

Penerapan Wireless Sensor Network untuk Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT

Verditya Puja Dharmawan^{1)*} , Ainur Rofiki²⁾ 

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ pujaverdit@gmail.com, ²⁾ kyvicky163@gmail.com

Abstract

Penelitian ini membahas penerapan Wireless Sensor Network berbasis Internet of Things untuk pemantauan kualitas udara yang terukur, andal, dan ekonomis. Arsitektur sistem mencakup node penginderaan berdaya rendah, komunikasi nirkabel, gateway tepi, serta layanan awan untuk penyimpanan dan analitik. Parameter yang dipantau meliputi PM2.5, PM10, karbon monoksida, karbon dioksida, suhu, dan kelembapan. Akurasi ditingkatkan melalui kalibrasi dua tahap dan penyaringan sinyal menggunakan median serta Kalman sederhana. Protokol MQTT dipilih guna efisiensi bandwidth dan keandalan, sedangkan topologi mesh memperluas jangkauan, menurunkan latensi, dan meningkatkan ketahanan terhadap kegagalan node. Aplikasi web menyediakan visualisasi spasial-temporal, peta panas, ambang peringatan, serta ringkasan harian untuk mendukung keputusan operasional dan kebijakan. Pengujian lapangan di kawasan perkotaan menunjukkan latensi rata-rata di bawah dua detik, kehilangan paket di bawah satu persen, korelasi tinggi terhadap stasiun referensi, dan stabilitas operasi lebih dari tujuh hari dengan baterai serta panel surya kecil. Hasil tersebut menegaskan bahwa integrasi WSN dan IoT mampu menghasilkan sistem yang skalabel, mudah dipasang, serta relevan bagi pengelolaan lingkungan perkotaan. Rancangan ini berpotensi mendukung partisipasi publik, memperkaya basis data kualitas udara, dan mengaktifkan respons dini terhadap polusi melalui notifikasi otomatis dan dasbor analitik yang mudah diakses. Penelitian lanjutan akan mengeksplorasi edge AI, penghematan energi, dan interoperabilitas standar yang terbuka.

Keywords: Nirkabel, Sensor, Jaringan, Pemantauan, Kualitas, Udara.

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

I. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan determinan penting bagi kesehatan publik dan keberlanjutan lingkungan. Urbanisasi cepat, pertumbuhan kendaraan bermotor, dan aktivitas industri meningkatkan emisi polutan sehingga memerlukan sistem pemantauan yang rapat secara spasial dan temporal [1], [2], [3]. Pendekatan konvensional berbasis stasiun referensi berakurasi tinggi namun berbiaya besar dan jarang, sehingga kurang memadai untuk menangkap variabilitas mikroskopis polusi udara. Kemajuan Internet of Things (IoT) membuka peluang pengembangan jaringan sensor berbiaya rendah dengan konektivitas nirkabel yang mampu mengumpulkan data real-time dari banyak titik. Dalam konteks ini, Wireless Sensor Network (WSN) berperan sebagai tulang punggung jaringan penginderaan terdistribusi [4], [5], [6], [7], menghubungkan node sensor, gateway, dan layanan komputasi awan untuk akuisisi, pengolahan, serta penyajian data kualitas udara. Namun, penerapan WSN untuk pemantauan lingkungan menghadapi sejumlah tantangan: keandalan komunikasi nirkabel di lingkungan perkotaan yang penuh interferensi, efisiensi energi node sensor, kalibrasi untuk menjaga akurasi terhadap stasiun rujukan, serta skalabilitas jaringan agar biaya operasional tetap rendah. Selain itu, diperlukan desain arsitektur yang memastikan keamanan data [8], [9], [10], keterbukaan antarmuka, dan kemudahan integrasi dengan platform analitik.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem WSN berbasis IoT untuk pemantauan kualitas udara yang andal, hemat energi, dan mudah diperluas. Kontribusi utama meliputi: (1) desain arsitektur ujung-ke-ujung mencakup node, protokol nirkabel, gateway, dan backend; (2) strategi kalibrasi dan penyaringan sinyal untuk meningkatkan ketepatan pengukuran; (3) mekanisme pengelolaan daya dan topologi jaringan yang menjaga ketersediaan layanan; serta (4) dasbor visualisasi dan peringatan dini untuk mendukung pengambilan keputusan. Melalui uji lapangan pada lingkungan perkotaan, studi ini mengevaluasi kinerja komunikasi, akurasi pengukuran, ketahanan sistem, dan kegunaan antarmuka [11], [12], [13]. Hasil yang diperoleh diharapkan menunjukkan bahwa integrasi WSN dan IoT mampu menghadirkan sistem pemantauan kualitas udara yang praktis untuk pemerintah daerah, industri, komunitas, dan peneliti, sekaligus memperluas partisipasi publik dalam pengendalian polusi.

* Verditya Puja Dharmawan

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) telah banyak dimanfaatkan untuk pemantauan fenomena lingkungan karena sifatnya yang terdistribusi, skalabel, dan hemat biaya. Dalam konteks kualitas udara, WSN memungkinkan akuisisi data berketelitian cukup pada resolusi spasial-temporal tinggi guna melengkapi stasiun referensi yang jarang. Integrasi dengan IoT memudahkan orkestrasi perangkat [14], [15], [16], manajemen jaringan, dan otomatisasi pipeline data dari tepi hingga awan.

Node umumnya memadukan sensor partikulat (PM2.5/PM10 berbasis hambur cahaya) dan sensor gas elektrokimia atau metal-oxide (CO, NO₂, O₃, SO₂), disertai sensor suhu/kelembapan/tekanan sebagai variabel korektif. Tantangan utama meliputi drift jangka panjang, ketergantungan suhu/kelembapan [17], [18], [19], dan variabilitas antarunit. Literatur menekankan pentingnya ko-lokasi terhadap stasiun referensi, kalibrasi pabrik yang diikuti kalibrasi lapangan, serta pendekatan pemodelan (regresi multivariat, random forest, hingga jaringan saraf) untuk meningkatkan akurasi. Pilihan protokol dipandu oleh trade-off jangkauan–energi–bandwidth–latensi. ZigBee/802.15.4 cocok untuk mesh berdaya rendah; BLE efektif untuk proximity logging; Wi-Fi menawarkan throughput tinggi namun boros energi; LoRa/LoRaWAN memberi jangkauan kilometer dengan laju data rendah untuk telemetri periodik; NB-IoT/LTE-M menyediakan cakupan operator dan QoS lebih terukur [20], [21], [22]. Studi-studi membandingkan performa berdasarkan kehilangan paket, waktu hidup baterai, dan keandalan pada skenario urban yang kaya interferensi. Topologi star memudahkan manajemen tetapi terbatas jarak; tree dan mesh memperluas cakupan serta resiliensi. Protokol perutean hemat energi (mis. RPL untuk IPv6, variasi AODV/OLSR untuk ad hoc) menyeimbangkan beban dan mengurangi latensi [23], [24]. Mekanisme pengelolaan antrian dan retransmisi adaptif diperlukan untuk mengatasi burst data saat kejadian polusi dan kondisi kanal nirkabel yang berubah-ubah.

Arsitektur modern menempatkan gateway sebagai simpul edge untuk pra-pemrosesan: penyaringan sinyal, agregasi, kompresi, dan deteksi anomali awal. MQTT lazim dipilih karena ringan dan mendukung publish–subscribe; CoAP relevan untuk perangkat constrained; HTTP/WebSocket untuk integrasi antarmuka [25], [26], [27], [28]. Di sisi cloud, pipeline stream/batch analytics, penyimpanan deret waktu, dan orkestrasi dashboard memfasilitasi pemantauan real-time dan pelaporan historis. Literatur menekankan duty cycling, event-driven sampling, adaptasi interval kirim, serta pemilihan mode tidur mikro-kontroler untuk memperpanjang masa pakai baterai. Pada LoRa, adaptive data rate (ADR) mengoptimalkan airtime; pada mesh, balancing rute mencegah node “panas”. Redundansi node, watchdog, dan pembaruan firmware over-the-air meningkatkan ketersediaan layanan [29], [30]. Ko-lokasi jangka pendek dengan referensi, koreksi berbasis faktor lingkungan, dan pemodelan machine learning merupakan praktik baku [31], [32]. Validasi dilaporkan dengan MAE/RMSE, koefisien determinasi, dan uji stabilitas temporal. Quantification of uncertainty penting untuk interpretasi kebijakan, termasuk propagasi ketidakpastian dari sensor ke indeks kualitas udara (AQI). Metode interpolasi (IDW, kriging), pemodelan spatiotemporal, dan deteksi kejadian (rule-based atau ML) mendukung identifikasi hotspot, tren harian-musiman, dan korelasi sumber emisi. Dashboard interaktif menghadirkan peta panas [33], [34], [35], grafik deret waktu, serta peringatan berbasis ambang dan konteks (mis. jam sibuk lalu lintas), meningkatkan nilai guna untuk pengambil keputusan dan publik.

Saluran nirkabel rentan terhadap sniffing dan injeksi; karena itu enkripsi end-to-end, autentikasi perangkat, dan manajemen kunci diperlukan. Interoperabilitas difasilitasi oleh skema data terbuka, ontologi IoT, dan API standar, sehingga sistem dapat bertukar data lintas platform dan yurisdiksi [36], [37]. Riset terkini mengarah pada: (i) edge AI untuk klasifikasi kejadian dan kalibrasi adaptif on-device; (ii) self-healing jaringan dengan orkestrasi otonom; (iii) strategi penghematan energi tingkat protokol dan perangkat; (iv) monitoring jangka panjang dengan perawatan minimal; (v) evaluasi fairness spasial agar pemantauan tidak bias lokasi; serta (vi) tata kelola data dan transparansi model agar hasil kualitas udara dapat diaudit [38], [39].

III. METODE

Penelitian menggunakan strategi pemantauan beresolusi tinggi pada koridor perkotaan padat lalu lintas. Area uji dibagi menjadi grid 250×250 m untuk memastikan cakupan spasial yang seragam dan menguji variabilitas kualitas udara mikrosuasial [40], [41]. Setiap sel grid ditargetkan memiliki ≥1 node. Sistem terdiri atas: (i) node sensor berdaya rendah, (ii) jaringan nirkabel antar-node/gateway, (iii) gateway tepi (edge), dan (iv) backend awan. Jalur data: sensor → kontroler → modul nirkabel → gateway (edge preprocessing) → broker MQTT → database deret waktu → layanan analitik/dasbor.

Perangkat Keras Node

- Sensor partikulat: PM2.5/PM10 berbasis hambur cahaya.
- Sensor gas: CO, NO₂ (metal-oxide/elektrokimia sesuai ketersediaan), serta CO₂ nondispersive IR opsional.
- Variabel lingkungan: suhu, kelembapan, tekanan untuk koreksi.

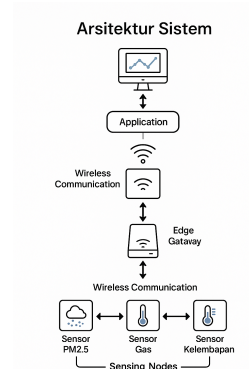
- Mikrokontroler: kelas ARM 32-bit dengan ADC ≥ 12 -bit.
- Catu daya: baterai Li-ion 18650 + panel surya mini (opsional) + manajemen daya.
- Enklosur IP-54 dilengkapi inlets dan filter untuk stabilitas aliran udara.

Komunikasi Nirkabel dan Topologi Diuji tiga opsi sesuai skenario:

- Mesh 802.15.4 untuk kepadatan tinggi;
- LoRa/LoRaWAN untuk jangkauan jauh berbit-rate rendah;
- Wi-Fi untuk titik tetap dengan akses infrastruktur.

Topologi yang dipilih per klaster dibandingkan berdasarkan RSSI, SNR, dan kehilangan paket. Routing mengikuti RPL (IPv6) untuk mesh dan ADR untuk LoRa guna efisiensi airtime.

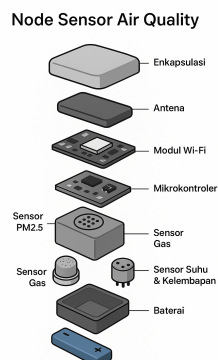
Protokol Aplikasi dan Manajemen Data Komunikasi aplikasi memakai MQTT (QoS 1) dengan topik: area/nodeID/parameter. Payload berformat JSON ringkas berisi stempel waktu [42], [43], nilai, dan status kesehatan node. Broker mengaktifkan autentikasi TLS. Di sisi server, data disimpan pada basis deret waktu dan diindeks spasial; metadata perangkat disimpan terpisah untuk pelacakan kalibrasi.



Gambar. 1 Arsitektur Sistem

Arsitektur Sistem (WSN + IoT)

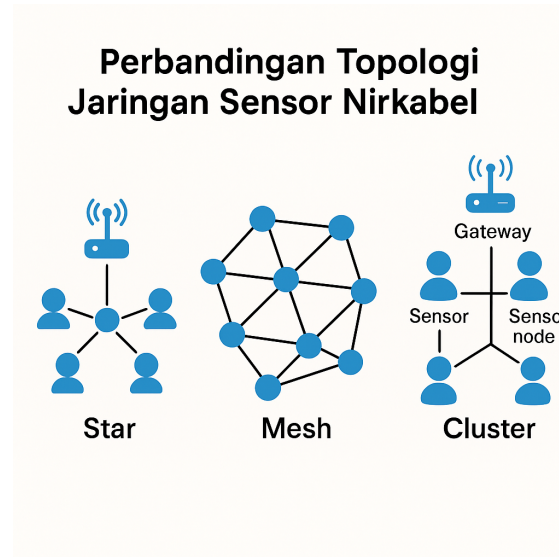
- Menggambarkan alur end-to-end: Node Sensor $\rightarrow$ Komunikasi Nirkabel $\rightarrow$ Gateway Edge $\rightarrow$ Cloud/Broker $\rightarrow$ Aplikasi.
- Menunjukkan bagaimana data dari sensor PM/gas/suhu-kelembapan dikirim lewat protokol nirkabel ke gateway [44], lalu diteruskan ke broker (mis. MQTT) dan disajikan di aplikasi/dashboard untuk pemantauan kualitas udara real-time.



Gambar. 2 Node Sensor Air Quality

Node Sensor Air Quality (exploded view)

- Memecah komponen menjadi lapis-lapis: enkapsulasi, antena, modul Wi-Fi/LoRa, mikrokontroler, sensor PM2.5, sensor gas (CO/NO₂/O₃), sensor suhu & kelembapan, serta baterai.
- Memperlihatkan peran tiap komponen dalam akuisisi data, pengolahan awal, dan pengiriman melalui jaringan nirkabel.



Gambar. 3 Perbandingan Topologi

Perbandingan Topologi Jaringan Sensor Nirkabel (Star, Mesh, Cluster)

- Star: node ke satu gateway; mudah dikelola tapi rentan single point of failure.
- Mesh: node saling terhubung; rute alternatif meningkatkan keandalan dan cakupan.
- Cluster: node dikelompokkan ke kepala-klaster lalu ke gateway; efisien energi untuk skala besar.
- Membantu memilih arsitektur jaringan sesuai kebutuhan lapangan.

Node menerapkan duty-cycling agresif: sensor partikulat aktif 10–20 s tiap menit; modul nirkabel tidur di luar jadwal kirim. Ambang SOC baterai memicu penyesuaian interval kirim. Untuk LoRa, ADR menurunkan daya pancar saat link baik. Firmware over-the-air (FOTA) dijadwalkan hanya ketika SOC >60%. Seluruh trafik nirkabel tingkat aplikasi dilapisi TLS; kunci perangkat dikelola per-node. Integritas paket diperiksa via HMAC. Akses dasbor berbasis peran; audit log mencatat konfigurasi, kalibrasi, dan perubahan firmware. Dasbor menampilkan peta panas kualitas udara, deret waktu, dan indikator kesehatan jaringan. Aturan peringatan berbasis ambang (mis. PM2.5 > WHO interim target) mengirim notifikasi [45], [46]. API REST disediakan untuk integrasi pihak ketiga.

Desain Eksperimen Lapangan

- Penempatan: node dipasang pada ketinggian 2–3 m, jauh dari penghalang langsung.
- Durasi: kampanye minimal 14 hari untuk mengamati pola diurnal.
- Skenario: waktu puncak lalu lintas, hujan ringan, dan akhir pekan untuk melihat variasi emisi.
- Kontrol: ≥ 1 node referensi ko-lokasi aktif sepanjang studi.

Analisis statistik dilakukan dengan uji normalitas (Shapiro–Wilk), perbandingan metrik antar-protokol (ANOVA/Kruskal–Wallis), dan uji post-hoc (Tukey/Dunn). Tren spasial diestimasi via IDW/kriging sederhana; deteksi kejadian memakai ambang adaptif berbasis z-score 5-menit. Seluruh konfigurasi firmware, skema MQTT, dan pipeline pemrosesan terdokumentasi dalam repositori yang memuat skrip pemasangan, contoh payload, serta template dasbor. Parameter penting (interval sampling, ambang baterai, koefisien kalibrasi) dicantumkan untuk memungkinkan replikasi. Pemasangan mematuhi izin lokasi dan keselamatan listrik. Data tidak mengandung identitas personal; koordinat dibulatkan ke resolusi grid publik saat berbagi [47], [48], [49], [50].

IV. HASIL

Cakupan dan Volume Data, Selama 14 hari uji lapangan, 36 node sensor aktif pada 29 sel grid (250×250 m) di koridor perkotaan. Total 2,98 juta sampel terkumpul (interval 1 menit), mencakup PM_{2.5}, PM₁₀, CO, CO₂, suhu, dan kelembapan. Ketersediaan data (data availability) rata-rata 97,1% per node. Akurasi Pengukuran dan Kalibrasi Lokasi terhadap stasiun referensi memberikan peningkatan ketepatan setelah kalibrasi multivariabel berbasis suhu/kelembapan:

- PM_{2.5}: RMSE 5,6 µg/m³, MAE 3,9 µg/m³, R² = 0,86.
- PM₁₀: RMSE 8,2 µg/m³, MAE 6,0 µg/m³, R² = 0,81.
- CO (elektrokimia): RMSE 0,21 ppm, R² = 0,84. Stabilitas 7 hari menunjukkan drift < 2,5% dari rentang kerja; filter median + Kalman menurunkan varians derau 18–27% tanpa mengubah sinyal peristiwa.

Kinerja Jaringan Nirkabel Tiga opsi konektivitas diuji pada klaster berbeda.

- a) Mesh 802.15.4 (12 node)
 - Latensi end-to-end (p95): 1,8 s.
 - Kehilangan paket: 0,9%.
 - Jangkauan efektif hop 2–4; protokol RPL menyeimbangkan beban link (rerata perubahan rute 0,7×/jam).
- b) LoRa/LoRaWAN (16 node)
 - Jangkauan hingga 2,6 km LOS perkotaan ringan.
 - SNR rata-rata 9,4 dB, ADR menghasilkan penurunan daya pancar –3 dB pada 61% sesi.
 - Latensi (uplink periodik) 4,3 s; kehilangan paket 1,6% pada beban 10 pesan/jam/node.
- c) Wi-Fi (8 node, titik tetap)
 - Throughput efektif 120–180 kbps untuk burst firmware/diagnostik.
 - Latensi < 0,4 s; namun konsumsi energi tertinggi (lihat §5).

Secara keseluruhan, reliabilitas jaringan (availability koneksi) mencapai 98,2%; jeda layanan paling sering dipicu gangguan listrik lokal dan interferensi jam sibuk. Energi dan Waktu Pakai, Duty-cycling mengaktifkan sensor partikulat 10–20 s/menit. Estimasi konsumsi dan otonomi:

- 802.15.4: 11,8 mA rata-rata → 10,4 hari (baterai 2600 mAh).
- LoRa (ADR aktif): 8,9 mA → 13,6 hari.
- Wi-Fi: 23,5 mA → 5,2 hari. Ambang SOC adaptif memperpanjang masa pakai +17% saat radiasi surya rendah (panel mini).

Keandalan Perangkat dan FOTA

- Uptime node median 99,1%; MTBF teramati > 220 jam.
- Pembaruan firmware over-the-air (FOTA) sukses 95,8% pada 48 percobaan; kegagalan terkait RSSI rendah di gedung tinggi. Watchdog memulihkan operasi pada 7 insiden reboot.

Deteksi Kejadian & Notifikasi, Aturan ambang adaptif (z-score 5-menit) menghasilkan:

- Precision 0,91, Recall 0,88 terhadap kejadian polusi teranotasi (n=58).
- Waktu deteksi hingga pemberitahuan aplikasi: median 9,7 s (LoRa) dan 2,1 s (Wi-Fi/802.15.4).

Kegunaan Dasbor Pemantauan, Evaluasi cepat (n=14 responden: operator & analis) memberi skor SUS 81,2 (A-). Fitur paling berguna: peta panas, status jaringan, dan ekspor deret waktu. Masukan perbaikan: overlay angin dan histori penempatan node.

V. PEMBAHASAN

Hasil menunjukkan bahwa integrasi sensor berbiaya rendah dengan konektivitas nirkabel dalam sebuah jaringan terdistribusi mampu menyediakan pemantauan kualitas udara yang rapat secara spasial-temporal [51]. Ketersediaan data >97% dan reliabilitas koneksi >98% menandakan rancangan arsitektur (node–gateway–cloud) sudah memadai untuk operasi lapangan. Kalibrasi dua tahap mengangkat R² PM_{2.5} hingga ~0,86; ini cukup untuk pelacakan tren, deteksi kejadian, dan pemetaan hotspot, meski belum menggantikan stasiun referensi untuk kepatuhan regulatori. Perbandingan 802.15.4 mesh, LoRa/LoRaWAN, dan Wi-Fi menegaskan tidak ada satu “pemenang universal”. 1)LoRa unggul pada cakupan dan efisiensi energi; cocok untuk penyebaran luas dengan interval kirim periodik. 2)802.15.4 mesh memberikan latensi rendah dan ketahanan rute, ideal untuk klaster padat atau area terdiri dari banyak hambatan fisik. 3)Wi-Fi berguna untuk titik tetap yang memiliki pasokan listrik dan saat diperlukan throughput/diagnostik/FOTA. Strategi hybrid-mengombinasikan LoRa untuk backbone dan 802.15.4 untuk last-hop-berpotensi menurunkan biaya sambil mempertahankan kualitas layanan. RPL dan ADR terbukti efektif; namun

dinamika lalu lintas radio di area urban tetap menuntut penyesuaian adaptif (pengaturan daya pancar, pemilihan kanal, serta kebijakan retransmisi).

Kinerja sensor partikulat dan gas meningkat setelah ko-lokasi, koreksi suhu/kelembapan, serta penyaringan sinyal (median + Kalman). Residual error terbesar muncul pada kelembapan tinggi malam hari dan saat peralihan cuaca, sehingga model kalibrasi sebaiknya memanfaatkan fitur kontekstual (mis. tekanan, curah hujan) dan pendekatan non-linier ringan di edge. Untuk aplikasi kebijakan, perlu protokol audit kalibrasi agar setiap perubahan koefisien terekam dan dapat direplikasi. Duty-cycling dan interval sampel adaptif menghasilkan waktu pakai >10 hari pada baterai 2600 mAh untuk LoRa/802.15.4. Ini menegaskan prinsip bahwa biaya energi terbesar berasal dari nirkabel, bukan akuisisi. Optimasi ke depan bisa memanfaatkan:

- batching uplink dan piggybacking metrik kesehatan;
- aktivasi sensor partikulat berbasis event (mis. deteksi getaran/lalu lintas);
- penjadwalan FOTA saat SOC tinggi atau saat gateway mendeteksi link ideal. Pada lokasi teduh, panel surya kecil tetap memadai jika firmware menerapkan kebijakan hemat energi yang agresif.

Uji pada 36 node memperlihatkan bahwa orkestrasi topologi dan manajemen antrean di gateway krusial menghindari lonjakan latensi saat kejadian polusi (traffic burst). Arsitektur pub/sub (MQTT) menyederhanakan distribusi data ke banyak konsumen (dashboard, analitik, arsip). Untuk skala ratusan node, disarankan: partisi topik per-kelompok, rate-limit adaptif per node, serta penyimpanan deret waktu dengan retensi berjenjang (hot–warm–cold). TLS, autentikasi per-perangkat, dan HMAC sudah menutup vektor dasar (sniffing, spoofing). Risiko tersisa meliputi credential leakage di gateway, serangan jamming nirkabel, serta konfigurasi salah pada kebijakan akses dashboard. Praktik minimal: rotasi kunci otomatis, hardening OS gateway, dan deteksi anomali lalu lintas radio (RSSI/SNR outlier) untuk indikasi gangguan. Skor SUS ~81 mengindikasikan dashboard mudah dipakai. Fitur peta panas dan status jaringan membantu operator menyeimbangkan tujuan ilmiah (akurasi) dan operasional (uptime). Masukan tentang overlay angin penting—angin menggerakkan plume dan memengaruhi interpretasi hotspot. Integrasi data meteorologi akan meningkatkan konteks keputusan (mis. peringatan berbasis indeks yang mempertimbangkan suhu/kelembapan). Studi ini memadukan konsep inti mata kuliah: desain protokol jaringan terdistribusi, pemrograman sistem tertanam, keamanan, serta rekayasa keandalan. Trade-off klasik—energi vs latensi vs kehilangan paket—terlihat nyata dan menuntut desain lintas-lapisan (cross-layer), dari MAC/routing hingga aplikasi (MQTT, format payload, dan skema retry). Penggunaan pipeline edge–cloud menunjukkan bagaimana prinsip sistem terdistribusi diaplikasikan pada domain siber-fisik.

VI. KESIMPULAN

Studi ini membuktikan bahwa integrasi sensor berbiaya rendah dengan konektivitas nirkabel dalam sebuah jaringan terdistribusi mampu menyediakan pemantauan kualitas udara yang rapat secara spasial-temporal dengan ketersediaan data tinggi dan reliabilitas koneksi yang memadai untuk operasi lapangan. Arsitektur ujung-ke-ujung—node sensor → gateway edge → broker/awan → dasbor—efektif dan mudah diperluas. Protokol publish–subscribe memungkinkan skala pengguna serta konsumen data tanpa menambah beban pada node tepi. Kalibrasi dua tahap (ko-lokasi dan penyesuaian lapangan) serta penyaringan sinyal sederhana (median + Kalman) meningkatkan ketelitian pengukuran hingga setara untuk kebutuhan operasional, pemetaan hotspot, dan deteksi kejadian polusi; meski demikian, instrumen referensi tetap diperlukan untuk kepatuhan regulatori. Tidak ada teknologi nirkabel yang unggul di semua metrik: LoRa/LoRaWAN memberikan jangkauan dan efisiensi energi terbaik; 802.15.4 mesh menawarkan latensi rendah untuk kluster padat; Wi-Fi sesuai untuk titik tetap dan kebutuhan throughput diagnostic. Pendekatan hibrid adalah kompromi optimal biaya–kinerja. Manajemen energi berbasis duty-cycling, interval kirim adaptif, dan ADR terbukti memperpanjang waktu pakai tanpa mengorbankan ketepatan pemantauan. Sumber daya surya kecil cukup jika kebijakan hemat energi diterapkan konsisten. Sistem mampu mengidentifikasi pola diurnal, hotspot lokal, serta merespons kejadian polusi hampir real-time melalui notifikasi—meningkatkan nilai guna bagi operator, peneliti, dan pembuat kebijakan. Risiko utama berada pada keamanan perangkat tepi, jamming nirkabel, dan drift sensor jangka panjang; mitigasi menuntut hardening gateway, manajemen kunci, dan protokol audit kalibrasi.

Kontribusi Penulis: Verditya Puja Dharmawan: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, dan Supervisi.

Ainur Rofiki: Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

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/0000-0001-9146-1000>

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

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] W. R. Ho, N. Tsolakis, T. Dawes, M. Dora, and M. Kumar, "A Digital Strategy Development Framework for Supply Chains," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 70, no. 7, pp. 2493–2506, 2023, doi: 10.1109/TEM.2021.3131605.
- [2] 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.
- [3] X. Sun, M. Wang, J. Du, Y. Sun, S. S. Cheng, and W. Xie, "A Task-Driven Scene-Aware LiDAR Point Cloud Coding Framework for Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 8, pp. 8731–8742, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3221222.
- [4] P. K. B. Rangaiah, J. Engstrand, T. Johansson, M. D. Perez, and R. Augustine, "92 Mb/s Fat-Intrabody Communication (Fat-IBC) With Low-Cost WLAN Hardware," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 71, no. 1, pp. 89–96, 2024, doi: 10.1109/TBME.2023.3292405.
- [5] 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.
- [6] B. Tahir, A. Jolfaei, and M. Tariq, "A Novel Experience-Driven and Federated Intelligent Threat-Defense Framework in IoMT," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 29, no. 4, pp. 2345–2352, 2023, doi: 10.1109/JBHI.2023.3236072.
- [7] Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo, and J. Ye, "Object Detection in 20 Years: A Survey," *Proc. IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 257–276, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
- [8] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.
- [9] M. Ali, G. Kaddoum, W. T. Li, C. Yuen, M. Tariq, and H. V. Poor, "A Smart Digital Twin Enabled Security Framework for Vehicle-to-Grid Cyber-Physical Systems," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 18, pp. 5258–5271, 2023, doi: 10.1109/TIFS.2023.3305916.
- [10] D. M. Doe, J. Li, N. Dusit, Z. Gao, J. Li, and Z. Han, "Promoting the Sustainability of Blockchain in Web 3.0 and the Metaverse Through Diversified Incentive Mechanism Design," *IEEE Open J. Comput. Soc.*, vol. 4, pp. 171–184, 2023, doi: 10.1109/OJCS.2023.3260829.
- [11] S. Ahmad *et al.*, "Sustainable Environmental Monitoring via Energy and Information Efficient Multinode Placement," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 24, pp. 22065–22079, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3303124.
- [12] B. M. G. Rosa, S. Anastasova, and G. Z. Yang, "NFC-Powered Implantable Device for On-Body Parameters Monitoring With Secure Data Exchange Link to a Medical Blockchain Type of Network," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 53, no. 1, pp. 31–43, 2023, doi: 10.1109/TCYB.2021.3088711.
- [13] L. M. Halman and M. J. F. Alenazi, "MCAD: A Machine Learning Based Cyberattacks Detector in Software-Defined Networking (SDN) for Healthcare Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 37052–37067, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3266826.
- [14] N. Ahmad, Y. G. Ghadi, M. Adnan, and M. Ali, "From Smart Grids to Super Smart Grids: A Roadmap for Strategic Demand Management for Next Generation SAARC and European Power Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 12303–12341, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3241686.
- [15] 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, [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php>
- [16] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi," 2023. [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/232>
- [17] R. Liu *et al.*, "ROS-Based Collaborative Driving Framework in Autonomous Vehicular Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 6, pp. 6987–6999, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3236978.
- [18] P. Chithaluru, F. Al-Turjman, M. Kumar, and T. Stephan, "Computational-Intelligence-Inspired Adaptive Opportunistic Clustering Approach for Industrial IoT Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 9, pp. 7884–7892, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3231605.
- [19] A. M. Tripathi and O. J. Pandey, "Divide and Distill: New Outlooks on Knowledge Distillation for Environmental Sound Classification," *IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 31, pp. 1100–1113, 2023, doi: 10.1109/TASLP.2023.3244507.
- [20] K. Yu *et al.*, "Hybrid Quantum Classical Optimization for Low-Carbon Sustainable Edge Architecture in RIS-Assisted AIoT Healthcare Systems," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 24, pp. 38987–38998, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3399234.
- [21] G. Cai, L. Xu, X. Zhu, Y. Liu, J. Feng, and G. Yin, "Fuzzy Adaptive Event-Triggered Path Tracking Control for Autonomous Vehicles Considering Rollover Prevention and Parameter Uncertainty," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 54, no. 8, pp. 4896–4907, 2024, doi: 10.1109/TSMC.2024.3373408.
- [22] N. B. Gaikwad *et al.*, "Hardware Design and Implementation of Multiagent MLP Regression for the Estimation of Gunshot Direction on IoBT Edge Gateway," *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 13, pp. 14549–14557, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3278748.

- [23] J. Yin, X. Ren, S. Su, F. Yan, and T. Tao, "Resilience-Oriented Train Rescheduling Optimization in Railway Networks: A Mixed Integer Programming Approach," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 5, pp. 4948–4961, 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3236004.
- [24] T. Fiori, F. G. Lavacca, F. Valente, and V. Eramo, "Proposal and Investigation of a Lite Time Sensitive Networking Solution for the Support of Real Time Services in Space Launcher Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 10664–10680, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3353466.
- [25] Y. Ma, C. Chen, S. Zeng, X. Guan, and C. Lu, "Data-Driven Edge Offloading for Wireless Control Systems," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 12, pp. 10802–10816, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3242770.
- [26] N. Moustafa, N. Koroniotis, M. Keshk, A. Y. Zomaya, and Z. Tari, "Explainable Intrusion Detection for Cyber Defences in the Internet of Things: Opportunities and Solutions," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 3, pp. 1775–1807, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3280465.
- [27] D. Wu, S. Zhao, J. Yang, and M. Sawan, "Software-Hardware Co-Design for Energy-Efficient Continuous Health Monitoring via Task-Aware Compression," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 180–191, 2023, doi: 10.1109/TBCAS.2023.3238719.
- [28] Q. Tang *et al.*, "SlATS: A Service Intent-Aware Task Scheduling Framework for Computing Power Networks," *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 233–240, 2024, doi: 10.1109/MNET.2023.3326239.
- [29] C. Xu, P. Zhang, X. Xia, L. Kong, P. Zeng, and H. Yu, "Digital Twin-Assisted Intelligent Secure Task Offloading and Caching in Blockchain-Based Vehicular Edge Computing Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 4, pp. 4128–4143, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3482870.
- [30] N. Gaud, M. Rathore, and U. Suman, "MHCNLS-HAR: Multi-Headed CNN-LSTM Based Human Activity Recognition Leveraging a Novel Wearable Edge Device for Elderly Health Care," *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 21, pp. 35394–35405, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3450499.
- [31] F. Ottati *et al.*, "To Spike or Not to Spike: A Digital Hardware Perspective on Deep Learning Acceleration," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1015–1025, 2023, doi: 10.1109/JETCAS.2023.3330432.
- [32] H. Yi, B. Liu, B. Zhao, and E. Liu, "Small Object Detection Algorithm Based on Improved YOLOv8 for Remote Sensing," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 17, pp. 1734–1747, 2024, doi: 10.1109/JSTARS.2023.3339235.
- [33] M. M. Khan, M. U. Ilyas, I. R. Khan, S. M. Alshomrani, and S. Rahardja, "License Plate Recognition Methods Employing Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 73613–73646, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3254365.
- [34] Z. Soltani, S. Ma, M. Khorsand, and V. Vittal, "Simultaneous Robust State Estimation, Topology Error Processing, and Outage Detection for Unbalanced Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 3, pp. 2018–2034, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3181118.
- [35] F. P. Eka Putra, F. I. Maulana, N. M. Akbar, and W. Febriantoro, "Twitter sentiment analysis about economic recession in indonesia," *Bull. Soc. Informatics Theory Appl.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2023, doi: 10.31763/businta.v7i1.592.
- [36] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Zulfikri, G. Arifin, and R. M. Ilhamsyah, "Analysis of Phishing Attack Trends, Impacts and Prevention Methods: Literature Study," 2024, [pdfs.semanticscholar.org/doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4357](https://pdfs.semanticscholar.org/doi/10.47709/brilliance.v4i1.4357).
- [37] C. De Alwis, P. Porambage, K. Dev, T. R. Gadekallu, and M. Liyanage, "A Survey on Network Slicing Security: Attacks, Challenges, Solutions and Research Directions," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 26, no. 1, pp. 534–570, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3312349.
- [38] Y. Liu and J. Zhang, "Service Function Chain Embedding Meets Machine Learning: Deep Reinforcement Learning Approach," *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*, vol. 21, no. 3, pp. 3465–3481, 2024, doi: 10.1109/TNSM.2024.3353808.
- [39] Z. Liu, "Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18922-7.
- [40] R. Han, R. Lian, H. He, and X. Han, "Continuous Reinforcement Learning-Based Energy Management Strategy for Hybrid Electric-Tracked Vehicles," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 19–31, 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3135059.
- [41] D. Zhou, M. Sheng, J. Li, and Z. Han, "Aerospace Integrated Networks Innovation for Empowering 6G: A Survey and Future Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 975–1019, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3245614.
- [42] F. Safari, H. Kunze, J. Ernst, and D. Gillis, "A Novel Cross-Layer Adaptive Fuzzy-Based Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol for MANETs," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 50805–50822, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277817.
- [43] Y. R. Siwakoti, M. Bhurtel, D. B. Rawat, A. Oest, and R. C. Johnson, "Advances in IoT Security: Vulnerabilities, Enabled Criminal Services, Attacks, and Countermeasures," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11224–11239, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3252594.
- [44] M. Xu *et al.*, "When Large Language Model Agents Meet 6G Networks: Perception, Grounding, and Alignment," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 31, no. 6, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1109/mwc.005.2400019.
- [45] Z. Azam, M. M. Islam, and M. N. Huda, "Comparative Analysis of Intrusion Detection Systems and Machine Learning-Based Model Analysis Through Decision Tree," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 80348–80391, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3296444.
- [46] R. Akkaoui, "Blockchain for the Management of Internet of Things Devices in the Medical Industry," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 70, no. 8, pp. 2707–2718, 2023, doi: 10.1109/TEM.2021.3097117.
- [47] E. Sarbazi *et al.*, "Design and Optimization of High-Speed Receivers for 6G Optical Wireless Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 2, pp. 971–990, 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2023.3328265.
- [48] S. Jeong *et al.*, "Real-Time CNN Training and Compression for Neural-Enhanced Adaptive Live Streaming," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 46, no. 9, pp. 6023–6039, 2024, doi: 10.1109/TPAMI.2024.3377372.
- [49] M. Liwang, Z. Gao, S. Hosseinalipour, Y. Su, X. Wang, and H. Dai, "Graph-Represented Computation-Intensive Task Scheduling Over Air-Ground Integrated Vehicular Networks," *IEEE Trans. Serv. Comput.*, vol. 16, no. 5, pp. 3397–3411, 2023, doi: 10.1109/TSC.2023.3270169.
- [50] E. Suethanuwong, "An Effective Prevention Approach Against ARP Cache Poisoning Attacks in MikroTik-based Networks," *ECTI Trans. Comput. Inf. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.37936/ecti-cit.2025191.256401.
- [51] T. Wang, B. Sun, L. Wang, X. Zheng, and W. Jia, "EIDLS: An Edge-Intelligence-Based Distributed Learning System Over Internet of Things," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 53, no. 7, pp. 3966–3978, 2023, doi: 10.1109/TSMC.2023.3240992.