

Pengembangan *Dashboard* Berbasis *Web* Untuk Pemantauan Emisi Kapal Secara *Real-Time* Menggunakan Grafana dan Kerangka IoT

*Mega Suci Lestari¹, Puteri Tonisa²

^{1,2}Teknik Informatika S-2, Program Pascasarjana, Universitas Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten
e-mail: ¹mega.sucilestari@gmail.com; ²putritonisa@gmail.com

Abstrak—Penelitian ini menyajikan perancangan dan implementasi dashboard pemantauan berbasis web untuk sistem emisi kapal yang dikembangkan dengan kerangka kerja Internet of Things (IoT). Dashboard dibangun menggunakan Grafana yang terhubung ke database time-series InfluxDB dan diintegrasikan melalui Node-RED sebagai jalur pengelolaan data. Fungsi utamanya adalah menampilkan parameter gas buang CO₂, CO, NO₂, SO₂, dan O₂ yang diterima dari sensor IoT secara real-time. Dashboard menyediakan grafik dinamis, indikator gauge, serta sistem peringatan berbasis warna untuk membantu pengguna memantau perubahan emisi secara langsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dashboard mampu menampilkan data dengan waktu tunda rata-rata 1,8 detik, tingkat kehilangan paket di bawah 0,1%, dan uptime mencapai 99,5% selama 24 jam operasi berkelanjutan. Antarmuka pengguna dirancang responsif dan dapat diakses melalui berbagai perangkat secara daring. Implementasi ini menunjukkan bahwa dashboard Grafana berbasis open-source yang terintegrasi dengan Node-RED dan InfluxDB memberikan solusi efisien, andal, dan berbiaya rendah untuk visualisasi data emisi kapal secara real-time, serta mendukung kegiatan pemantauan lingkungan dan riset kemaritiman.

Kata Kunci— Dashboard, Emisi Kapal, Grafana, IoT, Node-RED

I. PENDAHULUAN

Sektor maritim telah mengalami peningkatan perhatian global karena kontribusinya terhadap emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Menurut Organisasi Maritim Internasional (IMO), kapal menyumbang hampir 3% dari emisi CO₂ global, terutama dari pembakaran bahan bakar di mesin kapal [1]. Penerapan peraturan internasional yang lebih ketat, seperti MARPOL Annex VI, telah mendorong operator kapal untuk mengadopsi sistem pemantauan emisi berkelanjutan untuk memastikan kepatuhan terhadap batas yang diizinkan untuk karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), karbon monoksida (CO), dan oksigen (O₂) [2]. Metode pemantauan konvensional yang didasarkan pada pengambilan sampel manual dan pengujian laboratorium seringkali memakan waktu, mahal, dan tidak mampu memberikan wawasan secara real-time tentang dinamika emisi [3]. Keterbatasan ini menyoroiti kebutuhan mendesak akan solusi pemantauan otomatis dan berkelanjutan yang dapat memberikan umpan balik instan kepada operator kapal dan otoritas lingkungan.

Munculnya Internet of Things (IoT) telah memungkinkan akuisisi dan pemrosesan data secara real-time dari sensor yang tersebar, menyediakan kerangka kerja yang ampuh untuk aplikasi pemantauan lingkungan [4],[5]. Sistem pemantauan emisi berbasis IoT biasanya menggunakan arsitektur berlapis yang menghubungkan sensor di atas kapal ke server cloud melalui protokol komunikasi ringan seperti Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Arsitektur ini memungkinkan transmisi dan penyimpanan data sensor dalam jumlah besar secara lancar dan dapat mempertahankan konsumsi daya rendah dan latensi minimal [6]. Dalam operasi maritim, dashboard visual menerjemahkan aliran data emisi yang berkelanjutan ke dalam representasi grafis yang intuitif, memungkinkan para insinyur dan regulator untuk menilai kepatuhan dan mendeteksi anomali secara real-time [7]. Namun, mendesain dashboard yang tangguh dan mampu menangani input sensor frekuensi tinggi serta mempertahankan konsistensi visualisasi di bawah kondisi jaringan yang berfluktuasi tetap menjadi tantangan teknis. Banyak dashboard yang ada mengalami keterlambatan pembaruan data, skalabilitas yang buruk, atau opsi kustomisasi yang terbatas [8],[9].

Perangkat lunak sumber terbuka telah muncul sebagai solusi praktis dan fleksibel untuk mengembangkan sistem tersebut. Perangkat seperti Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, dan Grafana telah mendapatkan popularitas di komunitas IoT karena desain modularnya, biaya implementasi yang rendah, dan interoperabilitas yang kuat [10],[11]. Perangkat-perangkat ini secara kolektif membentuk lapisan sumber terbuka lengkap yang mampu mendukung sistem pemantauan IoT [12]. Terlepas dari keunggulan-keunggulan ini, hanya sedikit penelitian yang secara eksplisit membahas optimasi kinerja dan evaluasi kegunaan dashboard berbasis Grafana dalam aplikasi maritim secara real time [13]. Penelitian sebelumnya seringkali memperlakukan

dashboard hanya sebagai antarmuka keluaran daripada sebagai komponen integral yang menentukan responsivitas sistem dan keterlibatan pengguna [14]. Dalam pemantauan lingkungan, frekuensi pembaruan data, latensi antara input sensor dan output visualisasi, serta konsistensi rendering grafis merupakan faktor-faktor penting yang memengaruhi akurasi pengambilan keputusan.

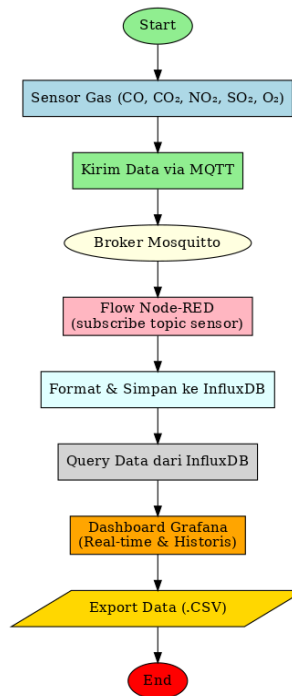
Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pendekatan berbasis dashboard, yang menekankan lapisan visualisasi sebagai komponen fungsional inti dan bukan sebagai modul tampilan tambahan. Kerangka kerja yang diusulkan berfungsi sebagai referensi praktis untuk mengembangkan dashboard lingkungan sumber terbuka yang dapat diskalakan dan dapat diterapkan tidak hanya pada pengendalian emisi maritim tetapi juga pada domain yang lebih luas seperti pelabuhan pintar, pelacakan polusi industri, dan sistem kepatuhan lingkungan secara real-time.

II. METODE PENELITIAN

Metodologi studi ini berfokus pada desain dan implementasi arsitektur pemantauan berbasis IoT yang berpusat pada dashboard untuk visualisasi emisi gas buang kapal secara real-time. Sistem ini menggunakan struktur modular empat lapis. Pengumpulan, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data [15].

II.1 Arsitektur Umum Sistem

Dashboard pemantauan emisi kapal dibangun sebagai bagian akhir dari sistem IoT yang lebih luas. Data emisi dikirim oleh mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke beberapa sensor gas, lalu diteruskan melalui broker MQTT (Mosquitto) ke Node-RED. Node-RED berfungsi sebagai middleware yang mengelola aliran data sebelum disimpan di database InfluxDB. Selanjutnya, Grafana digunakan untuk menampilkan data secara visual melalui antarmuka web. Dengan kata lain, sistem dashboard merupakan titik temu antara data IoT dan pengguna, yang dirancang agar dapat diakses dari berbagai perangkat seperti laptop, tablet, maupun smartphone secara real-time [16]. Proses keseluruhan digambarkan pada Gambar 1, yang menunjukkan algoritma alur kerja sistem monitoring mulai dari pembacaan sensor hingga visualisasi pada dashboard Grafana.



Gambar 1. Algoritma dari Sistem Monitoring

Konfigurasi utama sistem dibuat di Node-RED untuk menghubungkan aliran data dari broker MQTT ke database. Node MQTT In digunakan untuk menerima data dalam format JSON, kemudian function node melakukan parsing dan pemetaan nilai gas ke masing-masing field sebelum dikirim ke InfluxDB menggunakan InfluxDB Out node. Untuk spesifikasi kebutuhan aplikasi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Kebutuhan Aplikasi

Komponen	Spesifikasi
Hardware Node	ESP32, multiplexer IC, sensor gas (CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , O ₂), modul LoRa/Wi-Fi.
Hardware Gateway	VPS/Server berbasis Linux (broker MQTT, Node-RED, database, dashboard).
Software Gateway	Mosquitto MQTT Broker, Node-RED, InfluxDB, Grafana.
Jaringan	Wi-Fi (2.4 GHz) / Ethernet / LoRa (≥ 500 m), latensi < 2 detik.
Database	InfluxDB (<i>time-series database</i> untuk data emisi).
Dashboard	Web-based Grafana, multi-user access (Admin & User).

II.2 Lapisan Akuisisi Data

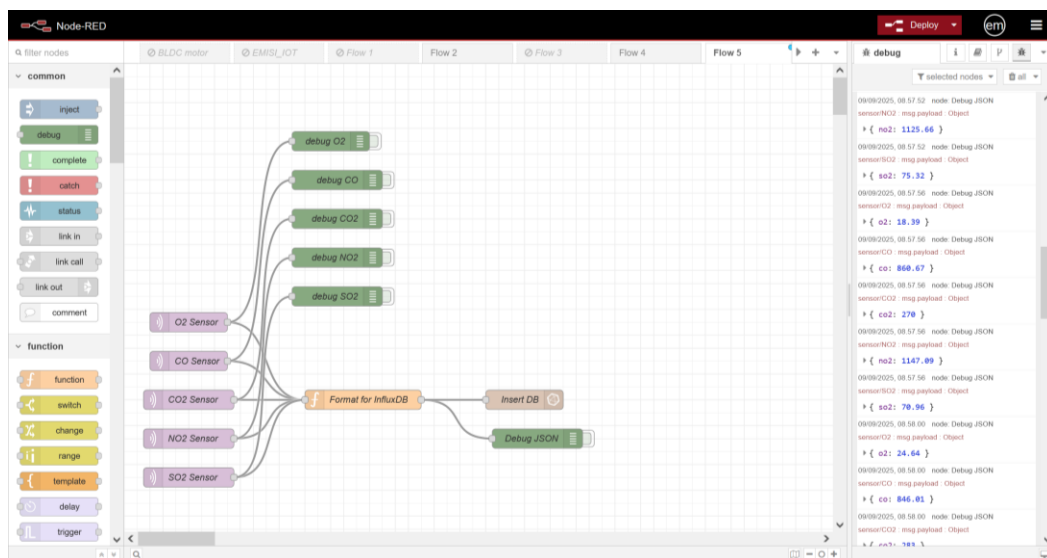
Lapisan akuisisi data terdiri dari jaringan sensor gas yang dipasang di saluran keluar cerobong kapal. Setiap sensor dirancang untuk menangkap konsentrasi gas polutan tertentu yaitu CO₂, CO, NO₂, SO₂, O₂. Sensor-sensor tersebut dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32, yang bertindak sebagai unit pengumpulan dan transmisi data lokal. ESP32 dipilih karena konsumsi dayanya yang rendah, kemampuan Wi-Fi terintegrasi, dan kompatibilitas tinggi dengan protokol IoT berbasis MQTT [17].

Mikrokontroler secara berkala membaca keluaran sensor melalui saluran konverter analog-ke-digital (ADC) dan memformat data ke dalam paket JSON yang berisi ID sensor, stempel waktu, dan nilai konsentrasi gas [18]. Paket data ini kemudian ditransmisikan secara nirkabel ke server pusat menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), yang beroperasi pada port 1883. ESP32 mempublikasikan data ke topik MQTT yang telah ditentukan sebelumnya (misalnya, “ship/emission/data”), memastikan bahwa komponen hilir dapat berlangganan dan memproses data secara asinkron. Laju pengambilan sampel ditetapkan pada 2 Hz, menyeimbangkan efisiensi transmisi dan responsivitas visualisasi [19].

II.3 Lapisan Transmisi Data

Lapisan transmisi menggunakan broker Mosquitto MQTT, yang diimplementasikan pada Virtual Private Server (VPS) yang dihosting di alamat IP 10.6.0.70. Broker berfungsi sebagai perantara yang mengelola perutean pesan antara sensor (penerbit) dan mesin pemroses (pelanggan) [20]. Arsitektur ini memisahkan produsen dan konsumen data, sehingga meningkatkan skalabilitas dan keandalan sistem.

Alur data dikelola oleh Node-RED. Di dalam Node-RED, sebuah node MQTT In berlangganan topik emisi dari broker Mosquitto. Muatan JSON yang masuk diuraikan dan diproses melalui node Fungsi, yang melakukan operasi-operasi seperti konversi nilai sensor berbasis string ke dalam bentuk numerik, normalisasi satuan data (ppm ke mg/m³ jika berlaku), dan pemberian cap waktu pada setiap catatan menggunakan jam server untuk sinkronisasi.

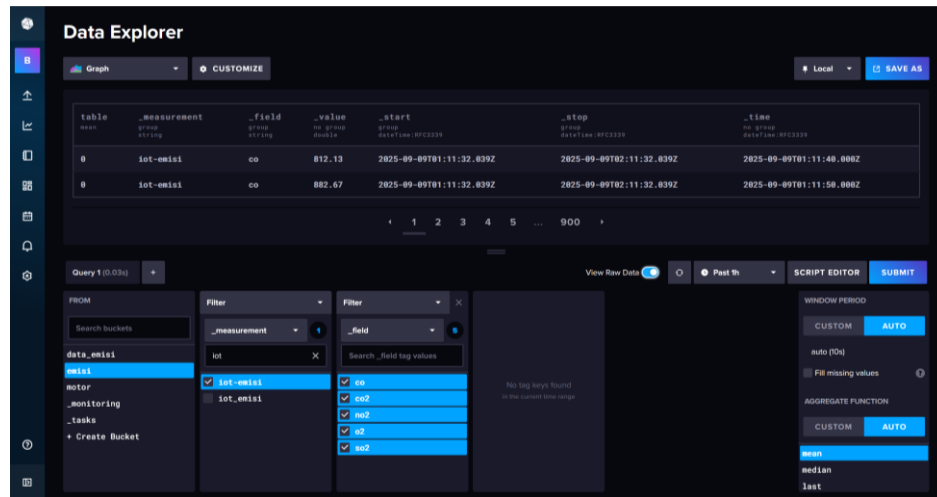


Gambar 2. Konfigurasi Alur Node-RED

Data yang telah diproses kemudian diteruskan ke node InfluxDB Out untuk penyimpanan. Gambar 2 mengilustrasikan alur pemrosesan data Node-RED, menunjukkan konektivitas antara input MQTT, fungsi pemrosesan, dan output basis data [21].

II.4 Lapisan Penyimpanan Data

Untuk manajemen data deret waktu yang efisien, penelitian ini menggunakan InfluxDB, sebuah basis data berkinerja tinggi yang dioptimalkan untuk pencatatan data sekuensial dan kueri temporal. Basis data tersebut dikonfigurasi untuk menyimpan data dalam bucket khusus bernama “emisi”, yang berisi beberapa pengukuran yang sesuai dengan setiap parameter gas (misalnya, CO, CO₂, NO₂, SO₂, dan O₂). Setiap entri pengukuran mencakup stempel waktu, ID sensor, dan nilai. Gambar 3 menyajikan struktur skema InfluxDB, termasuk definisi field dan pengindeksan berbasis tag untuk pengambilan data yang cepat. Desain skema ini memungkinkan Grafana untuk melakukan query nilai emisi dalam rentang waktu kustom secara efisien, mendukung analisis tren jangka pendek dan jangka panjang. Kebijakan retensi InfluxDB ditetapkan selama 90 hari, memastikan efisiensi pengarsipan data tanpa mengorbankan kinerja. Proses pencadangan dan pemulihan diotomatiskan menggunakan skrip CLI Influx, memungkinkan basis data dipulihkan jika terjadi gangguan system [22].

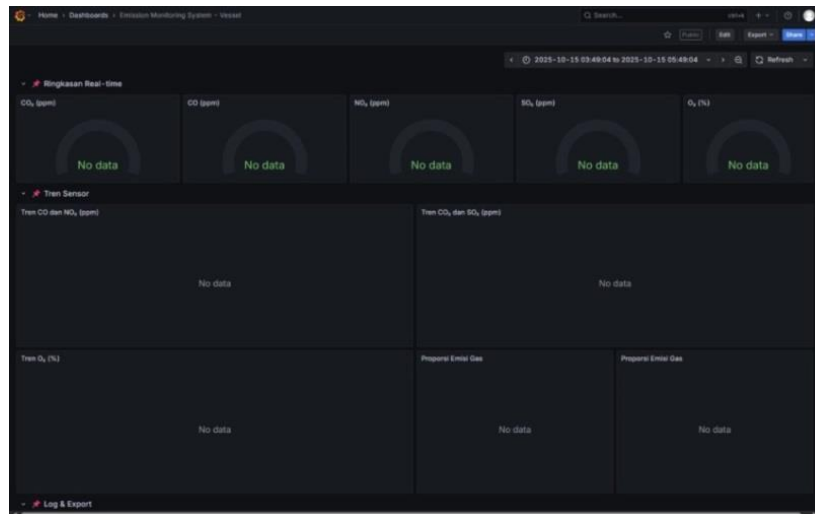


id	measurement	field	value	start	stop	time
0	iot-emisi	co	812.13	2025-09-09T01:11:32.839Z	2025-09-09T02:11:32.839Z	2025-09-09T01:11:40.000Z
0	iot-emisi	co	882.67	2025-09-09T01:11:32.839Z	2025-09-09T02:11:32.839Z	2025-09-09T01:11:58.000Z

Gambar 3. Skema Basis Data InfluxDB

II.5 Lapisan Visualisasi Data

Lapisan visualisasi merupakan kebaruan utama dari penelitian ini, karena mengubah data numerik menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti melalui dashboard berbasis web interaktif. Dashboard ini dikembangkan menggunakan Grafana, yang dipilih karena fleksibilitasnya, kemampuan perluasan sumber terbuka, dan kemampuan rendering waktu nyata. Grafana terhubung langsung ke InfluxDB melalui plugin sumber data asli, memungkinkannya untuk memvisualisasikan data emisi yang masuk tanpa middleware tambahan [23]. Gambar 4 menampilkan antarmuka dasbor Grafana. Dashboard dibagi menjadi beberapa panel yang masing-masing menampilkan parameter gas emisi (CO₂, CO, NO₂, SO₂, dan O₂). Setiap panel dilengkapi dengan jenis tampilan berbeda sesuai kebutuhan analisis, seperti *gauge indicator* untuk nilai tunggal terkini dan *time-series chart* untuk tren waktu. Grafik Deret Waktu yang menggambarkan variasi temporal dan tren emisi historis selama interval waktu yang ditentukan pengguna, Diagram Lingkaran Menunjukkan kontribusi proporsional masing-masing gas terhadap total emisi dan Tabel Data. Skema koneksi ditunjukkan melalui konfigurasi query language (Flux) di Grafana, yang memanggil data berdasarkan waktu pengambilan terakhir dari InfluxDB. Format data ditransmisikan dalam bentuk timestamp sehingga setiap nilai sensor dapat divisualisasikan secara berurutan sesuai waktu. Dalam tahap konfigurasi, setiap panel juga diberi batas ambang warna (threshold) untuk membantu pengguna mengenali nilai emisi yang melampaui batas normal [24].



Gambar 4. Antarmuka Dasbor Grafana

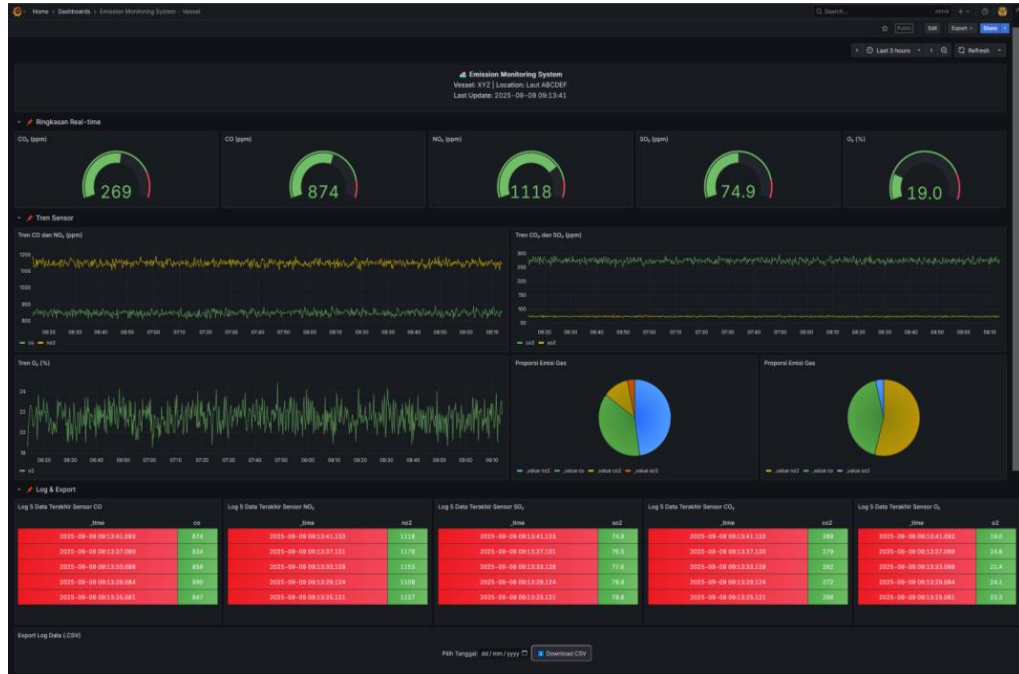
Selain visualisasi utama, dashboard dilengkapi dengan real-time refresh interval 5 detik dan fitur alert system berbasis warna (hijau, kuning, merah) yang otomatis menyesuaikan dengan nilai sensor. Seluruh tampilan dirancang responsif menggunakan Grafana layout grid, sehingga tetap proporsional ketika diakses dari berbagai ukuran layar perangkat [25], [26]. Pengguna dapat mengubah rentang waktu pengamatan, memperbesar grafik. Sistem ini juga mendukung ekspor data dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut dalam perangkat lunak statistik seperti R, Python, atau MATLAB. Seluruh dasbor beroperasi di dalam peramban web, dapat diakses melalui <http://10.6.0.70:3000>, dan dapat dilihat secara bersamaan oleh banyak pengguna melalui autentikasi berbasis peran.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pemantauan emisi kapal berbasis IoT yang diusulkan telah diimplementasikan dan diuji untuk mengevaluasi kinerja waktu nyata, stabilitas, skalabilitas, dan kemudahan penggunaannya. Implementasi tersebut melibatkan pengintegrasian beberapa sensor gas. Sensor CO, CO₂, SO₂, NO₂, dan O₂ terhubung ke mikrokontroler ESP32 untuk akuisisi data berkelanjutan. Pembacaan setiap sensor ditransmisikan melalui protokol MQTT melalui broker Mosquitto, diproses oleh Node-RED, disimpan di InfluxDB, dan divisualisasikan di Grafana. Seluruh kerangka kerja dihosting pada server lokal dengan konfigurasi IP publik yang dapat diakses oleh banyak pengguna secara bersamaan.

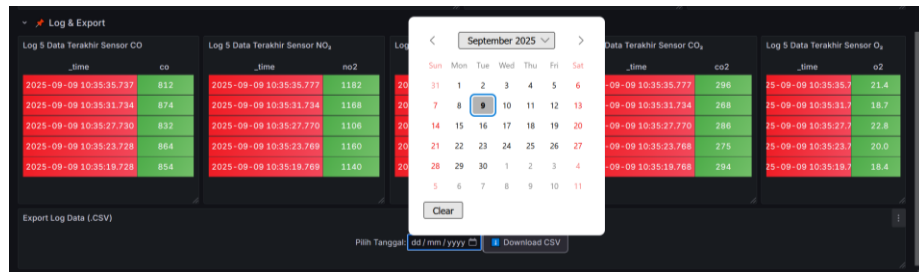
Selama operasi terus menerus 24 jam, sistem menunjukkan kinerja real-time yang kuat dengan latensi rata-rata sekitar 1,8 detik antara akuisisi data dan visualisasi dashboard. Kehilangan paket tetap di bawah 0,1%, yang menegaskan keandalan komunikasi MQTT untuk kondisi jaringan maritim yang terbatas, di mana latensi dan stabilitas paket sangat penting. Interval penyegaran dashboard, yang dikonfigurasi pada tiga detik, memastikan visualisasi mendekati real-time sambil mempertahankan stabilitas tinggi bahkan di bawah koneksi Wi-Fi yang tidak stabil. Dibandingkan dengan kerangka kerja visualisasi IoT lainnya seperti ThingSpeak dan Blynk, dashboard berbasis Grafana yang diusulkan mencapai penyegaran data rata-rata 28% lebih cepat dan konsistensi kueri yang lebih tinggi. Penggunaan InfluxDB sebagai basis data deret waktu memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi kinerja, memungkinkan volume data yang besar untuk dikueri dan ditampilkan di Grafana dengan penundaan minimal. Hasil ini mendukung temuan sebelumnya yang menyoroti penanganan data lingkungan deret waktu yang lebih unggul oleh InfluxDB dibandingkan dengan basis data relasional tradisional [27][28].

Antarmuka dashboard akhir, yang ditunjukkan pada Gambar 5, menyediakan visualisasi yang lengkap. Setiap panel pengukur menampilkan nilai sesaat dari gas yang dipantau dengan ambang batas berkode warna. Hijau untuk tingkat aman, kuning untuk waspada, dan merah untuk tingkat emisi kritis. Panel deret waktu menampilkan tren selama rentang tanggal khusus, sementara diagram lingkaran menunjukkan komposisi relatif dari setiap gas polutan.



Gambar 5. antarmuka dasbor akhir

Pengguna dapat memfilter data, memperbesar interval tertentu, dan mengekspor catatan historis dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut menggunakan alat seperti Excel, R, atau Python, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan hasilnya pada Tabel 1. Kemampuan visualisasi ini memastikan bahwa data emisi tidak hanya dipantau secara terus menerus tetapi juga mudah diinterpretasikan dan siap untuk pelaporan regulasi.



Gambar 6. Mengekspor catatan historis dalam format CSV

Tabel 2. Hasil Ekspor CSV

Waktu	Nilai Sensor				
	CO	CO2	NO2	O2	SO2
2025-08-25T23:46:30.198Z	0	0	0	100	0
2025-08-25T23:46:49.562Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:25.111Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:26.075Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:27.107Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:28.015Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:28.988Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:29.785Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:30.668Z	60	50	30	100	80

2025-08-25T23:53:31.699Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:33.344Z	60	50	30	100	80
2025-08-25T23:53:34.371Z	60	50	30	100	80

Pengujian keandalan sistem selama periode 72 jam mengungkapkan waktu operasional 99,5%, dengan gangguan minimal yang disebabkan oleh gangguan jaringan sementara. Arsitektur Node-RED secara otomatis terhubung kembali ke broker MQTT selama pemutusan sementara, memastikan kontinuitas data tanpa memerlukan intervensi manual. Hal ini menegaskan kekokohan desain sistem dalam menjaga stabilitas operasional jangka panjang dalam kondisi komunikasi maritim yang realistis.

Hasil ini memvalidasi bahwa arsitektur yang diusulkan menawarkan keandalan operasional dan skalabilitas visualisasi. Struktur modular dari lapisan IoT terdiri dari Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, dan Grafana. Hal ini memungkinkan integrasi tanpa hambatan dari node sensor tambahan atau layanan analitik tanpa perlu mengkonfigurasi ulang sistem yang ada. Selain itu, penggunaan teknologi open-source secara signifikan mengurangi biaya penerapan sekaligus memberikan fleksibilitas tinggi untuk kustomisasi, sebuah keunggulan yang seringkali tidak dimiliki oleh sistem SCADA industri berpemilik. Pendekatan ini sejalan dengan tren penelitian terkini yang mendukung kerangka kerja IoT open-source dalam pemantauan industri dan lingkungan.

Temuan utama penelitian ini terletak pada penekanannya pada dashboard sebagai komponen sentral dari sistem pemantauan, bukan sebagai alat visualisasi sekunder. Dengan berfokus pada optimasi dashboard, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan responsivitas visualisasi secara langsung meningkatkan kesadaran situasional dan efisiensi pengambilan keputusan. Dashboard berbasis Grafana memastikan bahwa aliran data emisi yang kompleks diubah menjadi informasi visual yang mudah diakses dan diinterpretasikan, memungkinkan operator untuk mendeteksi anomali secara instan. Selain itu, kombinasi kontrol aliran Node-RED dan penyimpanan deret waktu yang dioptimalkan oleh InfluxDB menjamin bahwa konsistensi data tetap terjaga bahkan dalam kondisi konektivitas yang bervariasi.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi sistem dashboard berbasis web waktu nyata untuk pemantauan emisi kapal menggunakan kerangka kerja IoT sumber terbuka yang terdiri dari Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, dan Grafana. Sistem ini secara efektif memantau kadar CO, CO₂, SO₂, NO₂, dan O₂ dengan responsivitas tinggi (latensi rata-rata 1,8 detik), waktu aktif 99,5%, dan kehilangan paket minimal. Penelitian ini memperkenalkan arsitektur berpusat pada dashboard di mana visualisasi tidak hanya berfungsi sebagai antarmuka tampilan tetapi sebagai komponen integral dari ekosistem IoT, yang secara langsung memengaruhi persepsi pengguna dan interpretasi data. Integrasi Grafana yang baik dengan InfluxDB dan Node-RED memastikan visualisasi waktu nyata yang sinkron dan stabilitas sistem yang andal.

Selain pemantauan emisi kapal, kerangka kerja yang diusulkan menawarkan model yang terukur dan mudah beradaptasi yang dapat diterapkan pada berbagai domain IoT lingkungan seperti pelabuhan pintar, pelacakan emisi industri, dan penginderaan oseanografi. Peningkatan di masa mendatang akan berfokus pada penggabungan analitik prediktif berbasis AI untuk deteksi anomali dini, memungkinkan pemantauan armada terdistribusi untuk analisis komparatif, dan meningkatkan kecerdasan dashboard melalui visualisasi adaptif dan antarmuka pengguna multibahasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Kramel *et al.*, "Global Shipping Emissions from a Well-to-Wake Perspective: The MariTEAM Model," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 22, pp. 15040–15050, 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c03937.
- [2] L. Fan, H. Yang, and X. Zhang, "Targeting the Effectiveness Assessment of the Emission Control Policies on the Shipping Industry," *Sustain.*, vol. 16, no. 6, 2024, doi: 10.3390/su16062465.
- [3] J. G. K. and A. U. U. Abdulrasheed O. Abdulganiyu, "Development Of An Internet Of Things Based Air Quality Monitoring System Using Machine Learning," pp. 276–282, 2023.
- [4] A. S. P. Pamula, A. Ravilla, and S. V. H. Madiraju, "Applications of the Internet of Things (IoT) in Real-Time Monitoring of Contaminants in the Air, Water, and Soil †," *Eng. Proc.*, vol. 27, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ecs-a-9-13335.
- [5] M. C. Radha, M. M. Madheswaran, M. M. Lokesh, and M. M. M. Althaf, "Environmental Monitoring in Internet of Things (IoT)," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 1658–1663, 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.60086.
- [6] C. D'ortona, D. Tarchi, and C. Raffaelli, "Open-Source MQTT-Based End-to-End IoT System for Smart City Scenarios," *Futur. Internet*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/fi14020057.
- [7] F. Zhou, J. Liu, H. Zhu, X. Yang, and Y. Fan, "A Real-Time Measurement-Modeling System for Ship Air Pollution Emission Factors," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 6, 2022, doi: 10.3390/jmse10060760.
- [8] C. Bachechi, L. Po, and F. Rollo, "Big Data Analytics and Visualization in Traffic Monitoring," *Big Data Res.*, vol. 27, p. 100292, 2022, doi:

- 10.1016/j.bdr.2021.100292.
- [9] P. Moens *et al.*, “Scalable fleet monitoring and visualization for smart machine maintenance and industrial iot applications,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 15, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/s20154308.
- [10] O. E. Guijarro-Rubio, D. R. Vinocunga-Pillajo, O. Del Real-Fleites, E. Guardado-Yordi, and A. Pérez-Martínez, “Monitoring of environmental variables in greenhouse crops through an IoT wireless sensor network,” *DYNA*, vol. 92, no. 235, pp. 47–56, 2025, doi: 10.15446/dyna.v92n235.115402.
- [11] T. Domínguez-Bolaño, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, “An IoT system for a smart campus: Challenges and solutions illustrated over several real-world use cases,” *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 25, no. January, p. 101099, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101099.
- [12] M. Guerbaoui *et al.*, “From Data to Decisions: A Smart IoT and Cloud Approach to Environmental Monitoring,” *E3S Web Conf.*, vol. 601, pp. 1–13, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202560100008.
- [13] M. A. A. Radia, M. K. E. Nimr, and A. S. Atlam, “IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis,” *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 6, no. August, p. 100348, 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100348.
- [14] A. Mehdi, M. K. Bali, S. I. Abbas, and M. Singh, “Unleashing the Potential of Grafana: A Comprehensive Study on Real-Time Monitoring and Visualization,” *2023 14th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2023*, 2023, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10306699.
- [15] J. Zhao and T. Tong, “A Ship Exhaust Gas Monitoring Equipment based on NB-IoT,” *Front. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 11, pp. 7–17, 2022, doi: 10.54691/fse.v2i11.2971.
- [16] S. A. Bagal, N. K. Choudhari, and A. R. Chaudhari, “Development of Internet of Things (IoT) Based Monitoring of Hazardous Exhaust Compounds in Air - A Review,” *ITM Web Conf.*, vol. 50, p. 01002, 2022, doi: 10.1051/itmconf/20225001002.
- [17] I. Nur Fajar and S. Prayogi, “Monitoring CO₂ and SO₂ Exhaust Gas Emissions on Tanker Ships With An IoT Based PLC Controller,” *J. Emerg. Supply Chain. Clean Energy. Process Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 31–36, 2024, doi: 10.57102/jescee.v3i1.80.
- [18] A. U. Khan, M. E. Khan, M. Hasan, W. Zakri, W. Alhazmi, and T. Islam, “An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring,” *Sustain.*, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/su142416630.
- [19] S. Banerjee, P. Kumari, and T. Maity, “Development of MQTT Protocol-Based Sensor Data Subscription Using Raspberry-Pi as a Server Mode for IIoT Application,” *2024 IEEE Int. Conf. Smart Power Control Renew. Energy, ICSPCRE 2024*, pp. 1–5, 2024, doi: 10.1109/ICSPCRE62303.2024.10675281.
- [20] B. Mishra and A. Kertesz, “The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
- [21] N. N. Kumar and M. P. Panchal, “Building a Secure IoT Platform for Smart Home Automation: A Comprehensive Integration,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 302–309, 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.57917.
- [22] G. S and Sowmya, “Real Time Environmental Time Series Data Analysis Using Influx DB,” *Int. J. Adv. Sci. Innov.*, vol. 01, no. 01, pp. 1–5, 2020, doi: 10.5281/zenodo.4641703.
- [23] M. Mayer, A. Mohapatra, and V. S. Peric, “IoT Integration for Combined Energy Systems at the CoSES Laboratory,” *7th IEEE World Forum Internet Things. WF-IoT 2021*, pp. 195–200, 2021, doi: 10.1109/WF-IoT51360.2021.9596000.
- [24] M. W. Jones *et al.*, “National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850,” *Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 1–23, 2023, doi: 10.1038/s41597-023-02041-1.
- [25] A. A. Rahmadani, Y. W. Syaifudin, B. Setiawan, Y. Y. F. Panduman, and N. Funabiki, “Enhancing Campus Environment: Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web Technologies,” *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 1–26, 2025, doi: 10.3390/jsan14010002.
- [26] M. N. A. Ramadan, M. A. H. Ali, S. Y. Khoo, M. Alkhedher, and M. Alherbawi, “Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 283, no. August, p. 116856, 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116856.
- [27] J. Mostafa, S. Wehbi, S. Chilingaryan, and A. Kopmann, *SciTS: A Benchmark for Time-Series Databases in Scientific Experiments and Industrial Internet of Things*, vol. 1, no. 1. Association for Computing Machinery, 2022. doi: 10.1145/3538712.3538723.
- [28] B. Shah, P. M. Jat, and K. Sasidhar, “Performance Study of Time Series Databases,” *Int. J. Database Manag. Syst.*, vol. 14, no. 5, pp. 1–13, 2022, doi: 10.5121/ijdms.2022.14501.