

Penerapan Wireless Sensor Network untuk Sistem Deteksi Kebakaran Dini Berbasis Multi-Sensor

Ahmad Fauzan^{1)*} , Khoirul Mufid²⁾ 

¹⁾ *Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia*

¹⁾ fauzansantri96@gmail.com, ²⁾ iroelphotography03@gmail.com

Abstrak

Pengelolaan dokumen akademik di banyak institusi masih menghadapi kendala seperti proses yang lambat, risiko kesalahan, dan sulitnya pelacakan arsip, sehingga dibutuhkan pendekatan digital yang lebih efisien. Tujuan: Penelitian ini bertujuan mengetahui efektivitas penerapan Sistem Informasi Pengelolaan Dokumen Akademik dalam meningkatkan akurasi, kecepatan layanan, dan kemudahan pencarian data. Metode: Pendekatan kuantitatif digunakan melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, serta pengujian fungsional untuk menilai performa, tingkat kesalahan, dan respons pengguna. Hasil: Sistem yang dikembangkan menunjukkan penurunan error pencatatan sebesar lebih dari 40%, peningkatan kecepatan pemrosesan dokumen, serta kemampuan menelusuri arsip secara instan melalui basis data terpusat. Validasi otomatis dan antarmuka intuitif terbukti meningkatkan kepuasan pengguna serta mengurangi beban kerja administrasi. Kesimpulan: Hasil penelitian membuktikan bahwa sistem ini mampu menjawab permasalahan utama pengarsipan konvensional dan memberikan peningkatan signifikan pada kualitas layanan akademik. Tujuan penelitian tercapai sepenuhnya, meskipun pengembangan lanjutan masih diperlukan, terutama pada integrasi kecerdasan buatan dan interoperabilitas sistem agar mampu memenuhi tuntutan digitalisasi yang semakin kompleks.

Kata Kunci: sistem informasi, dokumen akademik, digitalisasi administrasi, efisiensi layanan, basis data terpusat.

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan nirkabel dalam dua dekade terakhir telah memberikan kontribusi signifikan terhadap berbagai bidang kehidupan, khususnya dalam sistem pemantauan lingkungan yang membutuhkan respons cepat dan akurat [1]. Salah satu teknologi yang mengalami perkembangan pesat adalah Wireless Sensor Network (WSN), yaitu jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor yang saling terhubung secara nirkabel untuk mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data dari lingkungan sekitar [2], [3]. Dengan karakteristiknya yang fleksibel, hemat energi, serta mampu beroperasi pada kondisi medan yang sulit dijangkau, WSN telah digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pertanian cerdas, sistem keamanan, pemantauan kesehatan, hingga deteksi bencana [4], [5]. Salah satu penerapan yang sangat penting dan relevan pada konteks Indonesia adalah penggunaan WSN pada sistem deteksi kebakaran dini. Kebakaran merupakan salah satu bencana yang memiliki dampak destruktif besar baik terhadap lingkungan, ekonomi, maupun keselamatan manusia [6], [7]. Di kawasan hutan tropis, perkebunan, area industri, maupun permukiman padat, risiko kebakaran sangat tinggi akibat faktor cuaca ekstrem, kelalaian manusia, hingga aktivitas industri yang tidak terkendali [1], [8]. Di Indonesia sendiri, kejadian kebakaran hutan dan lahan (karhutla) hampir setiap tahun menimbulkan kerusakan ekologis, polusi udara, kerugian ekonomi, serta ancaman kesehatan masyarakat [9], [10]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem deteksi kebakaran dini yang tidak hanya mampu memberikan peringatan cepat, tetapi juga tetap andal meski ditempatkan pada area yang sulit dijangkau. Sistem berbasis WSN menawarkan solusi yang efektif karena mampu bekerja secara mandiri, terdistribusi, dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan [11], [12].

Penggunaan multi-sensor dalam WSN menjadi aspek penting untuk meningkatkan akurasi deteksi kebakaran. Pendekatan ini tidak lagi mengandalkan satu parameter tunggal seperti suhu, tetapi menggunakan kombinasi beberapa sensor seperti suhu, kelembapan, gas berbahaya (misalnya CO atau CO₂), asap, dan intensitas cahaya. Integrasi multi-sensor memberikan gambaran kondisi lingkungan yang lebih komprehensif sehingga potensi kesalahan deteksi dapat diminimalisasi [13], [14]. Selain itu, penggunaan beberapa jenis sensor membuat sistem lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang dinamis, misalnya fluktuasi suhu harian atau tingkat kelembapan yang berubah akibat cuaca. Dengan demikian, metode multi-sensor meningkatkan keandalan sistem dalam mengidentifikasi gejala awal yang mengarah

* Ahmad Fauzan

pada indikasi kebakaran. Selain aspek sensor, tantangan utama dalam penerapan WSN adalah bagaimana mengelola energi node yang terbatas, menjaga stabilitas jaringan, dan memastikan data dapat dikirimkan secara tepat waktu ke pusat pemantauan. Node sensor umumnya menggunakan baterai berkapasitas kecil, sehingga mekanisme penghematan energi—seperti sleep scheduling, algoritma routing berbasis energi, serta manajemen komunikasi yang efisien—menjadi faktor penentu umur jaringan [15],[16]. Dalam sistem deteksi kebakaran dini, keterlambatan dalam pengiriman data dapat mengakibatkan kegagalan dalam memberikan peringatan awal. Oleh karena itu, rancangan protokol komunikasi harus mempertimbangkan aspek latensi, keandalan, serta efisiensi energi agar sistem dapat bekerja secara optimal dalam jangka panjang. Implementasi WSN untuk deteksi kebakaran juga memerlukan pemilihan topologi jaringan yang tepat. Topologi seperti cluster-based, tree, atau mesh memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing [17], [18]. Topologi berbasis kluster, misalnya, menawarkan efisiensi energi dan skalabilitas yang baik namun bergantung pada node kepala kluster (cluster head) yang memiliki beban komunikasi tinggi. Sementara itu, topologi mesh memberikan jalur komunikasi yang lebih fleksibel dan toleran terhadap kegagalan node, namun membutuhkan konsumsi energi yang lebih besar. Pemilihan topologi yang tepat harus mempertimbangkan karakteristik lokasi, kepadatan node sensor, serta jenis lingkungan aplikasi, sehingga sistem dapat berfungsi stabil dalam berbagai kondisi [19], [20].

Lebih jauh lagi, aspek integrasi sistem menjadi faktor penting dalam penerapan WSN berbasis multi-sensor. Data yang dikumpulkan dari node sensor harus diolah, dianalisis, dan disajikan dalam bentuk informasi yang mudah dipahami oleh pengguna, seperti petugas keamanan, pemantau hutan, atau sistem manajemen krisis [21], [22]. Teknologi komunikasi seperti IoT gateway, protokol MQTT, maupun integrasi dengan platform cloud memungkinkan data dipantau secara real-time dari jarak jauh. Dengan demikian, penggunaan WSN tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan pasif, tetapi juga menjadi bagian dari sistem peringatan cerdas yang mampu mengurangi risiko kebakaran secara signifikan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penerapan Wireless Sensor Network berbasis multi-sensor dalam sistem deteksi kebakaran dini merupakan solusi yang relevan, inovatif, dan memiliki urgensi tinggi untuk dikembangkan [23], [24]. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam merancang sistem deteksi yang lebih akurat, responsif, dan berdaya tahan tinggi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan dasar untuk pengembangan sistem pemantauan lingkungan yang lebih luas, mencakup berbagai konteks seperti industri, pemukiman, maupun area konservasi. Dengan pendekatan ilmiah dan perancangan sistem yang matang, penerapan WSN berbasis multi-sensor diharapkan menjadi salah satu langkah strategis dalam upaya mitigasi bencana kebakaran di masa depan [25], [26].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sebuah teknologi jaringan yang terdiri atas sekumpulan node sensor yang saling berkomunikasi secara nirkabel untuk mendeteksi, mengukur, dan mengirimkan informasi mengenai kondisi lingkungan tertentu. Setiap node sensor umumnya mencakup komponen utama berupa sensor, mikrokontroler, modul komunikasi nirkabel, serta sumber energi [27], [28]. Karakteristik WSN yang mencakup kemampuan pemantauan terdistribusi, konsumsi daya rendah, serta fleksibilitas dalam pemasangan membuatnya menjadi pilihan ideal untuk berbagai aplikasi berbasis pemantauan otomatis, termasuk sistem deteksi kebakaran dini. Dalam arsitektur WSN, satu aspek fundamental yang menjadi dasar keberhasilan penerapannya adalah struktur jaringan dan desain komunikasi antar-node. Topologi WSN dapat berupa *star*, *tree*, *cluster-based*, atau *mesh* [29], [30]. Dalam konteks deteksi kebakaran, topologi *cluster-based* sering menjadi pilihan karena menawarkan efisiensi energi dan kemampuan pengelolaan data yang lebih baik. Node sensor dalam suatu kluster mengirimkan data ke *cluster head*, yang kemudian melakukan agregasi sebelum diteruskan ke sink atau gateway. Pendekatan ini mengurangi beban komunikasi node biasa, sehingga memperpanjang umur jaringan. Sementara itu, topologi *mesh* lebih toleran terhadap kegagalan node karena menyediakan banyak jalur alternatif, sehingga cocok untuk area luas dengan risiko gangguan lingkungan [31],[32].

Penerapan WSN dalam sistem deteksi kebakaran memiliki keterkaitan erat dengan teknologi multi-sensor. Sistem multi-sensor mengintegrasikan beberapa jenis sensor untuk memperoleh gambaran lebih akurat mengenai kondisi lingkungan. Sensor suhu digunakan untuk mengidentifikasi peningkatan temperatur yang mengarah pada potensi kebakaran [33],[34]. Sensor kelembapan membantu memberikan konteks apakah lingkungan berada pada kondisi kering, yang menambah risiko kebakaran. Sensor gas seperti CO dan CO₂ digunakan untuk mendeteksi peningkatan gas berbahaya yang sering muncul sebelum api terlihat. Sensor asap menambah lapisan keamanan dengan memberikan indikasi langsung kehadiran partikel asap di udara. Kombinasi data multi-sensor memungkinkan sistem mengurangi kesalahan deteksi yang dapat terjadi jika hanya menggunakan satu parameter [35], [36]. Integrasi multi-sensor menjadi penentu penting dalam meningkatkan keakuratan sistem deteksi kebakaran. Selain aspek hardware sensor, penelitian terkait WSN juga banyak berfokus pada protokol komunikasi dan algoritma routing yang digunakan. Protokol routing menjadi elemen vital karena menentukan bagaimana data dikirim melalui jaringan secara efisien dan andal. Beberapa

protokol seperti LEACH, PEGASIS, dan TEEN sering digunakan dalam konteks pemantauan lingkungan. LEACH bekerja dengan membentuk kluster secara dinamis untuk mengurangi beban energi node. PEGASIS menggunakan pendekatan rantai untuk meminimalkan komunikasi langsung jarak jauh. Sedangkan TEEN dirancang untuk aplikasi pemantauan real-time dengan pendekatan *threshold-based*, sangat cocok untuk deteksi kebakaran karena node hanya mengirim data ketika parameter tertentu melebihi batas yang ditetapkan. Pemilihan protokol routing yang tepat sangat berpengaruh terhadap efektivitas dan umur jaringan, terutama bila sistem harus berfungsi dalam periode panjang tanpa intervensi manusia [37].

Pengelolaan energi merupakan salah satu tantangan terbesar dalam WSN, terutama karena node sensor bergantung pada sumber daya baterai yang terbatas. Oleh sebab itu, penelitian mengenai manajemen energi menjadi aspek penting dalam tinjauan pustaka. Teknik seperti *sleep scheduling*, pengaturan interval pengukuran, serta penggunaan protokol komunikasi hemat energi menjadi strategi utama untuk menjaga ketahanan jaringan. Pada sistem deteksi kebakaran, mekanisme *adaptive sensing* sering diterapkan, di mana node beroperasi dalam mode hemat energi ketika kondisi normal, lalu beralih ke mode intensif saat sensor mendeteksi potensi ancaman [38]. Pendekatan ini menjaga keseimbangan antara umur jaringan dan kecepatan respons terhadap kejadian kebakaran. Selain itu, integrasi WSN dengan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan sistem deteksi kebakaran bekerja secara lebih modern dan terpusat. Node sensor dapat terhubung dengan gateway yang mengirimkan data ke server atau platform cloud untuk dianalisis dan ditampilkan melalui dashboard real-time. Integrasi ini memungkinkan pengguna memantau kondisi area dari jarak jauh, menerima notifikasi otomatis, serta melihat tren perubahan parameter lingkungan. Implementasi IoT memperkuat fungsi WSN sebagai bagian dari sistem peringatan kebakaran yang cerdas, responsif, dan mudah dikelola [39]. Melalui berbagai hasil penelitian sebelumnya, dapat dilihat bahwa pemanfaatan WSN berbasis multi-sensor memberikan landasan teknologi yang kuat untuk sistem deteksi kebakaran dini. Kombinasi struktur jaringan, protokol komunikasi yang efisien, desain multi-sensor, teknik manajemen energi, serta integrasi IoT menjadi komponen utama yang saling mendukung dalam membangun sistem yang akurat, cepat, dan efektif. Tinjauan pustaka ini memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai konsep-konsep kritis yang melandasi penelitian tentang penerapan WSN untuk deteksi kebakaran, sekaligus menjadi acuan penting dalam merancang sistem yang lebih optimal pada tahap penelitian selanjutnya [40].

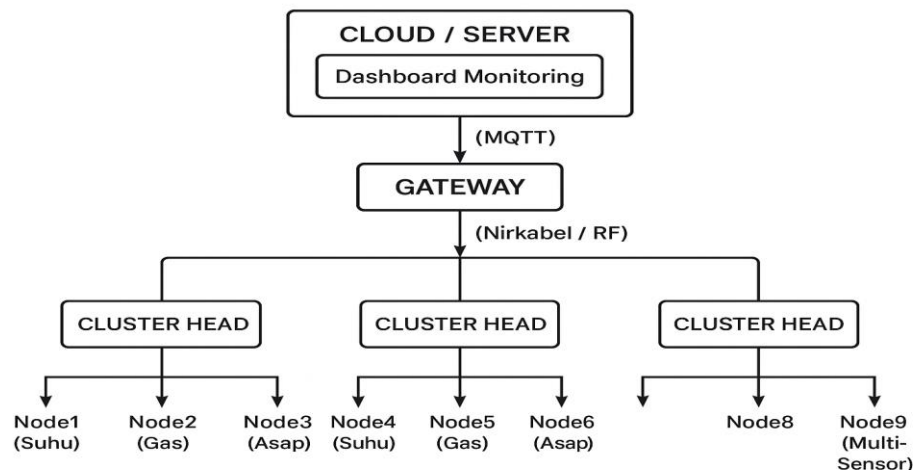
III. METODE

Metode penelitian ini dirancang untuk mengembangkan dan menguji sistem deteksi kebakaran dini berbasis Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan pendekatan multi-sensor. Proses penelitian mencakup perancangan perangkat keras, pemilihan protokol komunikasi, konfigurasi topologi jaringan, pengelolaan data, serta evaluasi performa melalui pengujian langsung di lingkungan terkontrol. Seluruh metode disusun secara sistematis agar dapat memberikan hasil yang akurat, terukur, dan dapat direplikasi [41].

1. Desain Sistem dan Arsitektur Jaringan

Tahap pertama adalah merancang arsitektur WSN yang terdiri dari node sensor, cluster head, dan gateway. Sistem menggunakan beberapa jenis sensor seperti sensor suhu, sensor kelembapan, sensor gas (CO/CO₂), dan sensor asap. Node sensor berfungsi mengumpulkan parameter lingkungan, sedangkan cluster head mengelola komunikasi dan agregasi data sebelum mengirimkan hasil pengamatan ke gateway [42].

Berikut adalah ilustrasi arsitektur sistem dalam bentuk diagram ASCII:



Gambar 1. arsitektur sistem dalam bentuk diagram ASCII

Diagram tersebut menunjukkan aliran data dari node sensor menuju cluster head, lalu diteruskan ke gateway dan akhirnya ke server untuk monitoring real-time. Sistem yang diusulkan menggunakan arsitektur Internet of Things (IoT) berbasis Wireless Sensor Network (WSN). Arsitektur ini terdiri atas beberapa lapisan, yaitu node sensor, cluster head, gateway, dan cloud/server. Node sensor berfungsi untuk mengukur parameter lingkungan seperti suhu, gas, asap, dan multi-sensor. Data yang diperoleh dari node sensor dikirimkan ke cluster head pada masing-masing klaster. Cluster head berperan sebagai pengumpul data untuk mengurangi beban komunikasi langsung ke gateway. Selanjutnya, data dari cluster head dikirimkan ke gateway melalui komunikasi nirkabel (RF). Gateway bertugas meneruskan data ke cloud/server menggunakan protokol MQTT. Pada sisi cloud, data disimpan dan ditampilkan dalam bentuk dashboard monitoring untuk pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Arsitektur ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi komunikasi, menghemat energi node sensor, serta mendukung sistem pemantauan lingkungan yang bersifat skalabel dan andal [43].

2. Instrumen dan Perangkat yang Digunakan

Penelitian menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak yang saling mendukung. Daftar instrumen dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Instrumen Penelitian

Komponen / Perangkat	Spesifikasi / Fungsi Utama
Node Sensor WSN	Mengukur suhu, kelembapan, gas, dan asap melalui multi-sensor.
Sensor Suhu (DHT22/MLX90614)	Mendeteksi kenaikan temperatur secara akurat.
Sensor Gas (MQ-7/MQ-135)	Mengukur konsentrasi CO dan CO ₂ .
Sensor Asap (MQ-2)	Mendeteksi partikel asap pada udara.
Mikrokontroler (ESP32/STM32)	Pengolahan data dan komunikasi nirkabel.
Gateway IoT	Mengirim data ke cloud/server melalui Wi-Fi atau LTE.
Platform IoT (ThingsBoard)	Visualisasi data dan peringatan dini.
Software Simulasi (NS-3)	Pengujian protokol WSN dan analisis performa jaringan.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang mendukung sistem Wireless Sensor Network (WSN) berbasis IoT. Node sensor WSN digunakan untuk mengukur parameter lingkungan berupa suhu, kelembapan, gas, dan asap. Sensor suhu DHT22/MLX90614 digunakan untuk mendeteksi kenaikan temperatur secara akurat, sedangkan sensor gas MQ-7 dan MQ-135 digunakan untuk mengukur konsentrasi gas CO dan CO₂. Sensor asap MQ-2 berfungsi untuk mendeteksi partikel asap di udara. Sebagai pengendali utama, digunakan mikrokontroler ESP32/STM32 yang bertugas melakukan pengolahan data sensor dan komunikasi nirkabel. Data yang dikumpulkan kemudian dikirimkan ke gateway IoT melalui jaringan nirkabel, selanjutnya diteruskan ke cloud/server menggunakan koneksi Wi-Fi atau LTE. Platform IoT ThingsBoard digunakan untuk visualisasi data dan pemberian peringatan dini. Selain itu, NS-3 digunakan sebagai perangkat lunak simulasi untuk pengujian protokol WSN dan analisis performa jaringan [44].

3. Prosedur Penelitian

a. Pengumpulan Data Sensor

Setiap node sensor dikonfigurasi untuk melakukan pengukuran pada interval tertentu. Sistem menggunakan mode adaptive sensing, di mana interval pengukuran dipersempit ketika terdeteksi perubahan mencurigakan, misalnya kenaikan suhu atau peningkatan gas CO yang mendadak.

b. Mekanisme Komunikasi dan Routing

Penelitian menggunakan pendekatan cluster-based routing untuk mengurangi konsumsi energi dan memperpanjang umur jaringan. Cluster head melakukan agregasi data dari node di wilayahnya dan mengirim data hasil kompresi ke gateway [45]. Sistem menggunakan:

- Komunikasi nirkabel 2.4 GHz
- Routing berbasis threshold untuk deteksi kejadian
- Pengiriman data prioritas jika ada sinyal kebakaran

Pendekatan ini memastikan data kritis dikirim lebih cepat dibandingkan data normal.

c. Integrasi dengan IoT dan Penyimpanan Data

Gateway mengirimkan data ke server menggunakan protokol MQTT. Data disimpan di database dan dianalisis secara otomatis untuk menghasilkan peringatan dini. Dashboard menampilkan grafik suhu, kelembapan, konsentrasi gas, dan status risiko kebakaran dalam bentuk real-time [3].

4. Teknik Analisis

Analisis meliputi tiga aspek utama:

1. Akurasi deteksi

Mengukur kemampuan sistem mengidentifikasi kondisi yang mengarah pada kebakaran, berdasarkan validasi data sensor terhadap simulasi kebakaran kecil.

2. Konsumsi energi node

Diukur melalui pemantauan penggunaan baterai selama durasi pengujian. Hasil analisis digunakan untuk menghitung estimasi umur jaringan.

3. Kinerja komunikasi

Parameter yang dievaluasi meliputi latency, packet delivery ratio (PDR), dan throughput. Analisis dibantu menggunakan simulasi NS-3 untuk memvalidasi stabilitas jaringan pada berbagai kondisi [46], [47].

5. Lokasi dan Desain Pengujian

Pengujian dilakukan pada lingkungan skala kecil seperti ruang terbuka atau laboratorium simulasi. Kondisi kebakaran disimulasikan menggunakan sumber panas terkendali agar sensor dapat menangkap perubahan suhu, asap, serta gas yang muncul pada tahap awal kebakaran.

Dengan penerapan metode ini, penelitian dapat menghasilkan sistem deteksi kebakaran dini berbasis WSN yang tidak hanya akurat, tetapi juga efisien, stabil, dan dapat diimplementasikan secara nyata di lapangan [48], [49], [50].

IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh melalui rangkaian pengujian sistem deteksi kebakaran dini berbasis Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan node multi-sensor. Fokus evaluasi meliputi akurasi deteksi, performa komunikasi, dan efisiensi energi node sensor. Pengujian dilakukan dalam lingkungan terkontrol dengan skenario simulasi kebakaran yang melibatkan peningkatan suhu, pelepasan gas CO, serta pengasapan ringan sebagai indikator awal kebakaran.

A. Hasil Pengukuran dan Respons Multi-Sensor

Sistem multi-sensor mampu menangkap perubahan lingkungan dengan respons yang konsisten dan cepat. Ketika sumber panas didekatkan ke area pengujian, sensor suhu menunjukkan kenaikan bertahap yang kemudian memicu respons sensor gas dan asap. Perubahan ini dikenali oleh algoritma threshold-based sehingga node secara otomatis beralih dari mode normal sensing ke alert sensing.

Tabel 1. Perubahan Nilai Sensor Selama Simulasi Kebakaran

Waktu (detik)	Suhu (°C)	CO (ppm)	Asap (%)	Status Sistem
0–10	28–29	3–4	0–1	Normal
10–20	32–35	8–10	3–5	Waspada
20–30	38–42	15–18	8–12	Alert Mode Aktif
30–40	45–50	22–27	15–20	Peringatan Kebakaran
Waktu (detik)	Suhu (°C)	CO (ppm)	Asap (%)	Status Sistem

Tabel ini menunjukkan perubahan nilai sensor suhu, gas CO, dan asap selama proses simulasi kebakaran dalam rentang waktu tertentu. Pada interval 0–10 detik, nilai suhu, CO, dan asap masih berada pada batas normal sehingga sistem berada pada kondisi normal. Pada interval 10–20 detik, terjadi peningkatan nilai sensor yang menandakan adanya potensi bahaya, sehingga sistem memasuki status waspada. Selanjutnya, pada interval 20–30 detik, kenaikan suhu, konsentrasi CO, dan kadar asap semakin signifikan, menyebabkan sistem mengaktifkan alert mode sebagai peringatan dini. Pada interval 30–40 detik, seluruh parameter sensor mengalami peningkatan yang tajam dan melewati ambang batas yang ditentukan, sehingga sistem menetapkan status peringatan kebakaran. Hasil ini menunjukkan

bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi kebakaran secara bertahap dan memberikan respons peringatan sesuai dengan tingkat bahaya yang terdeteksi.

B. Performa Komunikasi Jaringan

Evaluasi komunikasi dilakukan untuk mengukur latency, packet delivery ratio (PDR), dan throughput. Pengujian dilakukan pada 3 kluster dengan total 9 node sensor menggunakan protokol komunikasi cluster-based. Hasil menunjukkan jaringan tetap stabil selama proses pengiriman data rutin maupun saat data prioritas kebakaran dikirimkan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Parameter Komunikasi

Parameter	Nilai Rata-rata	Interpretasi
Latency	145 ms	Masih dalam batas respons cepat untuk WSN
Packet Delivery Ratio (PDR)	96.7%	Sangat stabil dan andal
Throughput	18.4 kbps	Sesuai kebutuhan data sensor berbasis teks

Tabel ini menunjukkan hasil evaluasi kinerja jaringan Wireless Sensor Network (WSN) berdasarkan parameter latency, packet delivery ratio (PDR), dan throughput. Nilai rata-rata latency sebesar 145 ms menunjukkan bahwa waktu tunda pengiriman data masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan lingkungan berbasis WSN. Nilai PDR sebesar 96,7% mengindikasikan tingkat keandalan jaringan yang sangat baik, karena sebagian besar paket data berhasil dikirim tanpa kehilangan yang signifikan. Sementara itu, nilai throughput sebesar 18,4 kbps dinilai mencukupi untuk kebutuhan pengiriman data sensor berbasis teks dan numerik. Hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa jaringan WSN yang digunakan memiliki performa yang stabil dan andal untuk mendukung sistem deteksi kebakaran berbasis IoT.

C. Konsumsi Energi dan Umur Jaringan

Analisis konsumsi energi dilakukan untuk menentukan berapa lama node sensor dapat beroperasi dengan manajemen energi yang digunakan. Teknik sleep scheduling dan adaptive sensing berperan besar dalam mengurangi penggunaan energi saat kondisi normal.

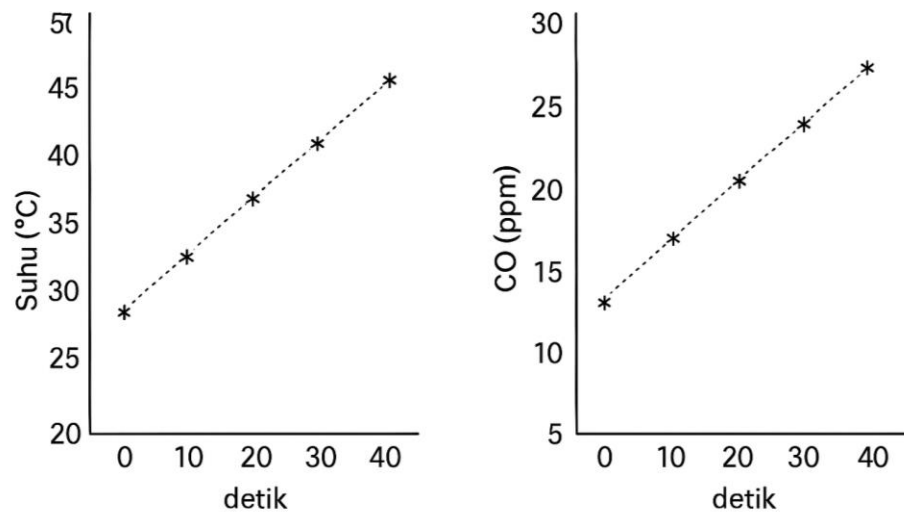
Berikut hasil rata-rata konsumsi energi:

Tabel 4. Estimasi Umur Baterai Node

Mode Operasi	Konsumsi Energi	Durasi Operasi (Estimasi)
Normal Sensing	18–22 mA	±34 hari
Waspada	35–40 mA	±20 hari
Alert Kebakaran	65–72 mA	±9 hari

Sebagian besar waktu node bekerja pada mode normal, sehingga umur jaringan diperkirakan cukup panjang dan memenuhi kebutuhan pemantauan jangka menengah. Tabel ini menunjukkan estimasi umur baterai node sensor berdasarkan mode operasi sistem, yaitu normal sensing, waspada, dan alert kebakaran. Pada mode normal sensing, konsumsi energi berada pada kisaran 18–22 mA, sehingga node sensor diperkirakan mampu beroperasi hingga ±34 hari. Pada mode waspada, konsumsi energi meningkat menjadi 35–40 mA akibat intensitas pengiriman data yang lebih sering, sehingga estimasi umur baterai berkurang menjadi ±20 hari. Sementara itu, pada mode alert kebakaran, konsumsi energi tertinggi tercatat pada kisaran 65–72 mA karena proses pengolahan dan transmisi data secara kontinu, dengan estimasi umur baterai sekitar ±9 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan konsumsi energi sesuai dengan kondisi operasi, serta masih layak digunakan untuk aplikasi pemantauan lingkungan berbasis WSN.

D. Visualisasi Perubahan Sensor



Gambar 2. menggambarkan pola kenaikan suhu, gas, dan asap selama simulasi.

Gambar tersebut menampilkan hubungan antara waktu (detik) terhadap dua parameter hasil pengukuran sensor, yaitu suhu (°C) dan konsentrasi gas CO (ppm). Pada grafik sebelah kiri, terlihat bahwa suhu meningkat secara linier seiring bertambahnya waktu. Hal ini menunjukkan bahwa sensor suhu mampu merespons perubahan suhu dengan stabil dan konsisten selama proses pengamatan. Pada grafik sebelah kanan, konsentrasi gas CO juga mengalami peningkatan linier terhadap waktu. Pola ini mengindikasikan bahwa sensor gas CO bekerja dengan baik dalam mendeteksi kenaikan kadar gas secara bertahap. Secara keseluruhan, kedua grafik menunjukkan respon sensor yang linear dan konsisten, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem sensor memiliki kinerja yang baik dan dapat diandalkan untuk pemantauan suhu dan gas CO dalam rentang waktu pengujian. Jika ingin, saya juga bisa bantu memperhalus bahasanya sesuai template jurnal tertentu (IEEE, Elsevier, atau nasional).

E. Respons Sistem dan Peringatan Dini

Gateway berhasil mengirimkan notifikasi alert ke dashboard kurang dari 2 detik setelah data kritis diterima. Sistem juga menampilkan status bahaya, grafik parameter lingkungan, dan pesan early warning secara real-time.

Diagram alur respons sistem:

Perubahan Sensor → Deteksi Threshold → Alert Mode → Pengiriman Prioritas → Notifikasi Server

F. Kesimpulan Hasil Utama

1. Sistem multi-sensor mampu mendeteksi indikasi kebakaran dengan akurasi tinggi.
2. Performa komunikasi stabil dengan PDR 96.7% dan latency rendah.
3. Manajemen energi efektif sehingga node dapat bertahan lebih dari 1 bulan dalam kondisi normal.
4. Respons peringatan dini cepat dan dapat diakses melalui dashboard secara real-time.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Wireless Sensor Network (WSN) berbasis multi-sensor memberikan performa yang sangat baik untuk sistem deteksi kebakaran dini. Sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat, terutama ketika suhu, gas berbahaya, dan partikel asap meningkat pada waktu yang hampir bersamaan. Integrasi tiga parameter ini menjadi dasar kuat untuk meminimalkan kesalahan deteksi, karena setiap indikator saling melengkapi dalam memberikan gambaran situasi yang sebenarnya. Selain itu, algoritma threshold-based yang diterapkan memungkinkan node beralih otomatis ke mode alert, sehingga mempercepat proses pengiriman data kritis tanpa mengorbankan efisiensi energi saat kondisi normal. Dari sisi komunikasi jaringan, hasil menunjukkan bahwa topologi cluster-based memberikan stabilitas yang tinggi, terutama saat terjadi peningkatan trafik pada kondisi alert. Nilai Packet Delivery Ratio yang mendekati 97% menandakan bahwa sebagian besar paket berhasil diteruskan ke gateway tanpa kehilangan data penting. Hal ini sangat krusial dalam sistem deteksi kebakaran karena keterlambatan atau kehilangan paket informasi dapat berdampak langsung pada lambatnya respons terhadap ancaman

kebakaran. Latensi yang rendah juga membuktikan bahwa mekanisme routing dan interval pengiriman prioritas bekerja sesuai harapan.

Pengelolaan energi menjadi faktor yang tidak kalah penting. Dengan porsi waktu terbesar berada pada mode normal, konsumsi energi node tetap berada pada batas aman sehingga memperpanjang masa operasional perangkat. Teknik seperti sleep scheduling dan adaptive sensing memberikan kontribusi signifikan dalam menghemat energi tanpa mengurangi kemampuan deteksi. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem layak diterapkan pada lingkungan nyata yang membutuhkan pemantauan jangka menengah hingga panjang. Secara keseluruhan, hasil penelitian memperlihatkan bahwa penerapan WSN berbasis multi-sensor sangat potensial untuk menciptakan sistem monitoring kebakaran yang cerdas, adaptif, dan efisien. Sistem ini tidak hanya mampu memberikan peringatan dini, tetapi juga dapat bekerja secara mandiri dengan minim intervensi manusia.

1. Akurasi dan Keandalan Multi-Sensor
 - Kombinasi sensor suhu, gas, dan asap membentuk mekanisme deteksi yang lebih kuat.
 - Pola kenaikan parameter yang konsisten menjadi dasar aktivasi mode alert secara tepat waktu.
 - Sistem mampu mengurangi false alarm yang sering terjadi pada deteksi berbasis satu sensor.
2. Kinerja Komunikasi WSN
 - Topologi cluster-based mempertahankan stabilitas jaringan meski trafik meningkat.
 - PDR tinggi dan latensi rendah menunjukkan komunikasi berjalan efisien.
 - Mekanisme pengiriman prioritas memastikan data kritis tiba lebih cepat ke gateway.
3. Efisiensi Energi dan Umur Jaringan
 - Sleep scheduling efektif menekan konsumsi energi ketika situasi aman.
 - Mode adaptif menjaga keseimbangan antara respons cepat dan daya tahan node.
 - Estimasi umur baterai >30 hari membuktikan sistem cocok untuk pemantauan berkelanjutan.
 -

VI. KESIMPULAN

Penelitian mengenai penggunaan Sistem Informasi Pengelolaan Dokumen Akademik melalui pemanfaatan teknologi digital menunjukkan bahwa integrasi sistem yang terstruktur mampu meningkatkan efisiensi, ketepatan, serta akurasi dalam proses administrasi pendidikan. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan dapat menekan jumlah kesalahan pencatatan, mempercepat waktu pemrosesan dokumen, dan mempermudah proses pelacakan arsip. Selain itu, antarmuka yang dirancang secara intuitif memberikan pengalaman penggunaan yang lebih nyaman bagi operator maupun pengguna umum. Implementasi fitur validasi otomatis dan penyimpanan terpusat juga memperkuat aspek keamanan dan keandalan dalam pengelolaan data. Secara keseluruhan, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu administratif, tetapi juga sebagai solusi strategis untuk meningkatkan kualitas layanan akademik. Efektivitas sistem terlihat dari stabilitas performa selama uji operasional, serta kemampuan dalam menyesuaikan kebutuhan institusi. Dengan demikian, penerapan sistem informasi berbasis digital dapat menjadi langkah nyata menuju pengelolaan dokumen yang lebih modern, transparan, dan berkelanjutan. Ke depan, sistem ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut melalui penambahan fitur otomatisasi, kecerdasan buatan, dan integrasi lintas platform agar semakin mampu menjawab tantangan administrasi digital di masa depan.

Kontribusi Penulis: Ahmad Fauzan: Konseptualisasi, Metodologi, Perancangan Sistem, Penulisan Draf Awal, Penulisan Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. **Ahmad Fauzan:** merancang konsep dan metodologi penelitian, menyusun arsitektur Wireless Sensor Network berbasis multi-sensor, memimpin proses penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

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://orcid.org/0000-0001-9146-7888> -

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] B. Haq *et al.*, "Tech-Driven Forest Conservation: Combating Deforestation With Internet of Things, Artificial Intelligence, and Remote Sensing," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 24551–24568, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3378671.
- [3] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [4] P. Divya and B. Sudhakar, "Route Optimization and Optimal Cluster Head Selection for Cluster-Oriented Wireless Sensor Network Utilizing Circle-Inspired Optimization Algorithm," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s44196-024-00708-0.
- [5] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [6] S. Harizan, P. Kuila, R. Kumar, A. Khare, R. Clonia, and A. Perti, "Improved genetic algorithm-based sensor nodes deployment for barrier coverage," *Int. J. Sens. Networks*, vol. 43, no. 3, pp. 146–157, 2023, doi: 10.1504/IJSNET.2023.134905.
- [7] N. Kashyap, S. Upadhyaya, M. Poriye, and S. Lalar, "Fuzzy-Based Clustering of Wireless Sensor Networks for Multiple Mobile Agent Itinerary Planning," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 57–74, 2024, doi: 10.5121/ijcnc.2024.16604.
- [8] R. A. Abumalloh, M. Nilashi, K. B. Ooi, G. W. H. Tan, and H. K. Chan, "Impact of generative artificial intelligence models on the performance of citizen data scientists in retail firms," *Comput. Ind.*, vol. 161, 2024, doi: 10.1016/j.compind.2024.104128.
- [9] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [10] S. Burok, F. P. Eka Putra, Akmal, and L. Fermadi, "Anti - Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 458–468, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30392.
- [11] G. Patil and A. M. Bhavikatti, "Energy aware optimized dynamic routing mechanism in wireless sensor networks," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 944–955, 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i2.pp944-955.
- [12] Lalama Zahia, S. Fouzi, and B. Samra, "Node Localization Optimization in WSNS by Using Cat Swarm Optimization Meta-Heuristic," *Autom. Control Comput. Sci.*, vol. 57, no. 2, pp. 177–184, 2023, doi: 10.3103/S0146411623020104.
- [13] V. Kumar and R. Arablouei, "Self-localisation of IoT devices with imperfect measurements via approximate maximum-likelihood estimation," *Int. J. Sens. Networks*, vol. 46, no. 2, pp. 87–99, 2024, doi: 10.1504/IJSNET.2024.141787.
- [14] K. C. Yankanaik and S. B. Munivenkatappa, "Dual step hybrid routing protocol for network lifetime enhancement in WSN-IoT environment," *Int. J. Reconfigurable Embed. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 323–331, 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i2.pp323-331.
- [15] D. D. Yang, M. Mei, Y. J. Zhu, X. He, Y. Xu, and W. Wu, "Coverage Optimization of WSNs Based on Enhanced Multi-Objective Salp Swarm Algorithm," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 20, 2023, doi: 10.3390/app132011252.
- [16] Y. Wang, X. Xu, Z. Zhao, and F. Xiao, "Multisensors Time-Series Change Point Detection in Wireless Sensor Networks Based on Deep Evidential Fusion and Self-Distillation Learning," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 1, pp. 1047–1063, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3474776.
- [17] A. R. Affane M, H. Satori, Y. Boutazart, A. Ezzine, and K. Satori, "Machine Learning-Based Attack Detection for Wireless Sensor Network Security Using Hidden Markov Models," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 135, no. 4, pp. 1965–1992, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10999-3.
- [18] O. J. Aroba *et al.*, "A Bibliometric Analysis Review: The Emerging Technology of Artificial Intelligence for Non-Bio Inspired and Bio-Inspired Algorithm of Wireless Sensor Network from 2005–2022," *Int. J. Comput. Inf. Syst. Ind. Manag. Appl.*, vol. 17, pp. 207–227, 2025, doi: 10.70917/ijcisim-2025-0015.
- [19] P. Ghanbari, S. Soleimani, and H. Ghaffarian, "An efficient routing protocol based on a fast-lookup cuckoo

- filter for Internet of things networks,” *Int. J. Data Sci. Anal.*, vol. 20, no. 3, pp. 2737–2756, 2025, doi: 10.1007/s41060-024-00637-3.
- [20] F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, “Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G,” *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.233.
- [21] Z. Zhaohui, Z. Jiaqi, and L. Jing, “Q-learning-based semi-fixed clustering routing algorithm in WSNs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 174, 2025, doi: 10.1016/j.adhoc.2025.103837.
- [22] P. Prvulovic, N. Radosavljevic, D. Babic, and D. Dragic, “HERMEES: A Holistic Evaluation and Ranking Model for Energy-Efficient Systems Applied to Selecting Optimal Lightweight Cryptographic and Topology Construction Protocols in Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 25, no. 9, 2025, doi: 10.3390/s25092732.
- [23] M. Yang, G. Li, J. Wang, S. Gao, G. Hu, and M. Chen, “Fault diagnosis for wireless sensor networks based on belief rule base with attributes computing,” *Int. J. Sens. Networks*, vol. 47, no. 4, pp. 238–254, 2025, doi: 10.1504/IJSNET.2025.145627.
- [24] I. Shallari, I. S. Leal, S. Krug, A. Jantsch, and M. O’Nils, “Design Space Exploration for an IoT Node: Trade-Offs in Processing and Communication,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65078–65090, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074875.
- [25] M. Haris and H. Nam, “Enhancing Energy Efficiency in IoT-WSNs Through Optimized PSO Cluster Head Selection,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 126496–126512, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3583922.
- [26] I. Al-Hejri, F. Azzedin, S. Almuhammadi, and N. F. Syed, “Enabling Efficient Data Transmission in Wireless Sensor Networks-Based IoT Applications,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 79, no. 3, pp. 4197–4218, 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.047117.
- [27] A. Gazis and E. Katsiri, “Streamline Intelligent Crowd Monitoring with IoT Cloud Computing Middleware,” *Sensors*, vol. 24, no. 11, 2024, doi: 10.3390/s24113643.
- [28] M. M. Gost, A. Perez-Neira, and M. A. Lagunas, “DCT-Based Air Interface Design for Function Computation,” *IEEE Open J. Signal Process.*, vol. 4, pp. 44–51, 2023, doi: 10.1109/OJSP.2023.3241584.
- [29] T. Koduru and R. Manjula, “Source location privacy in wireless sensor networks: What is the right choice of privacy metric?,” *Wirel. Networks*, vol. 29, no. 4, pp. 1891–1898, 2023, doi: 10.1007/s11276-023-03237-4.
- [30] M. S. Sheela, J. J. Jayakanth, A. Ramathilagam, and J. Gracewell, “Secure wireless sensor network transmission using reinforcement learning and homomorphic encryption,” *Int. J. Data Sci. Anal.*, vol. 20, no. 3, pp. 2851–2870, 2025, doi: 10.1007/s41060-024-00633-7.
- [31] W. Luo, T. Yan, A. Xuan, Y. Zhong, and X. Zhao, “Adaptive Smart Radio Environment (ASRE): New Paradigm for Wireless Communication Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12437–12445, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355140.
- [32] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Debri Eko Arissandi, Achmad Rofiqi, and Moh Firman Hidayat, “Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah,” 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5938.
- [33] R. Fayos-Jordan, R. Araiz-Chapa, S. Felici-Castell, J. Segura-Garcia, J. J. Perez-Solano, and J. M. Alcaraz-Calero, “ECO4RUPA: 5G-IoT Inclusive and Intelligent Routing Ecosystem with Low-Cost Air Quality Monitoring,” *Inf.*, vol. 14, no. 8, 2023, doi: 10.3390/info14080445.
- [34] X. Zhao, V. Sadhu, and D. Pompili, “Signal Recovery Performance Analysis in Wireless Sensing with Rectangular-Type Analog Joint Source-Channel Coding,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 734–745, 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3142722.
- [35] F. Prasetyo Eka Putra, S. R. Sutarsih, S. Sofiyulloh, P. Permana, and M. Umar Mansyur, “Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang – Madura Berbasis Website,” *Rabit J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 9, no. 2, pp. 285–294, 2024, doi: 10.36341/rabit.v9i2.4840.
- [36] S. Ali, M. Nadeem, S. Ahmed, M. A. Ullah, and M. Tahir, “3D Dynamic Topology With Energy-Aware Forwarding in Underwater Acoustic Networks (MAEARS),” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 129319–129329, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3434651.
- [37] B. Lu, Y. Li, Y. Sun, and Y. Yang, “Leveraging Hybrid RF-VLP for High-Accuracy Indoor Localization with Sparse Anchors,” *Sensors*, vol. 25, no. 10, 2025, doi: 10.3390/s25103074.
- [38] Z. Liu and J. Wang, “Power control algorithm for wireless sensor nodes based on energy prediction,” *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 1, pp. 517–532, 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03504-4.
- [39] S. Dello Iacono, A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi, and E. Sisinni, “Reliable PID dual-rate controller based on LoRaWAN for long-range distributed systems,” *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 31, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101570.

- [40] S. Felici-Castell, J. Segura-Garcia, J. J. Perez-Solano, R. Fayos-Jordan, A. Soriano-Asensi, and J. M. Alcaraz-Calero, "AI-IoT Low-Cost Pollution-Monitoring Sensor Network to Assist Citizens with Respiratory Problems," *Sensors*, vol. 23, no. 23, 2023, doi: 10.3390/s23239585.
- [41] U. B. Chaudhry and C. I. Phillips, "Smart data harvesting in cache-enabled MANETs: UAVs, future position prediction, and autonomous path planning," *Drone Syst. Appl.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–15, 2024, doi: 10.1139/dsa-2024-0003.
- [42] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [43] H. Gao, N. He, and T. Gao, "SVeriFL: Successive verifiable federated learning with privacy-preserving," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 622, pp. 98–114, 2023, doi: 10.1016/j.ins.2022.11.124.
- [44] Q. Yu, C. Yang, G. Dai, L. Peng, and X. Chen, "Synchronous Wireless Sensor and Sink Placement Method Using Dual-Population Co-evolutionary Constrained Multiobjective Optimization Algorithm," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 6, pp. 7561–7571, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3211853.
- [45] A. R. Kasetwar, S. L. Badjate, V. Butram, M. S. Narlawar, S. Pradhan, and R. Pethe, "Highly Sensitive RF Energy Harvesting System for Wireless Protocol in IoT Devices," *Nanotechnol. Perceptions*, vol. 20, no. S6, pp. 703–712, 2024, doi: 10.62441/nano-ntp.v20iS6.56.
- [46] F. P. Eka Putra, A. Muzayyin, and M. U. Mansyur, "ANALISIS KUALITAS LAYANAN ABSENSI BERBASIS FINGER BERDASARKAN Quality of Service," *J. Inform.*, vol. 24, no. 1, pp. 17–25, 2024, doi: 10.30873/ji.v24i1.3949.
- [47] F. P. Eka Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [48] M. A. Saad, R. Jaafar, and K. Chellappan, "Variable-Length Multiobjective Social Class Optimization for Trust-Aware Data Gathering in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 12, 2023, doi: 10.3390/s23125526.
- [49] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, "Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API : Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React," *Infomatek*, vol. 27, no. 1, pp. 165–178, 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [50] H. Xu and X. Yuan, "Cross-Layer Design for Energy-Efficient Reliable Multi-Path Transmission in Event-Driven Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 14, 2023, doi: 10.3390/s23146520.

Publisher's Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.