KUADRAN
Jurnal Analitika Data dan Ilmu Komputer

Published by PT Yetti Afrida Center Bengkulu
e-ISSN: 3165-3677 | p-ISSN: 3165-3723
Vol. 1 No. 1 Oktober 2026 | Pages 29-42
https://yettiafridacenter.com/kuadran
This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Internet of Things dan Dashboard Analitik

Khosi'in*

Universitas Islam Negeri Fatmawati Sukarno Bengkulu, Indonesia

Email: khosiin88@mail.uinfasbengkulu.ac.id

ABSTRACT

Purpose: *This study designs an Internet of Things (IoT) system for monitoring fine particulate matter (PM2.5) and an analytical dashboard that converts low-cost sensor readings into the Indonesian Air Pollution Standard Index (ISPU).*

Design/Methodology: *A system development approach was used to define requirements and design a five-layer architecture consisting of sensing nodes (PMS5003, DHT22, ESP32), MQTT transmission, a Python processing service, a time-series database, and a dashboard. The data pipeline was verified through software-in-the-loop testing on a seven-day synthetic dataset that reproduces sensor humidity bias, noise, spikes, power outages, and 1.5% packet loss. Evaluation covered data completeness, outlier filtering, calibration accuracy, ISPU category agreement, and early-warning performance; no field measurements are claimed.*

Findings: *The pipeline retained 97.0% of valid hourly records. A Hampel filter (window 31, threshold 6) detected all 44 injected spikes with 69.8% precision. Multiple regression calibration using PM2.5, relative humidity, and their interaction raised R^2 on the test period from −1.91 to 0.988 and reduced RMSE from 30.06 to 1.91 µg/m³, whereas simple linear calibration reached only R^2 = 0.768. Agreement of hourly ISPU categories with the reference increased from 45.1% to 97.8%, and the alert rule detected both pollution episodes without false alarms, compared with 14 false alarms when raw data were used. The pipeline tolerated up to 10% packet loss without loss of information, but availability of the 24-hour ISPU collapsed when loss reached 20–30%.*

Practical Implications: *The design provides a low-cost, reproducible blueprint for campuses and local governments, provided that sensors are co-located with reference instruments before deployment.*

Originality/Value: *The study integrates hardware design, ISPU computation based on Ministerial Regulation No. 14/2020, humidity-aware calibration, and dashboard analytics in one tested workflow.*

Keywords: *Internet of Things; air quality monitoring; PM2.5; ISPU; low-cost sensor calibration; dashboard.*

Received: 16/09/2026 Accepted: 23/09/2026 Published: 12/10/2026

A. INTRODUCTION (PENDAHULUAN)

Pencemaran udara merupakan salah satu risiko kesehatan lingkungan terbesar saat ini. Partikel halus berdiameter kurang dari 2,5 mikrometer (PM2,5) dapat masuk jauh ke saluran pernapasan dan berkaitan dengan penyakit kardiovaskular serta pernapasan. Organisasi Kesehatan Dunia memperketat pedoman kualitas udaranya pada tahun 2021, termasuk menetapkan nilai pedoman rata-rata 24 jam untuk PM2,5 sebesar 15 µg/m³ (World Health Organization, 2021). Di Indonesia, informasi mutu udara ambien kepada masyarakat disampaikan melalui Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yang tata cara perhitungannya diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020).

Stasiun pemantau acuan memberikan data yang akurat, tetapi biaya pengadaan dan pemeliharaannya tinggi sehingga jumlahnya terbatas. Akibatnya, banyak kota kecil, kawasan kampus, dan permukiman tidak memiliki data kualitas udara yang memadai. Perkembangan sensor murah dan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk membangun jaringan pemantauan yang lebih rapat dengan biaya jauh lebih rendah (Snyder et al., 2013; Kumar et al., 2015). Sensor optik berbasis hamburan laser, mikrokontroler dengan konektivitas nirkabel, dan protokol pesan ringan memungkinkan data dikirim hampir seketika ke server dan ditampilkan dalam bentuk visual.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Namun, sensor murah memiliki keterbatasan yang tidak dapat diabaikan. Berbagai evaluasi lapangan menunjukkan bahwa pembacaan sensor partikel optik dipengaruhi kelembapan relatif, komposisi partikel, dan karakteristik masing-masing unit (Castell et al., 2017; Zheng et al., 2018; Karagulian et al., 2019). Pada kelembapan tinggi, partikel higroskopis menyerap air sehingga tampak lebih besar dan sensor cenderung menaksir konsentrasi terlalu tinggi. Kondisi ini sangat relevan bagi wilayah tropis lembap seperti Bengkulu. Tanpa kalibrasi, angka yang ditampilkan dashboard dapat menyesatkan, misalnya menunjukkan kategori "Tidak Sehat" padahal kondisi sebenarnya "Sedang".

Selain akurasi sensor, sistem IoT juga menghadapi persoalan rekayasa data: kehilangan paket saat jaringan terganggu, nilai lonjakan sesaat akibat gangguan elektronik, pemadaman listrik, dan kebutuhan menghitung indeks resmi dari data yang tidak lengkap. Dashboard yang hanya menampilkan angka mentah tidak cukup. Pengguna memerlukan informasi yang telah divalidasi, dikalibrasi, dan diterjemahkan ke dalam kategori yang mudah dipahami, serta peringatan dini yang tidak terlalu sering memberi alarm palsu.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan (1) merancang arsitektur sistem pemantauan PM2,5 berbasis IoT dari tingkat sensor hingga dashboard; (2) mengembangkan pipeline pengolahan data yang mencakup validasi, penyaringan pencilan, kalibrasi berbasis kelembapan, dan perhitungan ISPU sesuai regulasi nasional; (3) merancang dashboard analitik dan aturan peringatan dini; serta (4) menguji kinerja pipeline melalui pengujian perangkat lunak dalam lingkar (software-in-the-loop) menggunakan data sintetis yang meniru perilaku sensor murah. Penelitian ini berfokus pada rancang bangun dan verifikasi pipeline; pengukuran lapangan dengan perangkat fisik diposisikan sebagai tahap lanjutan.

B. LITERATURE REVIEW (KAJIAN PUSTAKA)

Internet of Things untuk Pemantauan Lingkungan

Internet of Things adalah paradigma ketika benda fisik yang dilengkapi sensor dan kemampuan komunikasi terhubung ke jaringan untuk mengumpulkan serta bertukar data (Atzori et al., 2010). Dalam pemantauan lingkungan, IoT umumnya dirancang berlapis: lapisan persepsi berisi sensor, lapisan jaringan mengirimkan data, lapisan pemrosesan menyimpan dan menganalisis data, serta lapisan aplikasi menyajikan informasi kepada pengguna (Gubbi et al., 2013; Al-Fuqaha et al., 2015). Pembagian lapisan ini memudahkan pengembangan karena setiap komponen dapat diganti tanpa merombak keseluruhan sistem.

Pemilihan protokol komunikasi menentukan keandalan dan konsumsi energi. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) banyak dipakai pada perangkat IoT karena pesannya ringan, menggunakan pola publish/subscribe melalui broker, dan menyediakan tingkat jaminan pengiriman (Quality of Service) yang dapat disesuaikan (OASIS, 2019). Dengan QoS 1, pesan dijamin terkirim setidaknya satu kali. Mekanisme ini membantu mengurangi kehilangan data, meskipun belum mampu mengatasi gangguan pada sisi perangkat seperti pemadaman listrik.

Sensor Partikulat Murah dan Tantangan Akurasinya

Sensor partikulat murah, seperti seri Plantower PMS, mengukur cahaya laser yang dihamburkan partikel dan mengonversinya menjadi perkiraan konsentrasi massa. Uji laboratorium dan lapangan menunjukkan bahwa sensor ini memiliki korelasi cukup baik dengan instrumen acuan, tetapi sering bias dan sensitif terhadap kelembapan (Kelly et al., 2017; Zheng et al., 2018). Tinjauan Karagulian et al. (2019) juga menemukan bahwa kinerja sensor sangat

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

bervariasi antarlokasi, sehingga hasil kalibrasi di satu tempat tidak dapat langsung diterapkan di tempat lain.

Pengaruh kelembapan muncul karena partikel higroskopis menyerap uap air dan membesar, sementara sensor optik tidak dapat membedakan air dari massa partikel kering. Barkjohn et al. (2021) mengembangkan koreksi berskala nasional untuk sensor PurpleAir di Amerika Serikat dengan memasukkan kelembapan relatif ke dalam model regresi, dan menunjukkan penurunan galat yang besar. Pedoman Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat juga menganjurkan ko-lokasi dengan instrumen acuan sebelum dan selama penggunaan sensor (United States Environmental Protection Agency, 2022).

Ko-lokasi dan Strategi Kalibrasi

Kalibrasi sensor murah umumnya dilakukan melalui ko-lokasi, yaitu menempatkan sensor berdampingan dengan instrumen acuan selama periode tertentu, lalu membangun model yang memetakan pembacaan sensor ke nilai acuan. Model yang paling sederhana adalah regresi linear satu variabel. Model yang lebih lengkap menambahkan kelembapan relatif, suhu, atau suku interaksi untuk menangkap pengaruh kondisi meteorologi (Barkjohn et al., 2021). Metode pembelajaran mesin juga telah digunakan, tetapi model yang lebih kompleks membutuhkan data latih lebih banyak dan lebih sulit ditafsirkan.

Validitas kalibrasi bergantung pada keterwakilan data ko-lokasi. Bila ko-lokasi hanya berlangsung pada musim kering, model dapat gagal pada musim hujan ketika kelembapan dan komposisi partikel berbeda. Karena itu, praktik yang dianjurkan adalah memisahkan data latih dan data uji menurut waktu, bukan secara acak, serta melaporkan galat pada periode yang tidak digunakan untuk membangun model (United States Environmental Protection Agency, 2022; Karagulian et al., 2019). Prinsip ini juga diterapkan dalam penelitian ini.

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

ISPU adalah angka tanpa satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien dan dampaknya terhadap kesehatan. Nilai ISPU dihitung dari konsentrasi parameter pencemar dengan interpolasi linear antara batas-batas yang ditetapkan, lalu dikelompokkan menjadi kategori baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat, dan berbahaya (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Untuk PM2,5, perhitungan menggunakan konsentrasi rata-rata 24 jam. Karena kategori ISPU dipakai sebagai dasar komunikasi risiko kepada masyarakat, kesalahan kategori lebih bermakna secara praktis daripada kesalahan angka konsentrasi yang kecil.

Pengolahan Data dan Dashboard Analitik

Data sensor deret waktu hampir selalu mengandung pencilan. Filter Hampel adalah metode robust yang mengganti atau menandai nilai yang menyimpang lebih dari beberapa kali simpangan absolut median (median absolute deviation, MAD) dari median jendela bergerak (Hampel, 1974; Pearson et al., 2016). Metode ini lebih tahan terhadap pencilan dibandingkan aturan berbasis rata-rata dan simpangan baku. Dalam konteks deteksi anomali yang lebih luas, pemilihan ambang selalu melibatkan kompromi antara kepekaan dan alarm palsu (Chandola et al., 2009).

Dashboard berfungsi menyajikan informasi terpenting dalam satu tampilan yang dapat dipahami sekilas. Few (2006) menekankan bahwa dashboard yang efektif menampilkan indikator utama secara ringkas, memberikan konteks pembanding, dan menghindari dekorasi yang tidak perlu. Untuk kualitas udara, konteks tersebut dapat berupa pita warna kategori ISPU,

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

tren beberapa hari, dan pola harian yang membantu pengguna mengenali waktu paparan tertinggi. Ekosistem Python, termasuk pandas, NumPy, dan Matplotlib, menyediakan alat terbuka untuk membangun pipeline dan visualisasi tersebut (McKinney, 2010; Harris et al., 2020; Hunter, 2007).

C. METHOD (METODE)

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun (system development) dengan tahapan analisis kebutuhan, perancangan arsitektur, implementasi perangkat lunak, dan pengujian. Pengujian dilakukan dengan metode software-in-the-loop: seluruh perangkat lunak pengolahan data dijalankan sungguhan, sedangkan masukan dari sensor digantikan oleh data sintetis yang dibangkitkan dari model perilaku sensor. Pendekatan ini memungkinkan pipeline diuji pada kondisi yang terkendali dan diketahui kebenarannya, termasuk kejadian pencemaran, gangguan sensor, dan kehilangan data. Hasil penelitian karena itu merupakan verifikasi rancangan dan algoritma, bukan laporan kualitas udara di lokasi tertentu.

Analisis Kebutuhan

Kebutuhan fungsional sistem dirumuskan sebagai berikut: (1) mengukur PM2,5, suhu, dan kelembapan relatif secara berkala; (2) mengirimkan data ke server dengan cap waktu; (3) menandai data tidak valid dan pencilan; (4) mengoreksi bias sensor menggunakan model kalibrasi; (5) menghitung ISPU dan kategorinya sesuai Permen LHK Nomor 14 Tahun 2020; (6) menampilkan kondisi terkini, tren, dan pola harian pada dashboard; serta (7) mengirimkan peringatan bila kualitas udara memburuk. Kebutuhan nonfungsional meliputi biaya rendah, konsumsi energi rendah, keterbukaan perangkat lunak, dan kemampuan sistem beroperasi meskipun sebagian data hilang.

Rancangan Perangkat Keras

Setiap node sensor tersusun atas komponen pada Tabel 1. Sensor PMS5003 dipilih karena banyak dievaluasi dalam literatur, sedangkan DHT22 menyediakan data kelembapan relatif yang diperlukan untuk kalibrasi. Sensor gas MQ-135 dicantumkan sebagai indikator tambahan kualitas udara dalam ruang, tetapi tidak digunakan untuk perhitungan ISPU karena selektivitasnya rendah dan tidak sesuai untuk pengukuran parameter ISPU.

Tabel 1. Komponen perangkat keras node sensor

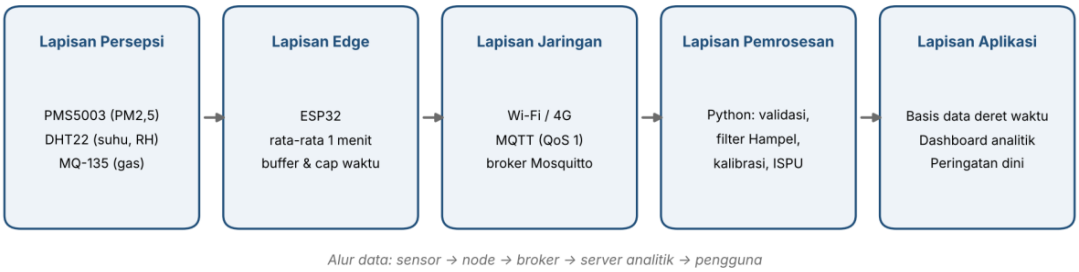
Komponen	Fungsi	Keterangan teknis
PMS5003	Sensor PM1,0; PM2,5; PM10	Prinsip hamburan laser, antarmuka UART, resolusi 1 µg/m³
DHT22 (AM2302)	Sensor suhu dan kelembapan relatif	Masukan koreksi kelembapan pada model kalibrasi
MQ-135	Sensor gas (indikatif)	Tidak dipakai untuk ISPU; hanya indikator tambahan
ESP32	Mikrokontroler dan konektivitas	Wi-Fi terpadu, pemrosesan rata-rata 1 menit, buffer data
Catu daya 5 V + baterai cadangan	Sumber energi	Menjaga node tetap aktif saat listrik padam singkat
Rumah sensor berventilasi	Pelindung fisik	Melindungi dari hujan dan sinar matahari langsung

Arsitektur Sistem dan Alur Data

Arsitektur sistem terdiri atas lima lapisan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada lapisan persepsi, sensor membaca konsentrasi partikel dan kondisi meteorologi. Pada lapisan edge,

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

ESP32 merata-ratakan pembacaan setiap satu menit, menambahkan cap waktu dari server NTP, dan menyimpan data sementara bila koneksi terputus. Lapisan jaringan mengirimkan pesan JSON melalui MQTT dengan QoS 1 ke broker. Lapisan pemrosesan menjalankan layanan Python yang memvalidasi, menyaring, mengalibrasi, dan menghitung ISPU. Lapisan aplikasi menyimpan hasil pada basis data deret waktu serta menampilkan dashboard dan peringatan.



Gambar 1. Arsitektur lima lapisan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT

Setiap pesan berisi identitas node, cap waktu, konsentrasi PM2,5 mentah, suhu, kelembapan relatif, dan status sensor. Contoh struktur topik dan muatan pesan ditunjukkan berikut. Format JSON dipilih karena mudah dibaca manusia dan didukung langsung oleh pustaka Python.

```
Topik  : kualitas-udara/node01/data
Muatan : {
  "node": "node01",
  "ts": "2026-08-06T07:15:00+07:00",
  "pm25_raw": 48.2,
  "temp": 26.4,
  "rh": 88.1,
  "status": "ok"
}
```

Rancangan Firmware Node

Firmware ESP32 dirancang dengan prinsip sederhana dan tahan gangguan. Node membaca sensor PMS5003 setiap beberapa detik, merata-ratakan hasilnya selama satu menit, lalu menggabungkannya dengan data suhu dan kelembapan. Bila koneksi Wi-Fi atau broker terputus, pesan disimpan sementara pada memori lokal dan dikirim ulang setelah koneksi pulih. Mekanisme simpan-lalu-kirim ini penting karena kehilangan data yang berurutan lebih merugikan daripada kehilangan acak, terutama bagi perhitungan rata-rata 24 jam. Alur logika firmware ditunjukkan pada pseudokode berikut.

```
setup():
    hubungkan Wi-Fi; sinkronkan waktu NTP
    hubungkan broker MQTT (QoS 1)
loop() setiap 1 menit:
    pm = rata_rata(baca_PMS5003() selama 60 detik)
    suhu, rh = baca_DHT22()
    status = cek_rentang(pm, suhu, rh)
    pesan = JSON(node, waktu, pm, suhu, rh, status)
    jika terhubung(broker):
        kirim_buffer_tertunda(); publish(topik, pesan)
    jika tidak:
        simpan_ke_buffer(pesan); coba_sambung_ulang()
```

Dengan rancangan ini, server menerima data per menit yang telah dirata-ratakan, bukan pembacaan mentah setiap detik. Pemrosesan di sisi edge mengurangi volume data dan konsumsi energi radio, sedangkan algoritma yang lebih berat seperti kalibrasi dan perhitungan ISPU tetap dijalankan di server agar mudah diperbarui tanpa memprogram ulang perangkat.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Algoritma Pengolahan Data

Pipeline pengolahan di server terdiri atas lima tahap. Tahap pertama adalah validasi format dan rentang nilai. Tahap kedua adalah penyaringan pencilan dengan filter Hampel pada data per menit: sebuah nilai ditandai sebagai pencilan bila $|x_i - \text{med}_i| > k \cdot 1{,}4826 \cdot \text{MAD}_i$, dengan med_i dan MAD_i dihitung pada jendela bergerak berukuran w. Tahap ketiga adalah agregasi per jam; satu jam dinyatakan valid bila memiliki minimal 45 data menit (75%). Tahap keempat adalah kalibrasi menggunakan regresi linear berganda:

$$PM_{kal} = \beta_0 + \beta_1 \cdot PM_{sensor} + \beta_2 \cdot RH + \beta_3 \cdot (PM_{sensor} \cdot RH/100) \quad (1)$$

Suku interaksi $PM_{sensor} \cdot RH$ memungkinkan besarnya koreksi berubah menurut kelembapan, sesuai mekanisme pertumbuhan higroskopis partikel. Sebagai pembanding, digunakan juga regresi linear sederhana $PM_{kal} = \beta_0 + \beta_1 \cdot PM_{sensor}$. Tahap kelima adalah perhitungan ISPU dengan interpolasi linear sesuai regulasi:

$$I = [(I_a - I_b)/(X_a - X_b)] \cdot (X_x - X_b) + I_b \quad (2)$$

dengan I_a dan I_b batas atas dan bawah ISPU, X_a dan X_b batas atas dan bawah konsentrasi ambien, serta X_x konsentrasi hasil pengukuran. Batas yang digunakan untuk PM2,5 rata-rata 24 jam ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas konsentrasi PM2,5 (24 jam) dan kategori ISPU

Rentang ISPU	Kategori	PM2,5 (µg/m³)	Warna dashboard
0 – 50	Baik	0 – 15,5	Hijau
51 – 100	Sedang	15,6 – 55,4	Biru
101 – 200	Tidak Sehat	55,5 – 150,4	Kuning
201 – 300	Sangat Tidak Sehat	150,5 – 250,4	Merah
> 300	Berbahaya	250,5 – 500	Hitam

Sumber: diolah dari Peraturan Menteri LHK Nomor 14 Tahun 2020.

Aturan peringatan dini dirancang sederhana: peringatan dikirim bila ISPU yang dihitung dari konsentrasi per jam melampaui 100 selama dua jam berturut-turut. Syarat dua jam dimaksudkan untuk mengurangi alarm palsu akibat lonjakan sesaat. ISPU per jam ini hanya dipakai sebagai indikator peringatan cepat, sedangkan kategori resmi yang ditampilkan dashboard tetap berdasarkan rata-rata 24 jam.

Skenario Pengujian

Data sintetis disusun untuk periode tujuh hari (3–9 Agustus 2026) dengan resolusi satu menit, atau 10.080 titik data. Konsentrasi acuan dibangkitkan dari komponen dasar, puncak lalu lintas pagi dan sore, peningkatan malam hari akibat lapisan inversi, fluktuasi acak autoregresif, serta dua episode pencemaran yang diketahui waktunya. Episode pertama berlangsung pada 5 Agustus pukul 13.00–19.00, dan episode kedua pada 8 Agustus pukul 09.00–16.00. Pembacaan sensor dimodelkan dengan faktor penguatan, faktor pertumbuhan higroskopis yang bergantung pada kelembapan, derau acak, dan lonjakan sesaat dengan peluang 0,4% per menit. Gangguan sistem yang disimulasikan meliputi dua periode node mati (3,5 jam dan 50 menit) dan kehilangan paket MQTT sebesar 1,5%. Rangkuman skenario disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario pengujian software-in-the-loop

Aspek	Pengaturan
Periode dan resolusi	7 hari; 1 menit (10.080 titik)
Gangguan sensor	Bias kelembapan, derau, lonjakan sesaat 0,4% per menit
Gangguan sistem	Node mati 3,5 jam dan 50 menit; kehilangan paket 1,5%
Data kalibrasi (ko-lokasi)	3 hari pertama (72 jam)
Data uji	4 hari terakhir (jam valid)

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Aspek	Pengaturan
Episode pencemaran	5 Agustus 13.00–19.00; 8 Agustus 09.00–16.00
Perangkat lunak	Python 3.13, NumPy, pandas, Matplotlib

Kinerja dievaluasi dengan lima ukuran: kelengkapan data, presisi dan sensitivitas filter pencilan, akurasi kalibrasi (R^2, RMSE, MAE, dan bias terhadap data acuan pada periode uji), kesesuaian kategori ISPU dengan data acuan, serta waktu deteksi dan jumlah alarm palsu pada aturan peringatan dini.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN)

Verifikasi Fungsi Perhitungan ISPU

Sebelum menguji pipeline secara menyeluruh, fungsi perhitungan ISPU diuji dengan sembilan kasus uji yang mencakup setiap batas kategori, titik tengah rentang, dan nilai di luar rentang tabel. Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa seluruh kasus menghasilkan nilai ISPU dan kategori sesuai harapan. Konsentrasi di atas 500 µg/m³ dibatasi pada ISPU 500, sesuai batas atas tabel.

Tabel 4. Hasil pengujian unit fungsi perhitungan ISPU PM2,5

No	PM2,5 (µg/m³)	ISPU harapan	ISPU hasil	Kategori hasil	Status
1	0	0	0,00	Baik	Sesuai
2	15,5	50	50,00	Baik	Sesuai
3	35,45	75	75,00	Sedang	Sesuai
4	55,4	100	100,00	Sedang	Sesuai
5	102,9	150	150,00	Tidak Sehat	Sesuai
6	150,4	200	200,00	Tidak Sehat	Sesuai
7	250,4	300	300,00	Sangat Tidak Sehat	Sesuai
8	375,2	400	400,00	Berbahaya	Sesuai
9	600	500	500,00	Berbahaya	Sesuai

Kelengkapan Data dan Penyaringan Pencilan

Dari 10.080 titik data per menit, sebanyak 9.669 titik (95,9%) berhasil diterima server. Data yang hilang berasal dari dua periode node mati dan kehilangan paket acak. Setelah agregasi, 163 dari 168 jam (97,0%) memenuhi syarat kelengkapan 75%. Hasil ini menunjukkan bahwa aturan agregasi per jam mampu meredam pengaruh kehilangan paket acak. Kehilangan data yang tidak dapat ditoleransi hanya terjadi saat node mati lebih dari 15 menit dalam satu jam.

Tabel 5 menunjukkan pengaruh parameter filter Hampel. Semua konfigurasi berhasil menandai ke-44 lonjakan sesaat yang diterima server (sensitivitas 100%), tetapi jumlah data normal yang ikut ditandai sangat berbeda. Dengan jendela 15 menit dan ambang k = 3, filter menandai 320 titik dengan presisi hanya 13,8%. Memperbesar jendela menjadi 31 menit dan ambang menjadi k = 6 menurunkan jumlah tanda menjadi 63 titik dengan presisi 69,8%. Pada konfigurasi ini, hanya 19 titik normal (0,2% dari data yang diterima) yang ikut ditandai. Konfigurasi tersebut dipilih untuk pipeline.

Tabel 5. Sensitivitas filter Hampel terhadap ukuran jendela (w) dan ambang (k)

w (menit)	k	Titik ditandai	Lonjakan terdeteksi	Presisi (%)	Sensitivitas (%)
15	3	320	44	13,8	100
15	4	164	44	26,8	100
15	5	100	44	44,0	100
15	6	68	44	64,7	100
31	3	237	44	18,6	100

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

w (menit)	k	Titik ditandai	Lonjakan terdeteksi	Presisi (%)	Sensitivitas (%)
31	4	116	44	37,9	100
31	5	83	44	53,0	100
31	6	63	44	69,8	100

Ke-19 titik normal yang ikut ditandai tersebar sepanjang periode dan umumnya merupakan fluktuasi derau acak yang besar; hanya satu titik yang berada di sekitar episode pencemaran. Meski begitu, konfigurasi yang lebih agresif (jendela pendek dan ambang kecil) menandai ratusan titik normal. Hal ini menunjukkan risiko filter yang terlalu agresif: variasi nyata dapat dianggap pencilan. Karena itu, filter Hampel sebaiknya dipakai untuk menandai, bukan langsung menghapus data, dan ambangnya perlu disesuaikan dengan karakteristik lokasi.

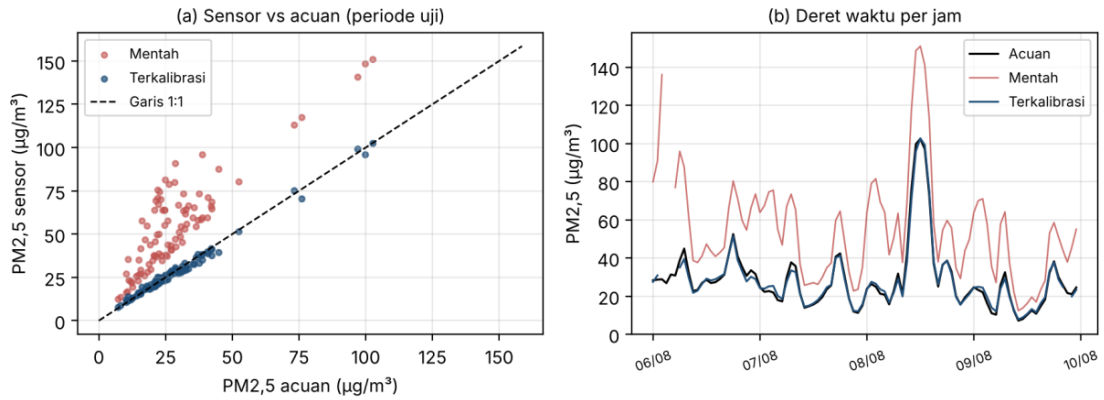
Akurasi Kalibrasi Sensor

Model kalibrasi diestimasi dari 72 jam data ko-lokasi pada tiga hari pertama dan diuji pada 91 jam valid pada empat hari berikutnya. Hasilnya disajikan pada Tabel 6. Data mentah memiliki bias positif sebesar 26,37 µg/m³ dan R^2 bernilai negatif (−1,91). Artinya, pembacaan mentah lebih buruk daripada sekadar memakai rata-rata data acuan sebagai tebakan. Penyaringan pencilan saja hanya sedikit memperbaiki akurasi karena sumber utama galat adalah bias sistematis, bukan lonjakan sesaat.

Tabel 6. Kinerja kalibrasi pada periode uji (91 jam)

Tahap / model	R^2	RMSE (µg/m³)	MAE (µg/m³)	Bias (µg/m³)
Data mentah	−1,913	30,06	26,37	+26,37
Setelah filter Hampel	−1,696	28,92	25,30	+25,30
Regresi linear sederhana	0,768	8,48	6,62	−0,76
Regresi berganda (PM, RH, interaksi)	0,988	1,91	1,50	−0,19

Regresi linear sederhana menghilangkan sebagian besar bias dan menaikkan R^2 menjadi 0,768, tetapi galatnya masih 8,48 µg/m³. Galat ini terutama muncul pada jam-jam dengan kelembapan tinggi. Regresi berganda yang memasukkan kelembapan dan suku interaksi menghasilkan R^2 0,988 dengan RMSE 1,91 µg/m³, atau sekitar empat kali lebih kecil daripada model sederhana. Model yang diperoleh adalah $PM_{kal} = -8{,}796 + 1{,}623 \cdot PM_{sensor} + 0{,}129 \cdot RH - 1{,}428 \cdot (PM_{sensor} \cdot RH/100)$. Koefisien interaksi yang negatif berarti faktor pengali terhadap pembacaan sensor mengecil ketika kelembapan meningkat, sesuai dengan mekanisme pembengkakan partikel higroskopis.



Gambar 2. Hasil kalibrasi pada periode uji: (a) sebaran pembacaan sensor terhadap data acuan; (b) deret waktu PM2,5 per jam sebelum dan sesudah kalibrasi

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Gambar 2(a) memperlihatkan bahwa titik data mentah berada jauh di atas garis 1:1, dengan penyimpangan yang membesar pada konsentrasi tinggi. Setelah kalibrasi, titik data berimpit dengan garis 1:1 di seluruh rentang konsentrasi, termasuk pada episode pencemaran ketika PM2,5 acuan mencapai sekitar 100 µg/m³. Gambar 2(b) menunjukkan pola yang sama dalam domain waktu: pembacaan mentah dapat mencapai sekitar 150 µg/m³, sedangkan data terkalibrasi mengikuti data acuan dengan baik. Temuan ini sejalan dengan Barkjohn et al. (2021) yang menunjukkan pentingnya koreksi kelembapan bagi sensor partikel optik.

Perlu dicatat bahwa akurasi setinggi ini diperoleh karena data uji berasal dari model sensor yang sama dengan data latih. Dalam penerapan nyata, hubungan antara sensor dan instrumen acuan dapat berubah akibat musim, sumber pencemar yang berbeda, dan penuaan sensor. Karena itu, angka R^2 pada Tabel 6 sebaiknya dipahami sebagai bukti bahwa struktur model dan pipeline berfungsi, bukan sebagai jaminan akurasi di lapangan.

Kesesuaian Kategori ISPU

Tabel 7 membandingkan kategori ISPU yang dihasilkan sistem dengan kategori dari data acuan. Untuk ISPU resmi berbasis rata-rata 24 jam, data terkalibrasi menghasilkan kategori yang sama dengan acuan pada 100% jam yang dievaluasi, dengan selisih rata-rata absolut nilai ISPU sebesar 0,59. Data mentah hanya sesuai pada 35,4% jam: rata-rata 24 jam mentah sering melampaui 55,4 µg/m³ sehingga sistem keliru menampilkan kategori Tidak Sehat. Untuk indikator per jam, kesesuaian meningkat dari 45,1% pada data mentah menjadi 97,8% setelah kalibrasi.

Tabel 7. Kesesuaian kategori ISPU sistem dengan data acuan pada periode uji

Basis perhitungan	Data mentah (%)	Data terkalibrasi (%)
ISPU rata-rata 24 jam (kategori resmi)	35,4	100,0
ISPU per jam (indikator cepat)	45,1	97,8

Kesesuaian 100% pada kategori 24 jam perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Selama periode uji, rata-rata 24 jam acuan berada pada rentang kategori Sedang, dengan nilai maksimum 43,2 µg/m³. Rentang kategori Sedang cukup lebar (15,6–55,4 µg/m³), sehingga galat kecil tidak mengubah kategori. Pada lokasi yang konsentrasinya sering berada di dekat batas kategori, ketidaksesuaian kategori lebih mungkin terjadi meskipun galat kalibrasinya sama.

Kinerja Peringatan Dini

Aturan peringatan berhasil mendeteksi kedua episode pencemaran. Dengan data terkalibrasi, peringatan pertama muncul dua jam setelah episode dimulai. Waktu ini sesuai dengan rancangan, karena aturan mensyaratkan dua jam berturut-turut di atas ISPU 100. Tidak ada alarm palsu di luar episode pencemaran, dan hasil ini sama dengan aturan yang diterapkan pada data acuan. Sebaliknya, aturan yang diterapkan pada data mentah memberi peringatan satu jam lebih cepat, tetapi menghasilkan 14 episode alarm palsu dalam tujuh hari. Alarm palsu ini terutama muncul pada malam hingga pagi hari (pukul 00.00–07.00) ketika kelembapan relatif mencapai 84–93%, serta pada puncak lalu lintas sore. Pada kondisi tersebut, pembacaan mentah melampaui 55,4 µg/m³ meskipun konsentrasi sebenarnya berada pada kategori Sedang.

Temuan tersebut menunjukkan kompromi klasik dalam sistem peringatan antara kecepatan dan keandalan (Chandola et al., 2009). Alarm palsu yang terlalu sering dapat menurunkan kepercayaan masyarakat sehingga peringatan yang benar justru diabaikan. Dengan kalibrasi, sistem dapat memberi peringatan yang tepat dengan jeda dua jam. Jeda ini masih dapat diterima

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

untuk episode pencemaran yang berlangsung beberapa jam, seperti asap kebakaran atau pembakaran sampah.

Ketahanan Sistem terhadap Kehilangan Paket

Untuk menilai ketahanan pipeline, simulasi diulang dengan tingkat kehilangan paket acak 0% hingga 30%, sementara dua periode node mati tetap dipertahankan. Hasilnya disajikan pada Tabel 8. Hingga tingkat kehilangan 10%, persentase jam valid tetap 97,0%, akurasi kalibrasi tidak berubah berarti (RMSE 1,87–1,89 µg/m³), dan ISPU 24 jam tersedia pada seluruh jam periode uji. Artinya, aturan agregasi per jam mampu menyerap kehilangan paket acak dalam jumlah sedang tanpa menurunkan mutu informasi.

Tabel 8. Pengaruh tingkat kehilangan paket terhadap kelengkapan data dan akurasi

Kehilangan paket (%)	Data menit diterima (%)	Jam valid (%)	Jam uji valid	RMSE kalibrasi (µg/m³)	Ketersediaan ISPU 24 jam (%)
0	97,4	97,0	91	1,89	100,0
1,5	95,9	97,0	91	1,88	100,0
5	92,6	97,0	91	1,88	100,0
10	87,6	97,0	91	1,87	100,0
20	78,1	83,3	80	1,96	75,0
30	68,1	20,8	23	1,87	0,0

Catatan: dua periode node mati tetap diterapkan pada semua skenario.

Namun, kinerja sistem tidak menurun secara bertahap. Pada kehilangan paket 20%, rata-rata data yang diterima mendekati 48 menit per jam, sangat dekat dengan ambang kelengkapan 45 menit, sehingga jam valid turun menjadi 83,3% dan ISPU 24 jam hanya tersedia pada 75% jam uji. Pada kehilangan 30%, rata-rata data per jam berada di bawah ambang, sehingga hanya 20,8% jam yang valid dan ISPU 24 jam sama sekali tidak dapat dihitung. Menariknya, akurasi kalibrasi pada jam yang tersisa tetap baik. Jadi, masalah utama sistem bukan pada akurasi, melainkan pada ketersediaan informasi.

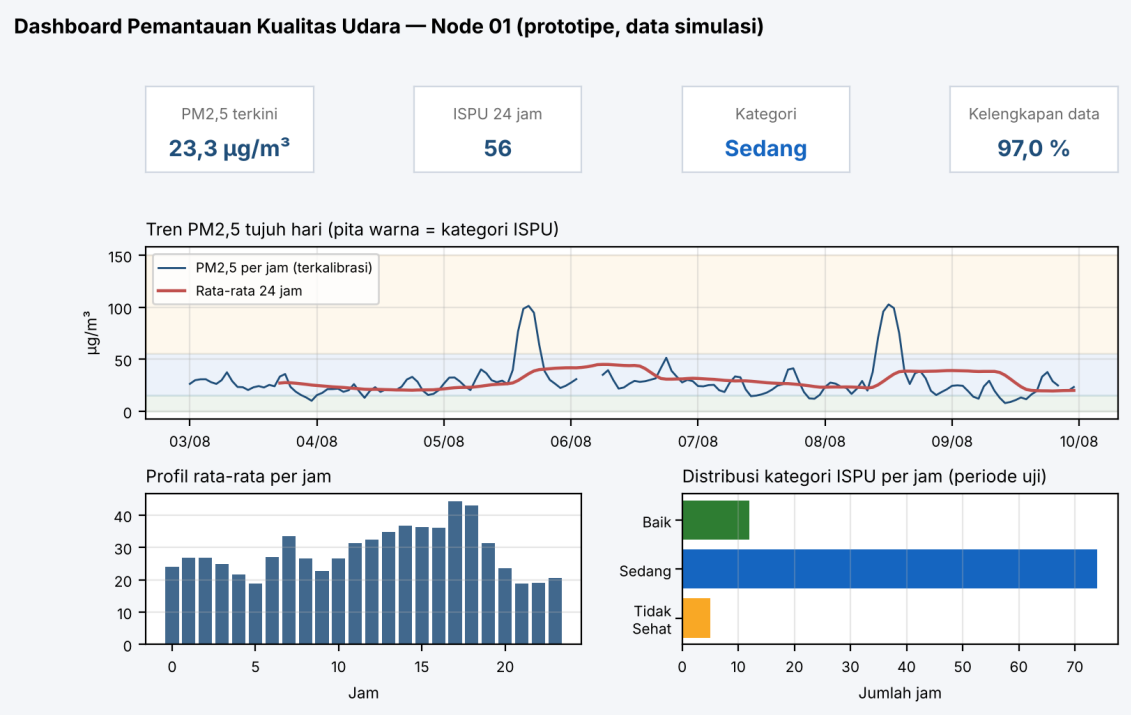
Temuan ini memiliki dua implikasi rancangan. Pertama, mekanisme simpan-lalu-kirim pada firmware perlu diprioritaskan agar kehilangan paket di jaringan dapat dipulihkan dan tidak menjadi kehilangan data permanen. Kedua, dashboard sebaiknya menampilkan status ketersediaan data secara eksplisit. Bila kelengkapan turun di bawah ambang, sistem lebih baik menampilkan keterangan "data tidak mencukupi" daripada menghitung ISPU dari data yang terlalu sedikit.

Rancangan Dashboard Analitik

Gambar 3 menunjukkan prototipe dashboard yang dibangun dengan Python. Bagian atas berisi empat ubin indikator utama: konsentrasi PM2,5 terkini, nilai ISPU 24 jam, kategori dengan warna sesuai Tabel 2, dan kelengkapan data. Pada akhir periode simulasi, dashboard menampilkan PM2,5 sebesar 23,3 µg/m³, ISPU 24 jam sebesar 56, dan kategori Sedang. Indikator kelengkapan data dicantumkan agar pengguna mengetahui seberapa banyak data yang mendasari angka yang ditampilkan.

Bagian tengah dashboard menampilkan tren tujuh hari dengan pita warna kategori ISPU sebagai latar, sehingga pengguna dapat langsung melihat kapan konsentrasi memasuki kategori yang lebih buruk. Kedua episode pencemaran tampak jelas sebagai puncak yang memasuki pita kuning (Tidak Sehat), sedangkan garis rata-rata 24 jam tetap berada pada pita Sedang. Perbedaan kedua garis ini membantu menjelaskan kepada pengguna mengapa ISPU resmi dapat menunjukkan Sedang meskipun terjadi lonjakan beberapa jam.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License



Gambar 3. Prototipe dashboard analitik pemantauan kualitas udara (data simulasi)

Bagian bawah menampilkan dua analisis. Profil rata-rata per jam menunjukkan konsentrasi tertinggi pada sore hari, sekitar 44,3 µg/m³ pada pukul 17.00, serta puncak pagi sekitar 33,6 µg/m³ pada pukul 07.00. Profil siang hari ikut terangkat karena kedua episode pencemaran terjadi pada siang hingga sore. Informasi ini berguna bagi pengelola kampus atau sekolah untuk menjadwalkan kegiatan luar ruang pada jam dengan paparan lebih rendah. Grafik distribusi kategori menunjukkan bahwa selama periode uji, 74 jam berada pada kategori Sedang, 12 jam Baik, dan 5 jam Tidak Sehat. Rancangan ini mengikuti prinsip Few (2006): menampilkan sedikit indikator yang paling penting, disertai konteks pembanding, tanpa dekorasi berlebihan.

Ketertelusuran Kebutuhan dan Hasil Pengujian

Untuk memastikan bahwa rancangan memenuhi tujuan awal, setiap kebutuhan fungsional dipetakan ke bentuk pengujian dan hasilnya, seperti ditunjukkan pada Tabel 9. Enam kebutuhan telah diverifikasi melalui pengujian perangkat lunak. Kebutuhan pengukuran oleh sensor fisik belum dapat diverifikasi karena penelitian ini belum melibatkan perangkat keras di lapangan.

Tabel 9. Ketertelusuran kebutuhan fungsional terhadap hasil pengujian

Kebutuhan fungsional	Bentuk pengujian	Hasil
Mengukur PM2,5, suhu, RH	Uji perangkat keras (tahap lanjut)	Belum diuji di lapangan
Mengirim data dengan cap waktu	Simulasi kehilangan paket dan node mati	97,0% jam valid (kehilangan 1,5%)
Menandai data tidak valid dan pencilan	Uji filter Hampel (Tabel 5)	Sensitivitas 100%, presisi 69,8%
Mengoreksi bias sensor	Uji kalibrasi periode terpisah (Tabel 6)	R^2 0,988; RMSE 1,91 µg/m³
Menghitung ISPU dan kategori	Uji unit (Tabel 4) dan kesesuaian (Tabel 7)	9/9 kasus sesuai; kategori 24 jam 100%
Menampilkan dashboard	Pembuatan prototipe (Gambar 3)	Empat indikator, tren, profil, distribusi
Mengirim peringatan dini	Uji dua episode pencemaran	2/2 terdeteksi, 0 alarm palsu

Pemetaan ini sekaligus memperlihatkan batas klaim penelitian. Bagian pengolahan data, perhitungan indeks, dan penyajian informasi telah teruji pada kondisi terkendali. Sebaliknya, keandalan sensor fisik, ketahanan perangkat terhadap cuaca, dan konsumsi energi aktual masih

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

memerlukan pengujian lapangan sebelum sistem digunakan untuk komunikasi risiko kepada masyarakat.

Implikasi Penerapan

Hasil pengujian memberikan beberapa implikasi bagi penerapan sistem. Pertama, kalibrasi bukan fitur tambahan, melainkan komponen inti. Tanpa kalibrasi, sistem yang secara teknis berjalan lancar tetap dapat menyampaikan kategori yang salah pada hampir dua pertiga waktu dan menghasilkan alarm palsu berulang. Setiap node sebaiknya ditempatkan berdampingan dengan stasiun acuan, misalnya stasiun pemantau milik pemerintah daerah, selama beberapa hari hingga beberapa minggu sebelum dipasang di lokasi target. Ko-lokasi juga perlu diulang secara berkala.

Kedua, kelembapan relatif harus diukur bersama PM2,5. Sensor suhu dan kelembapan murah seperti DHT22 menambah biaya yang relatif kecil, tetapi memungkinkan peningkatan akurasi yang besar, seperti terlihat dari perbedaan R^2 antara model sederhana dan model berganda. Hal ini terutama penting di wilayah pesisir tropis yang kelembapannya sering melampaui 85% pada malam dan pagi hari.

Ketiga, transparansi kualitas data perlu ditampilkan kepada pengguna. Indikator kelengkapan data, penandaan data yang dicurigai, dan keterangan bahwa data berasal dari sensor murah membantu masyarakat menafsirkan informasi secara proporsional. Sensor murah tidak menggantikan stasiun acuan, tetapi melengkapinya dengan cakupan ruang yang lebih rapat (Snyder et al., 2013; Morawska et al., 2018).

Keempat, rancangan berbasis perangkat lunak terbuka memudahkan replikasi oleh perguruan tinggi lain. Seluruh pipeline dapat dijalankan pada komputer biasa atau server kecil. Kode yang sama juga dapat dipakai untuk pembelajaran mata kuliah IoT, analitik data, dan pemrograman Python, sekaligus memperkenalkan mahasiswa pada isu kesehatan lingkungan di daerahnya.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan dengan data sintetis, sehingga parameter model sensor, pola harian, dan episode pencemaran merupakan asumsi yang disusun berdasarkan literatur, bukan hasil pengukuran di Bengkulu. Kinerja kalibrasi pada data nyata kemungkinan lebih rendah karena adanya variasi antarunit sensor, perubahan komposisi partikel, dan penuaan sensor yang tidak dimodelkan. Sistem juga baru dirancang untuk satu node dan satu parameter utama (PM2,5), sedangkan ISPU lengkap mencakup parameter lain seperti PM10, O_3, NO_2, SO_2, CO, dan HC. Aspek keamanan komunikasi, konsumsi energi aktual, dan kinerja jaringan pada kondisi lapangan belum diuji. Keterbatasan tersebut menjadi agenda penelitian lanjutan, terutama implementasi perangkat fisik dan ko-lokasi dengan stasiun acuan.

E. CONCLUSION (KESIMPULAN)

Penelitian ini telah merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang terdiri atas lima lapisan, dari node sensor PMS5003, DHT22, dan ESP32 hingga dashboard analitik dan peringatan dini. Fungsi perhitungan ISPU sesuai Permen LHK Nomor 14 Tahun 2020 lolos seluruh sembilan kasus uji. Pengujian software-in-the-loop selama tujuh hari menunjukkan bahwa pipeline mempertahankan 97,0% data per jam yang valid meskipun terjadi kehilangan paket dan pemadaman node.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Filter Hampel dengan jendela 31 menit dan ambang 6 mendeteksi seluruh lonjakan sensor dengan presisi 69,8%. Kalibrasi regresi berganda yang memasukkan kelembapan relatif meningkatkan R^2 dari −1,91 menjadi 0,988 dan menurunkan RMSE dari 30,06 menjadi 1,91 $\mu g/m^3$, jauh lebih baik daripada regresi linear sederhana. Setelah kalibrasi, kesesuaian kategori ISPU per jam dengan data acuan naik dari 45,1% menjadi 97,8%, dan aturan peringatan dini mendeteksi kedua episode pencemaran tanpa alarm palsu, dibandingkan 14 alarm palsu pada data mentah.

Uji ketahanan menunjukkan bahwa pipeline tetap andal hingga tingkat kehilangan paket 10%. Pada tingkat 20–30%, ketersediaan ISPU 24 jam turun tajam karena aturan kelengkapan per jam tidak terpenuhi. Hal ini menegaskan pentingnya mekanisme simpan-lalu-kirim pada node dan penyajian status kelengkapan data di dashboard.

Dengan demikian, sistem IoT berbiaya rendah dapat menghasilkan informasi kualitas udara yang bermakna bila dilengkapi validasi data, kalibrasi berbasis kelembapan, dan penyajian yang transparan. Penelitian lanjutan disarankan untuk membangun prototipe fisik, melakukan ko-lokasi dengan stasiun acuan di Kota Bengkulu, memperluas jaringan menjadi beberapa node, serta menambahkan parameter ISPU lainnya.

F. BIBLIOGRAPHY (DAFTAR PUSTAKA)

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(4), 2347–2376. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. Computer Networks, 54(15), 2787–2805. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010

Barkjohn, K. K., Gantt, B., & Clements, A. L. (2021). Development and application of a United States-wide correction for PM2.5 data collected with the PurpleAir sensor. Atmospheric Measurement Techniques, 14, 4617–4637. https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021

Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? Environment International, 99, 293–302. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007

Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys, 41(3), 15. https://doi.org/10.1145/1541880.1541882

Few, S. (2006). Information dashboard design: The effective visual communication of data. O'Reilly Media.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660. https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Hampel, F. R. (1974). The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the American Statistical Association, 69(346), 383–393. https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482962

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., … Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585, 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Karagulian, F., et al. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. Atmospheric Environment, 213, 236–248. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.057

Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. Environmental Pollution, 221, 491–500. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2020). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 774.

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. Environment International, 75, 199–205. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019

McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 56–61.

Morawska, L., et al. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? Environment International, 116, 286–299. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018

OASIS. (2019). MQTT version 5.0: OASIS standard. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html

Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J., & Gabbouj, M. (2016). Generalized Hampel filters. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016, 87. https://doi.org/10.1186/s13634-016-0383-6

Snyder, E. G., et al. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. Environmental Science & Technology, 47(20), 11369–11377. https://doi.org/10.1021/es4022602

United States Environmental Protection Agency. (2022). Air sensor guidebook. https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. WHO. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Zheng, T., et al. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. Atmospheric Measurement Techniques, 11, 4823–4846. https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License