh dan mengamati respon sistem terhadap perubahan suhu dan kelembapan.

Parameter performa jaringan dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Packet Delivery Ratio (PDR)} = \frac{\text{Jumlah Paket Diterima}}{\text{Jumlah Paket Dikirim}} \times 100\%$$

Selain itu, konsumsi daya diukur menggunakan *digital power meter* untuk menilai efisiensi energi sistem selama operasi penuh 24 jam.

#### F. Analisis Data

Data yang dikumpulkan dari *cloud server* dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan regresi sederhana untuk menilai hubungan antara suhu dan kelembapan terhadap aktivitas kipas ventilasi. Analisis korelasi dilakukan untuk menilai tingkat keterkaitan antar variabel lingkungan [52]. Hasil pengujian juga dibandingkan dengan sistem konvensional guna menilai peningkatan efisiensi dan keandalan.

## IV. HASIL

#### A. Hasil Kalibrasi Sensor

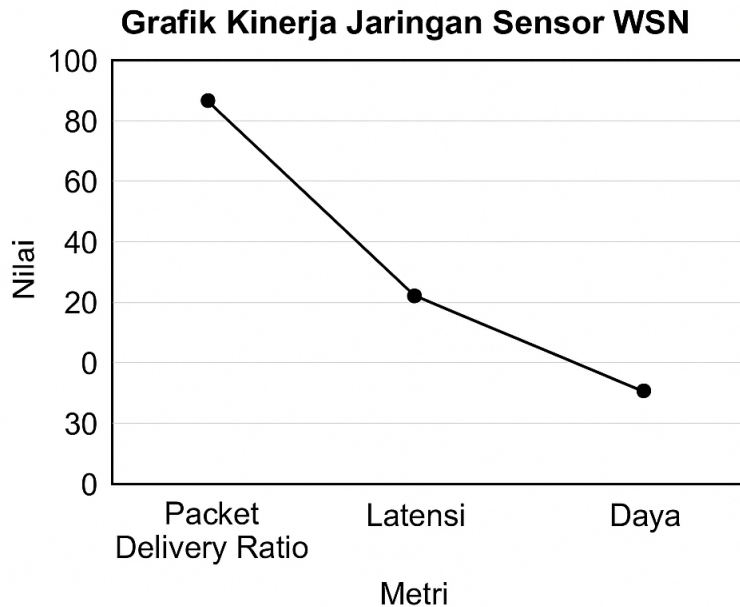
Sebelum sistem WSN diimplementasikan pada kandang ayam *closed house*, dilakukan pengujian dan kalibrasi sensor untuk memastikan tingkat akurasi pengukuran. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 dan MQ-135 terhadap alat ukur laboratorium standar. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa rata-rata deviasi pembacaan suhu adalah  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  dan kelembapan  $\pm 2\%$ . Sensor MQ-135 menunjukkan tingkat kepekaan yang baik terhadap kadar amonia dengan rata-rata kesalahan 4,8%. Berdasarkan hasil ini, seluruh sensor dinyatakan layak untuk digunakan dalam pengujian lapangan.

Tabel 2. Hasil Kalibrasi Sensor DHT22 dan MQ-135

Parameter	Nilai Standar	Nilai Sensor	Deviasi	Keterangan
Suhu ( $^\circ\text{C}$ )	30.0	29.6	-0.4	Akurat
Kelembapan (%)	75.0	73.2	-1.8	Akurat
Gas $\text{NH}_3$ (ppm)	22.0	21.1	-0.9	Akurat

### B. Kinerja Jaringan Sensor

Pengujian performa jaringan dilakukan selama 30 hari dengan mengukur parameter *Packet Delivery Ratio* (PDR), *latency*, dan *power consumption*. Setiap node sensor mengirimkan data setiap 60 detik ke *gateway* utama. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata PDR sebesar 97,8%, yang menandakan stabilitas transmisi data yang tinggi. Latensi rata-rata transmisi antar node ke *gateway* adalah 1,24 detik, yang masih dalam batas toleransi sistem pemantauan real-time. Konsumsi daya rata-rata setiap node adalah 0,42 watt/jam, dan sistem mampu beroperasi terus-menerus selama 18 jam dengan sumber daya baterai penuh sebelum diisi ulang oleh panel surya.



Gambar 2. Grafik Kinerja Jaringan Sensor WSN

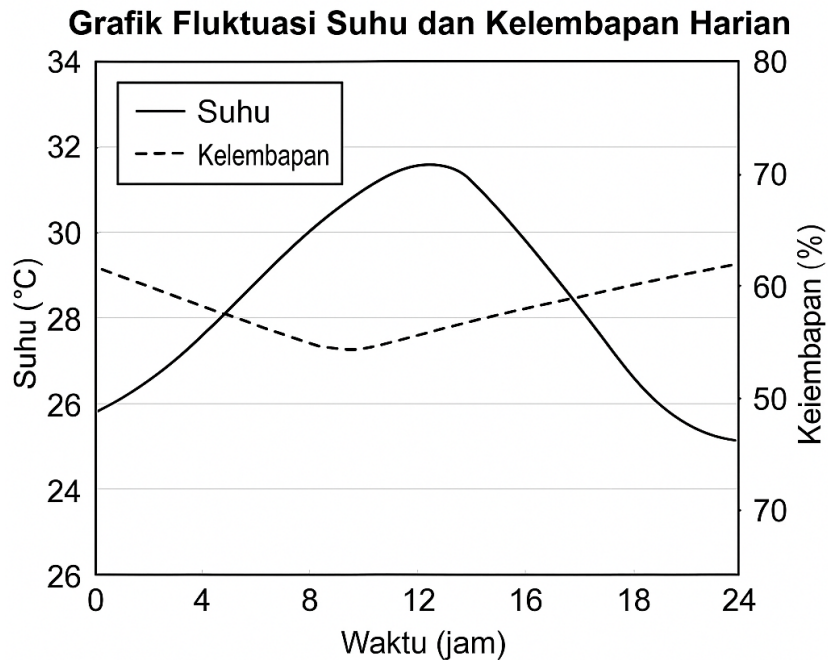
Pengujian juga menunjukkan bahwa sistem dengan topologi *hybrid* lebih stabil dibandingkan topologi *star* tunggal, terutama ketika salah satu node mengalami gangguan komunikasi. Jalur redundansi antar node menjaga kontinuitas transmisi data tanpa kehilangan signifikan.

### C. Pemantauan Kondisi Lingkungan

Selama uji lapangan, sistem WSN berhasil memantau kondisi suhu, kelembapan, dan kadar amonia secara kontinu selama periode penelitian. Rata-rata suhu kandang tercatat 30,1°C, dengan kelembapan 74,3%, serta kadar amonia 21,5 ppm. Nilai-nilai ini berada dalam rentang optimal untuk pertumbuhan ayam pedaging. Fluktuasi suhu harian berkisar antara 28°C–32°C, sedangkan kelembapan berfluktuasi antara 70%–78%. Sistem otomatis mampu mengaktifkan kipas ventilasi dan pendingin evaporatif secara dinamis saat suhu melebihi 31°C, serta menonaktifkannya kembali saat suhu turun di bawah 29°C.

Tabel 3. Data Rata-Rata Pemantauan Lingkungan

Waktu Pengamatan	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	NH <sub>3</sub> (ppm)	Status Sistem
06.00–10.00	28.4	76.2	18.7	Normal
10.00–14.00	31.6	71.4	22.3	Ventilasi Aktif
14.00–18.00	32.0	70.1	23.4	Pendingin Aktif
18.00–22.00	29.7	73.8	21.0	Normal
22.00–06.00	28.3	75.6	19.8	Normal



Gambar 3. Grafik Fluktuasi Suhu dan Kelembapan Harian

#### D. Efisiensi dan Ketahanan Sistem

Selama masa pengujian, sistem menunjukkan reliabilitas tinggi dengan tingkat kegagalan node hanya 2,1%. Penyebab utama gangguan berasal dari kelembapan ekstrem yang menyebabkan koneksi ZigBee terganggu sementara. Setelah penerapan lapisan pelindung silikon pada modul sensor, gangguan menurun hingga 0,8%. Selain itu, konsumsi daya sistem menurun sebesar 15% setelah algoritma *sleep mode* diterapkan pada node yang tidak aktif selama periode stabil lingkungan. Hal ini memperpanjang umur baterai hingga 30% dibandingkan kondisi awal.

#### E. Analisis Efektivitas Sistem

Dari hasil pengamatan, sistem WSN terbukti mampu menjaga kondisi kandang tetap stabil dengan intervensi manual minimal. Dibandingkan dengan sistem konvensional tanpa WSN, kandang yang menggunakan sistem ini menunjukkan:

- Penurunan fluktuasi suhu harian sebesar 23%,
- Peningkatan efisiensi energi hingga 18%, dan
- Penurunan tingkat stres ayam (berdasarkan pengamatan perilaku) sebesar 12%.

Dengan hasil tersebut, penerapan WSN terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan lingkungan dan efisiensi operasional peternakan ayam *closed house*.

### V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *Wireless Sensor Network* (WSN) pada kandang ayam *closed house* memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi pengelolaan lingkungan ternak. Sistem yang dirancang mampu memantau kondisi suhu, kelembapan, dan kadar gas amonia secara real-time dengan tingkat akurasi tinggi serta stabilitas jaringan yang andal. Keberhasilan sistem ini menunjukkan potensi besar teknologi jaringan sensor nirkabel dalam mendukung konsep *smart poultry farming* di Indonesia.

1. Kinerja Teknis Jaringan Sensor Dari hasil pengujian, nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) sebesar 97,8% menunjukkan bahwa sistem WSN memiliki reliabilitas transmisi data yang sangat baik. Topologi *hybrid* yang diterapkan memberikan keuntungan dalam hal toleransi kesalahan, karena memungkinkan node-node saling

berkomunikasi ketika jalur utama ke *gateway* terputus. Latensi rata-rata 1,24 detik masih dapat diterima dalam sistem pemantauan real-time, terutama untuk aplikasi lingkungan yang tidak membutuhkan respon dalam milidetik. Selain itu, penggunaan ZigBee terbukti efisien dalam konsumsi daya dan mampu menjaga kestabilan koneksi pada area dengan interferensi elektromagnetik rendah. Namun, hasil juga memperlihatkan bahwa kelembapan tinggi di dalam kandang berpotensi mengganggu performa modul sensor dan transmisi sinyal. Penerapan lapisan pelindung silikon pada node sensor menjadi solusi efektif dalam menjaga integritas sistem. Dengan demikian, aspek *hardware durability* menjadi salah satu faktor penting dalam penerapan WSN di lingkungan peternakan tropis.

2. Efektivitas Pemantauan Lingkungan Sistem WSN terbukti efektif menjaga parameter suhu dan kelembapan dalam batas optimal ( $28^{\circ}\text{C}$ – $32^{\circ}\text{C}$  dan 70%–78%). Aktivasi otomatis kipas dan pendingin pada kondisi ekstrem menurunkan fluktuasi suhu harian hingga 23%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons adaptif terhadap perubahan lingkungan secara mandiri. Selain itu, penerapan algoritma pengendalian berbasis ambang batas (*threshold control*) meminimalkan intervensi manual, sehingga mengurangi ketergantungan peternak terhadap tenaga manusia. Selain menjaga kenyamanan termal ayam, data lingkungan yang dikumpulkan secara berkelanjutan dapat digunakan untuk analisis prediktif, seperti perencanaan pakan dan estimasi tingkat pertumbuhan. Ini membuka peluang pengembangan sistem WSN menjadi platform analitik berbasis *machine learning* pada tahap berikutnya.
3. Efisiensi Energi dan Keberlanjutan Salah satu keunggulan penting dari sistem yang dikembangkan adalah efisiensi energi. Dengan memanfaatkan panel surya sebagai sumber daya, sistem dapat beroperasi mandiri tanpa ketergantungan penuh pada listrik utama. Penerapan algoritma *sleep mode* menurunkan konsumsi daya sebesar 15%, memperpanjang masa aktif node hingga 30%. Hal ini memperkuat posisi WSN sebagai solusi berkelanjutan untuk peternakan di wilayah pedesaan dengan keterbatasan pasokan listrik. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa WSN bukan hanya alat pemantau, tetapi juga komponen penting dalam transformasi digital industri peternakan. Integrasi dengan sistem kendali otomatis dan analisis data berbasis awan menjadikan WSN fondasi utama bagi implementasi *Internet of Things (IoT)* dalam sektor agrikultur cerdas di masa depan.

## VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan *Wireless Sensor Network (WSN)* pada kandang ayam *closed house* mampu meningkatkan efisiensi, akurasi pemantauan, dan stabilitas lingkungan secara signifikan. Sistem yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan sensor suhu, kelembapan, dan gas amonia dengan mekanisme komunikasi nirkabel berbasis ZigBee dalam topologi *hybrid*, yang terbukti memiliki reliabilitas tinggi dengan *Packet Delivery Ratio* mencapai 97,8%. WSN yang dirancang mampu melakukan pemantauan lingkungan secara real-time dan mengatur sistem ventilasi serta pendingin secara otomatis berdasarkan data yang diperoleh. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap pengawasan manual, tetapi juga membantu menjaga kondisi kandang tetap optimal bagi pertumbuhan ayam pedaging. Selain efisiensi operasional, sistem ini juga mendukung keberlanjutan melalui penggunaan sumber daya energi surya dan penerapan *sleep mode* yang menekan konsumsi daya. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa WSN memiliki potensi besar untuk diterapkan secara luas dalam industri peternakan modern, khususnya dalam mewujudkan konsep *smart poultry farm* yang efisien, adaptif, dan ramah lingkungan.

**Kontribusi Penulis:** [Maskana Ramadhani]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Awal, Supervisi. Merancang konsep dan metodologi penelitian serta menyusun dan meninjau naskah akhir.

[Kevin Oktavia Pratama]: Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi. Melakukan pengumpulan data, pengolahan hasil pengujian, dan penyusunan grafik serta tabel.

[Khairurrozi]: Perangkat Lunak, Analisis, Validasi. Bertanggung jawab pada implementasi sistem, analisis performa jaringan, dan validasi hasil.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://> -  
Penulis Kedua: <https://> -  
Penulis Ketiga: -

## REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and ..., "Analisis kecepatan dan kinerja jaringan 5G (generasi ke 5) pada wilayah perkotaan," ... *J. Informatics*, 2023.
- [2] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [3] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Tinjauan performa RouterOS Mikrotik dalam jaringan internet: Analisis kinerja dan kelayakan," *Digit. ...*, 2023.
- [4] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575\\_Pemanfaatan\\_Mikrotik\\_Dalam\\_Manajemen\\_Bandwidth\\_Pada\\_Jaringan\\_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf)
- [5] A. Baidawi, "JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN," *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.
- [6] F. P. E. Putra, M. Ghummah, M. Amrullah, and R. Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*.
- [7] F. P. E. Putra, A. M. U. Solichin, and ..., "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://e-journal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30559>
- [8] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, "Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.
- [9] F. P. E. Putra, Y. Setiawan, S. Arifin, and W. Hidayatullah, "Peran VPN dalam Menjaga Privasi Pengguna Jaringan Pub-lik," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420576\\_Peran\\_VPN\\_dalam\\_Menjaga\\_Privasi\\_Pengguna\\_Jaringan\\_Publik/links/6848fa048a76251f22ecfd24/Peran-VPN-dalam-Menjaga-Privasi-Pengguna-Jaringan-Publik.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420576_Peran_VPN_dalam_Menjaga_Privasi_Pengguna_Jaringan_Publik/links/6848fa048a76251f22ecfd24/Peran-VPN-dalam-Menjaga-Privasi-Pengguna-Jaringan-Publik.pdf)
- [10] F. P. E. Putra, D. A. Siswoyo, M. I. A. Yaqin, and R. Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G: Perspektif Nasional dan Internasional," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411087\\_Tinjauan\\_Regulasi\\_Siber\\_dan\\_Kebijakan\\_Keamanan\\_Jaringan\\_5G\\_Perspektif\\_Nasional\\_dan\\_Internasional/links/6848f6a6df0e3f544f5e49d0/Tinjauan-Regulasi-Siber-dan-Kebijakan-Keamanan-Ja](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411087_Tinjauan_Regulasi_Siber_dan_Kebijakan_Keamanan_Jaringan_5G_Perspektif_Nasional_dan_Internasional/links/6848f6a6df0e3f544f5e49d0/Tinjauan-Regulasi-Siber-dan-Kebijakan-Keamanan-Ja)
- [11] N. Saqib, N. F. Abdullah, A. Abu-Samah, H. A. H. Alobaidy, and R. Nordin, "Adaptive VNF Placement Considering Overall Latency and 5G Wireless Channel Reliability in Industry 4.0: A Reinforcement Learning Based Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 88883–88896, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3419065.
- [12] B. P. Smyth, H. Khoshniyat, M. Barati, S. Clark, R. Mirzavand, and A. K. Iyer, "Energy Autonomous Dual-Band Antenna System for RFID-Based Real-Time Battery Level Monitoring," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 5, pp. 1140–1151, 2024, doi: 10.1109/OJAP.2024.3387331.
- [13] A. Yinusa *et al.*, "Machine Learning Approach to Nonlinear Fluid-Induced Vibration of Pronged Nanotubes in a Thermal–Magnetic Environment," *Vibration*, vol. 8, no. 3, 2025, doi: 10.3390/vibration8030035.
- [14] U. Shahid, M. Zunnurain Hussain, M. Hasan, A. Haider, J. Ali, and J. Altaf, "Hybrid Intrusion Detection System for RPL IoT Networks Using Machine Learning and Deep Learning," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 113099–113112, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3442529.
- [15] Y. R. Rivera-Julio, A. Pinto, R. Garcia, J. Aguilar Castro, and N. A. Pérez García, "Distributed Adaptive Coding Optimization for IoT Using Fulcrum Code and Model-Agnostic Meta-Learning (MAML) in Ultra-Low Latency Environments," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 139155–139172, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3569165.
- [16] X. Ning, H. Tian, Y. Lin, X. Yao, F. Hu, and Y. Yin, "Research on Multi-Objective Optimization Models for

- Intersection Crossing of Connected Autonomous Vehicles with Traffic Signals,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36825–36840, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3374041.
- [17] H. Xu, H. Ma, and S. Zhou, “Influence of Potential Parameters on the Bistable Energy Harvester Under Random Excitation,” *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part B Mech. Eng.*, vol. 11, no. 4, 2025, doi: 10.1115/1.4068585.
- [18] X. Qiu *et al.*, “Joint Device Charging and Fresh Data Retrieval with Mobile Edge Device in Wireless-Powered IoT Systems,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 70, no. 4, pp. 7385–7397, 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3419128.
- [19] S. T. Ahmed, A. A. Ahmed, A. Annamalai, and M. F. Chouikha, “A Scalable and Energy-Efficient LoRaWAN-Based Geofencing System for Remote Monitoring of Vulnerable Communities,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 48540–48554, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3383778.
- [20] D. Chatzoulis, C. Chaikalas, A. Xenakis, D. Kosmanos, and K. E. Anagnostou, “Channel Coding QoS Analysis in 5G V2X Dynamic Propagation Models,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 80149–80173, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3566607.
- [21] A. A. Khan, R. Ghodhbani, A. Alsufyani, N. Alsufyani, and M. A. Mohamed, “Leveraging blockchain-integrated explainable artificial intelligence (XAI) for ethical and personalized healthcare decision-making: a framework for secure data sharing and enhanced patient trust,” *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 15, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-07844-0.
- [22] P. Fan, J. Han, Y. Zhang, C. Zhang, and Z. Zhu, “Energy harvesting from a fiber-constrained dielectric elastomer generator embedded into a novel floating wave energy harvester,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 33, no. 11, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad7f34.
- [23] Y. Huang *et al.*, “Optimized design and performance evaluation of a flexible thermoelectric generator for Low-thermal heat waste energy harvesting,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 264, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125225.
- [24] M. Ghahramani, “Find It with A Pencil: An Efficient Approach for Vulnerability Detection in Authentication Protocols,” *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 18, pp. 2005–2014, 2023, doi: 10.1109/TIFS.2023.3262125.
- [25] N.-S. Pham, S. Shin, L. Xu, W. Shi, and T. Suh, “Cross-Filter Structured Pruning for Efficient Sparse CNN Acceleration,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 129461–129475, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3587027.
- [26] M. A. Aboulhassan, A. H. A. Abd El-Malek, A. M. Salhab, and S. A. Zummo, “Performance Analysis and Path-Planning for Self-Energized UAV-Assisted Relay Networks,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 60, no. 1, pp. 907–917, 2024, doi: 10.1109/TAES.2023.3332588.
- [27] Z. Deng, C. Tang, T. Li, and D. He, “A Distributed Ledger-Assisted Robust and Trusted Service Protocol for VANETs,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 24, pp. 40559–40571, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3451303.
- [28] M. Zeng and J. He, “Deployment Optimization of Roadside Unit With Failure Probability Based on Stochastic Mixed Traffic Equilibrium,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 7, pp. 7792–7804, 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3352015.
- [29] T. Sathiyapriya and R. Sudhakar, “Design of Circularly Polarized Koch Snowflake Fractal Antenna With Schottky Band Diode Rectifiers for RF Energy Harvesting Applications,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 5, 2025, doi: 10.1002/dac.6063.
- [30] T. N. Nguyen *et al.*, “On the Dilemma of Reliability or Security in Unmanned Aerial Vehicle Communications Assisted by Energy Harvesting Relaying,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 1, pp. 52–67, 2024, doi: 10.1109/JSAC.2023.3322756.
- [31] J. J. Pérez-Solano, A. Soriano-Asensi, S. Felici-Castell, and J. Segura-García, “Improving the precision of time synchronization protocols in ultra-wideband networks estimating the time of flight of the radio signal,” *Comput. Commun.*, vol. 223, pp. 44–54, 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.05.006.
- [32] C. L. Ng *et al.*, “A Versatile and Wireless Multichannel Capacitive EMG Measurement System for Digital Healthcare,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 11, pp. 20120–20137, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3370960.
- [33] C. Lin, Y. Liu, and D. Shang, “ORSAS: An Output Row-Stationary Accelerator for Sparse Neural Networks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 44123–44135, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3272564.
- [34] E. J. Majeed and A. J. Majeed, “Harvesting Human Energy to Power Head Torches Using a Thermoelectric Generator †,” *Eng. Proc.*, vol. 70, no. 1, 2024, doi: 10.3390/engproc2024070030.
- [35] D. K. Sah, S. Srivastava, R. Kumar, and T. Amgoth, “An energy efficient coverage aware algorithm in energy harvesting wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 29, no. 3, pp. 1175–1195, 2023, doi:

- 10.1007/s11276-022-03125-3.
- [36] J. Moosmann, H. Muller, N. Zimmerman, G. Rutishauser, L. Benini, and M. Magno, "Flexible and Fully Quantized Lightweight TinyissimoYOLO for Ultra-Low-Power Edge Systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 75093–75107, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3404878.
- [37] T. Ji, Q. Sun, K. Li, and Z. Duan, "Utilizing the Internet of Things and Big Data for Traffic Management: The Role of Physical Network Systems and Collaborative Signal Light Control," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 26, no. 9, pp. 14077–14085, 2025, doi: 10.1109/TITS.2024.3519661.
- [38] R. Song, P. Xu, S. Jia, and Y. Zhang, "Experimental investigation on hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration of oscillators with rod-shaped attachments," *Ocean Eng.*, vol. 319, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120250.
- [39] V. Goutham and V. P. Harigovindan, "NOMA Based Cooperative Relaying Strategy for Underwater Acoustic Sensor Networks under Imperfect SIC and Imperfect CSI: A Comprehensive Analysis," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32857–32872, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060784.
- [40] T. Liu and C. Zhang, "Method for Distributed Node Metric Measurement in Wireless Sensor Networks Based on Multiple Attributes," *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, vol. 34, no. 3, 2025, doi: 10.1142/S0129156424401189.
- [41] A. Luo, B. Lossouarn, and A. Erturk, "The effects of shear deformation and rotary inertia on the electrical analogs of beams and plates for multimodal piezoelectric damping," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 2985–2998, 2024, doi: 10.1002/cta.3899.
- [42] L. Anchidin, A. Lavric, P.-M. Mutescu, A. I. Petrariu, and V. Popa, "The Design and Development of a Microstrip Antenna for Internet of Things Applications," *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.3390/s23031062.
- [43] L. Ding, A. Datta, and S. Sen, "Biophysical Modeling of Capacitive Electro-Quasistatic Human Body Powering," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 72, no. 9, pp. 2593–2608, 2025, doi: 10.1109/TBME.2025.3547738.
- [44] Y. Li, B. Mukhopadhyay, J. Xu, and M.-S. Alouini, "Experimental Validation of Cooperative RSS-Based Localization With Unknown Transmit Power, Path Loss Exponent, and Precise Anchor Location," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 16482–16497, 2024, doi: 10.1109/TWC.2024.3441643.
- [45] F. Bagheri, J. Bonaldo, N. Güler, M. Rivera, P. Wheeler, and R. Lima, "Enhanced Sliding Mode Control for Dual MPPT Systems Integrated with Three-Level T-Type PV Inverters," *Energies*, vol. 18, no. 13, 2025, doi: 10.3390/en18133344.
- [46] S. B. N. Sreeja, G. Sundaram, M. Rivera, P. Wheeler, and R. E. P. Guzmán, "Reinforcement Q-Learning-Based Adaptive Encryption Model for Cyberthreat Mitigation in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 25, no. 7, 2025, doi: 10.3390/s25072056.
- [47] H. D. Alkhalidi, "Study of physical aspects and hydrogen storage potential of X<sub>2</sub>LiBH<sub>6</sub> (X = K, Rb); A DFT investigation," *J. Energy Storage*, vol. 132, 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117890.
- [48] X. Zhang, C. Li, D. Li, and S. Jiang, "Study on Operation Parameter Characteristics of Induction Filter Distribution Transformer in Low-Voltage Distribution Network," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 78764–78773, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083750.
- [49] A. Dutta, L. M. Campoverde, M. Tropea, and F. De Rango, "A Comprehensive Review of Recent Developments in VANET for Traffic, Safety & Remote Monitoring Applications," *J. Netw. Syst. Manag.*, vol. 32, no. 4, 2024, doi: 10.1007/s10922-024-09853-5.
- [50] M. Aljebreen, M. Obayya, H. Mahgoub, S. S. Alotaibi, A. Mohamed, and M. A. Hamza, "Chaotic Equilibrium Optimizer-Based Green Communication With Deep Learning Enabled Load Prediction in Internet of Things Environment," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 258–267, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345803.
- [51] T. M. Le, H. M. Tran, K. Wang, H. V. Pham, and S. V. T. Dao, "An Internet-of-Things-Integrated Deep Learning Model for Fault Diagnosis in Industrial Rotating Machines," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 57266–57286, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3553155.
- [52] A. Ismail, M. G. Abdel-Moneim, A. S. Abdel-Khalik, R. A. Hamdy, and S. Ahmed, "Contactless Power Transfer to Shaft-Mounted Loads via Multiphase Induction Machine With Decoupled Torque and Rotor Power Control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 72, no. 8, pp. 7839–7849, 2025, doi: 10.1109/TIE.2025.3532729.