PEMANTAUAN KUALITAS UDARA BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK MITIGASI POLUTAN URBAN

Santosa Edy Wibowo[1], Jarot Sugiharto[2], Sumastriendi Arifar Sindapati[3], Reni Listiana[4], Riri Damayanti Apnena[5]

[1,5] *Program Studi Mekanik Industri dan Desain- Politeknik TEDC Bandung*
[2,3,4] *Program Studi Teknik Otomasi– Politeknik TEDC Bandung*
Jl. Politeknik-Pesantren KM2 Cibabat Cimahi Utara – Cimahi Jawa Barat - Indonesia
santosaedy@poltektedc.ac.id, jarot.sugiharto@poltektedc.ac.id, sumastriendi@poltektedc.ac.id, renilistiana@poltektedc.ac.id, riri.damayanti.apnena@poltektedc.ac.id
Correspondent Email: santosaedy@poltektedc.ac.id

Abstrak —Krisis kualitas udara di kawasan urban, terutama terkait peningkatan polutan Karbon Monoksida (CO) dan Particulate Matter (PM2.5), telah menjadi tantangan kesehatan global yang mendesak di Indonesia. Meskipun sistem pemantauan tetap (AQMS) telah tersedia, keterbatasan resolusi spasial dan biaya operasional yang tinggi menghambat deteksi polusi pada skala mikro. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor berbiaya rendah (MQ-7 untuk CO dan sensor laser untuk PM2.5). Metodologi yang digunakan mencakup integrasi algoritma kalibrasi untuk meningkatkan akurasi data di iklim tropis, optimasi daya melalui mode Deep Sleep, serta pemetaan spasiotemporal menggunakan robot mobile untuk mengidentifikasi "titik panas" polusi. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sistem yang menjanjikan, yakni mencapai 94,34% untuk CO dan 81,15% untuk PM2.5 dibandingkan dengan alat referensi standar. Kesimpulan utama penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sensor mikro yang murah namun terkalibrasi mampu menyediakan data resolusi tinggi untuk mendukung kebijakan kota cerdas (Smart City) serta menyediakan mekanisme mitigasi otomatis melalui sistem ionisasi dan filtrasi untuk melindungi kesehatan masyarakat.

Kata Kunci — IoT, ESP32, Kualitas Udara, PM2.5, Karbon Monoksida, Mitigasi Polutan

I. PENDAHULUAN

Krisis kualitas udara di kawasan urban telah bertransformasi menjadi salah satu tantangan lingkungan dan kesehatan global yang paling mendesak di abad ke-21. Fenomena peningkatan kadar polutan seperti Karbon Monoksida (CO) dan Partikulat Materi (PM2.5) tidak lagi hanya menjadi isu ekologi, melainkan telah menjadi determinan utama dalam beban kesehatan masyarakat di kota-kota besar Indonesia.[1]

Data historis menunjukkan bahwa emisi dari sektor transportasi, aktivitas industri, dan pembakaran biomassa yang tidak terkendali secara konsisten menempatkan wilayah metropolitan pada kategori kualitas udara yang tidak sehat menurut standar Organisasi Kesehatan Dunia (WHO).[1]

Meskipun pemerintah telah mengoperasikan stasiun pemantauan tetap (Air Quality Monitoring System - AQMS), sistem ini memiliki keterbatasan signifikan dalam hal resolusi spasial dan biaya operasional yang sangat tinggi, sehingga gagal mendeteksi "titik panas" (hotspots) polusi pada skala mikro atau tingkat jalanan.[1]

Laporan ini menyajikan analisis mendalam mengenai pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) sebagai solusi transformatif untuk menjembatani kesenjangan data tersebut. Fokus utama penelitian ini adalah pada perancangan node sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) yang menggunakan mikrokontroler ESP32, integrasi algoritma kalibrasi untuk meningkatkan akurasi data di iklim tropis, serta implementasi mekanisme mitigasi polusi otomatis melalui sistem ionisasi dan filtrasi.[1]

Analisis ini juga mengeksplorasi metodologi pemetaan spasiotemporal menggunakan robot mobile untuk mengidentifikasi distribusi polutan secara dinamis dalam lingkungan urban yang kompleks.[1]

II. TINJAUAN PUSTAKA

Kualitas udara di Indonesia, khususnya di wilayah Jabodetabek, sering kali mengalami fluktuasi ekstrem yang dipengaruhi oleh kondisi meteorologi seperti fenomena El Niño. Selama tahun 2023, konsentrasi PM2.5 di Jakarta dan kota-kota sekitarnya tetap berada pada kisaran 40-50 $\mu g/m^3$, jauh melampaui ambang batas aman yang

ditetapkan pemerintah dan organisasi kesehatan internasional.[2] PM2.5 merupakan polutan yang sangat berbahaya karena ukurannya yang kurang dari 2,5 mikron memungkinkan partikel tersebut masuk jauh ke dalam sistem pernapasan dan aliran darah, memicu berbagai penyakit kardiovaskular kronis dan gangguan saraf.[1]

Selain partikulat, Karbon Monoksida (CO) muncul sebagai polutan kritis karena karakteristik fisiknya yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, sehingga kehadirannya sering kali tidak disadari oleh indra manusia.[1] CO memiliki afinitas terhadap hemoglobin yang jauh lebih kuat dibandingkan oksigen, yang menyebabkan pembentukan karboksihemoglobin (COHb) dalam darah. Kondisi ini menghambat distribusi oksigen ke jaringan vital, yang pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan kematian mendadak.[1]

Berikut adalah klasifikasi kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 14 Tahun 2020 yang menjadi acuan nasional di Indonesia:

Tabel 1: Klasifikasi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Indonesia

Rentang Nilai	**Kategori**	**Dampak Kesehatan dan Rekomendasi**
0 - 50	Baik	Tidak memberikan efek negatif bagi kesehatan manusia atau hewan. Sangat baik untuk aktivitas luar ruangan.
51 - 100	Sedang	Kualitas udara masih dapat diterima, namun beberapa polutan mungkin mulai mempengaruhi kelompok sangat sensitif.
101 - 200	Tidak Sehat	Bersifat merugikan bagi manusia dan hewan sensitif. Penurunan daya tahan tubuh dan gangguan pernapasan mulai muncul.
201 - 300	Sangat Tidak Sehat	Meningkatkan risiko kesehatan secara signifikan pada seluruh populasi. Disarankan untuk membatasi aktivitas luar ruangan.
> 300	Berbahaya	Kualitas udara tingkat serius yang dapat mengakibatkan kerusakan kesehatan permanen. Evakuasi mungkin diperlukan.

Ketidakteraturan distribusi polutan di wilayah perkotaan menunjukkan bahwa pemantauan terpusat di satu stasiun AQMS tidak cukup untuk mewakili paparan aktual yang dialami oleh masyarakat di berbagai titik jalanan. Sebagai contoh, Tangerang Selatan sering kali tercatat memiliki indeks polusi yang lebih buruk dibandingkan Jakarta Pusat karena pola angin dan kepadatan kendaraan yang berbeda di tingkat mikro.[2]

Hal ini memperkuat argumen untuk perlunya transisi menuju jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network - WSN) yang padat dan murah.[1]

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan adalah : studi literatur, survey, dan eksperimen. Disini digunakan sistem pemantauan kualitas udara menggunakan IoT. Inti dari sistem pemantauan kualitas udara IoT yang efisien terletak pada pemilihan mikrokontroler dan sensor yang tepat. ESP32 telah menjadi platform pilihan utama bagi para peneliti karena kemampuannya dalam menangani tugas pemrosesan data sekaligus menyediakan konektivitas nirkabel yang kuat.[1] Dibandingkan dengan pendahulunya seperti Arduino atau ESP8266, ESP32 menawarkan prosesor dual-core, memori yang lebih besar, serta fitur hemat energi yang sangat canggih melalui berbagai mode tidur.[7]

A. Pemilihan Sensor Gas dan Partikulat

Dalam desain sistem ini, sensor MQ-7 dipilih secara khusus untuk mendeteksi CO, sementara sensor berbasis laser digunakan untuk pengukuran PM2.5. Sensor MQ-series bekerja berdasarkan perubahan konduktivitas material SnO2 (Tin Dioxide) di dalam tabung keramik mikronya ketika terpapar gas reduksi. Untuk PM2.5, sensor laser scattering memberikan keunggulan dalam hal akurasi dan waktu respon dibandingkan sensor inframerah tradisional.[1]

Tabel 2: Spesifikasi Komponen Utama Node Sensor IoT

Komponen	**Spesifikasi Teknis**	**Peran dalam Sistem**
Mikrokontroler ESP32	Dual-core 240MHz, Wi-Fi, Bluetooth, 520KB SRAM	Pusat kendali, pemrosesan data, dan gateway komunikasi.

Sensor MQ-7	Rentang deteksi 20 - 2000 ppm CO, Tegangan 5V/1.4V	Pendeteksi kadar Karbon Monoksida dengan sensitivitas tinggi.
Sensor PM2.5 (Laser)	Resolusi 1 $\mu g/m^3$, Rentang 0 - 999 $\mu g/m^3$	Pengukuran partikulat udara secara real-time.
Sensor DHT-22	Akurasi Suhu $\pm 0,5^\circ C$, Kelembaban $\pm 2\% RH$	Menyediakan data lingkungan untuk algoritma kompensasi.
Module GPS NEO-6M	Akurasi posisi < 5 meter	Memberikan data koordinat untuk pemetaan spasiotemporal.

Integrasi perangkat keras ini juga melibatkan aktuator mitigasi. Relay digunakan untuk mengontrol kipas ventilasi dan pematik ionisasi negatif yang berfungsi sebagai pemurni udara otomatis ketika tingkat polutan melampaui ambang batas keamanan.[1] Implementasi teknis ini memerlukan perancangan sirkuit yang teliti, terutama dalam penggunaan level shifter untuk menyesuaikan tegangan logika antara sensor yang bekerja pada 5V dan ESP32 yang bekerja pada 3,3V.[34]

B. Analisis Firmware dan Optimasi Manajemen Daya

Salah satu tantangan terbesar dalam sistem IoT mandiri adalah konsumsi daya. Perangkat yang ditempatkan di lapangan sering kali tidak memiliki akses ke sumber daya AC konvensional dan harus bergantung pada baterai atau panel surya.[1] ESP32 mengatasi masalah ini melalui fitur Deep Sleep yang memungkinkan konsumsi arus turun dari ratusan miliampere menjadi hanya beberapa mikroampere.[23]

C. Implementasi Mode Deep Sleep

Dalam mode Deep Sleep, inti CPU utama, Wi-Fi, dan Bluetooth dimatikan sepenuhnya. Hanya sirkuit Real-Time Clock (RTC) dan memori RTC yang tetap dialiri listrik.[23] Perangkat dapat diprogram untuk terbangun berdasarkan timer internal atau pemicu eksternal dari GPIO.[24] Strategi ini memungkinkan node sensor untuk melakukan siklus "bangun-ukur-kirim-tidur" secara berkala, yang secara drastis memperpanjang masa pakai baterai.[23]

Tabel 3: Perbandingan Konsumsi Arus ESP32 pada Berbagai Mode

Mode Operasional	Komponen Aktif	Arus (Tipikal)	Dampak pada Baterai
Active (Wi-Fi ON)	CPU, Wi-Fi, Periferal	160 - 260 mA	Bertahan 10-20 jam (3000mAh)
Modem Sleep	CPU, Periferal	20 - 30 mA	Bertahan 4-6 hari
Light Sleep	RTC, Memori RAM (Retained)	0.8 - 2 mA	Bertahan 2-3 bulan
Deep Sleep	RTC, Memori RTC	10 - 150 μA	Bertahan 1-2 tahun
Hibernation	RTC Timer saja	2.5 - 5 μA	Maksimal (Umur simpan baterai)

Untuk mengoptimalkan efisiensi, pengembang harus memperhatikan waktu koneksi Wi-Fi. Penggunaan alamat IP statis dan penyimpanan BSSID/channel router dalam memori RTC dapat mengurangi waktu koneksi dari 3-5 detik menjadi kurang dari 500 milidetik.[23] Setiap detik yang dihemat dalam keadaan aktif (Active Mode) secara signifikan mengurangi total energi yang dikonsumsi per siklus transmisi.[25]

D. Pemodelan Matematika untuk Kalibrasi dan Kompensasi Sensor

Data mentah dari sensor gas semikonduktor seperti MQ-7 sering kali tidak akurat karena dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban lingkungan. Di wilayah tropis, fluktuasi ini dapat menyebabkan kesalahan pembacaan yang fatal.[1] Oleh karena itu, penerapan algoritma kompensasi berbasis datasheet dan validasi lapangan sangat penting dilakukan pada level firmware.[1]

E. Konversi Nilai ADC ke PPM

Sensor MQ-7 menghasilkan tegangan analog yang berbanding lurus dengan resistansi sensor (R_s). Rasio

antara R_s dan resistansi sensor dalam udara bersih (R_o) digunakan untuk menghitung konsentrasi gas dalam ppm menggunakan persamaan kurva karakteristik.[26] Persamaan dasar yang sering digunakan adalah:

$$PPM = A \cdot \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^{-B}$$

Di mana A dan B adalah konstanta yang ditentukan melalui regresi linear pada grafik log-log dari datasheet sensor.[42] Namun, untuk presisi yang lebih tinggi, model polinomial derajat tiga sering kali memberikan hasil yang lebih mendekati nilai instrumen referensi:

$$\ln(PPM) = a_0 + a_1 \cdot \ln(Ratio) + a_2 \cdot (\ln(Ratio))^2 + a_3 \cdot (\ln(Ratio))^3$$

44

F. Algoritma Kompensasi Suhu dan Kelembaban

Untuk mengompensasi pengaruh eksternal, resistansi sensor harus dikoreksi menggunakan faktor yang bergantung pada suhu (T) dan kelembaban relatif (H). Salah satu model matematika yang diusulkan dalam literatur adalah:

$$R_{s,compensated} = \frac{R_{s,measured}}{-0.0122 \cdot T - 0.00609 \cdot H + 1.7086}$$

42

Penerapan algoritma ini secara real-time di dalam ESP32 memastikan bahwa data yang dikirimkan ke cloud sudah terkalibrasi secara dinamis terhadap perubahan cuaca lokal, yang sangat krusial untuk pemantauan outdoor di Indonesia.[40]

G. Strategi Mitigasi Otomatis dan Teknologi Pemurnian Udara

Sistem pemantauan yang ideal tidak hanya memberikan informasi, tetapi juga mampu melakukan tindakan preventif. Dalam penelitian ini, aktuator yang dikendalikan oleh ESP32 bertindak sebagai sistem mitigasi otomatis.[1]

H. Mekanisme Kontrol Loop Tertutup

Sistem menggunakan logika kontrol berbasis ambang batas (thresholding). Ketika sensor mendeteksi kadar CO di atas 9 ppm (ambang batas ISPU untuk kategori sedang), mikrokontroler akan mengaktifkan relay yang menyalakan kipas pembuangan (exhaust fan).[1] Demikian pula, jika kadar PM2.5 meningkat drastis, sistem akan menjalankan filter HEPA dan generator ion negatif.[28]

I. Efektivitas Ionisasi Negatif dalam Reduksi Partikel

Teknologi ionisasi negatif bekerja dengan melepaskan ion ke udara yang akan menempel pada partikel debu dan polutan. Partikel yang telah bermuatan ini kemudian akan saling tarik-menarik membentuk gumpalan yang lebih berat atau menempel pada permukaan yang bermuatan berlawanan (electrostatic precipitation).[48]

Jenis Filtrasi	Mekanisme Utama	Efektivitas PM2.5	Keunggulan
Filter HEPA	Penyaringan fisik (Mechanical)	> 99%	Sangat andal untuk partikel mikro.
Ionisasi Negatif	Adsorpsi Elektrostatis	80% - 90%	Rendah perawatan, tidak berisik.
Karbon Aktif	Adsorpsi Kimia	Rendah (Fokus pada Gas)	Menghilangkan bau dan VOC.
28			

Meskipun efektif, generator ion negatif tradisional sering kali menghasilkan ozon (O_3) sebagai produk sampingan karena tegangan tinggi yang digunakan.[33] Namun, penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan elektroda serat karbon dengan nanometer-tip dapat menghasilkan ion negatif pada tegangan lebih rendah (sekitar 2,16 kV), yang secara signifikan menekan produksi ozon hingga tingkat yang tidak terdeteksi.[50]

J. Metodologi Pemetaan Spasiotemporal dan Deteksi Hotspot Polusi

Untuk mengatasi keterbatasan stasiun pemantauan tetap, penggunaan node sensor bergerak (mobile sensor nodes) menjadi strategi kunci. Data yang dikumpulkan dari berbagai lokasi kemudian diproses menggunakan teknik geostatistik untuk menghasilkan peta polusi yang komprehensif.[1]

K. Robotika Mobile untuk Pemantauan Lingkungan

Robot mobile yang dilengkapi dengan ESP32 dan sensor kualitas udara dapat diprogram untuk menelusuri area tertentu (seperti kawasan industri atau persimpangan jalan) menggunakan pola grid.[11] Data posisi dari GPS atau sistem odometri robot dikombinasikan dengan data sensor untuk mengidentifikasi area dengan konsentrasi polusi tertinggi atau "hotspots".[10]

IV. PEMBAHASAN DAN ANALISA

Berdasarkan eksperimen dan survey maka diperoleh hasil tabel sebagai berikut :

Tabel 4: Analisis Metodologi Interpolasi Spasial

Metode Interpolasi	Karakteristik Utama	Penggunaan Terbaik
Inverse Distance Weighting (IDW)	Menghitung nilai berdasarkan rata-rata tertimbang jarak titik terdekat.	Pemetaan cepat dengan dataset yang padat.
Ordinary Kriging (OK)	Mempertimbangkan korelasi spasial dan variogram data.	Pemetaan akurat untuk fenomena atmosferik.
Land Use Regression (LUR)	Mengintegrasikan data tata guna lahan dan kepadatan lalu lintas.	Prediksi polusi di area tanpa cakupan sensor.
Hybrid CNN-BIGRU-Kriging	Menggunakan Deep Learning untuk prediksi waktu dan Kriging untuk ruang.	Pemetaan spasiotemporal skala kota besar.
57		

Hasil dari interpolasi ini memungkinkan para pengambil kebijakan untuk melihat distribusi polutan secara visual. Sebagai contoh, peta yang dihasilkan dapat menunjukkan peningkatan konsentrasi polutan secara drastis dalam jarak 100-200 meter dari pusat jalan raya, yang sering kali tidak terdeteksi oleh stasiun pemantau yang ditempatkan jauh dari bibir jalan.[12]

Keandalan sistem IoT berbasis sensor murah sangat bergantung pada proses kalibrasi terhadap instrumen referensi standar. Dalam pengujian yang dilakukan di berbagai kota besar di Indonesia, sistem berbasis ESP32 menunjukkan performa yang sangat menjanjikan dengan tingkat akurasi yang kompetitif.[1]

Tabel 5: Hasil Evaluasi Akurasi Sistem Pemantauan IoT

Parameter Kualitas Udara	Akurasi vs Alat Referensi (%)	Nilai Korelasi (R2)	Kesalahan Rata-rata (RMSE)
Karbon Monoksida (CO)	94,34%	0,87 - 0,94	3,35 - 5,49 $\mu g/m^3$
Partikulat (PM2.5)	81,15%	0,74 - 0,81	4,27 $\mu g/m^3$
Suhu Udara	99,14%	0,99	0,5 $^{\circ}C$
Kelembaban Relatif	96,84%	0,96	3% RH

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sensor MQ-7 dan sensor PM2.5 berbiaya rendah memiliki keterbatasan bawaan, penerapan algoritma pengolahan data yang tepat dapat meningkatkan kualitas data hingga layak digunakan untuk pengambilan kebijakan lingkungan tingkat mikro.[5] Namun, penelitian juga mencatat adanya rata-rata error sekitar 16,8% pada pengukuran emisi langsung dari knalpot kendaraan, yang menunjukkan perlunya sensor dengan spesifikasi lebih tinggi untuk aplikasi uji emisi otomotif yang sangat spesifik.[64]

V. KESIMPULAN

Implementasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan mikrokontroler ESP32 menawarkan paradigma baru dalam pengelolaan lingkungan urban yang cerdas (Smart City). Melalui integrasi sensor mikro yang murah namun terkalibrasi, sistem ini mampu menyediakan data dengan resolusi spasiotemporal tinggi yang sebelumnya tidak mungkin dicapai dengan stasiun AQMS konvensional. Optimasi daya melalui mode Deep Sleep memastikan operasional node sensor yang berkelanjutan, sementara mekanisme mitigasi otomatis memberikan perlindungan langsung terhadap kesehatan masyarakat dari paparan polutan berbahaya.

Untuk pengembangan ke depan, integrasi kecerdasan buatan (AI) pada level cloud atau edge

computing sangat disarankan guna memprediksi tren polusi harian berdasarkan data historis dan prakiraan cuaca. Selain itu, perluasan jaringan sensor melalui skema partisipasi publik (crowdsourced monitoring) dapat menciptakan ekosistem data yang lebih transparan dan inklusif. **Dengan** dukungan kebijakan yang tepat, teknologi ini dapat menjadi instrumen vital dalam mewujudkan target udara bersih nasional dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat di kota-kota besar Indonesia yang padat polusi.

DAFTAR PUSTAKA

1. [ID] CREA_ID AQ decline in 2023 due to lack of intervention and El Niño. What about 2024? - Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA), accessed April 15, 2026, https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2024/04/ID-CREA_ID-AQ-decline-in-2023-due-to-lack-of-intervention-and-El-Nino.-What-about-2024.pdf
2. Assessment of Air Quality Remote Sensing in Indonesia - ESCAP Repository, accessed April 15, 2026, https://repository.unescap.org/server/api/core/bitstreams/796ef74a-adf7-4137-b2dd-5ad12b1d3871/content
3. Semakin Membaik, Berikut Indeks Kualitas Udara Indonesia Versi Kementerian LHK - GoodStats Data, accessed April 15, 2026, https://data.goodstats.id/statistic/semakin-membaik-berikut-indeks-kualitas-udara-indonesia-versi-kementerian-lhk-xZqJI
4. High-Resolution Urban Air Quality Mapping for Multiple Pollutants Based on Dense Monitoring Data and Machine Learning - PMC, accessed April 15, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9265361/
5. Revitalizing IoT-based air quality monitoring system for major cities in Indonesia - Publikasi Mercubuana, accessed April 15, 2026, https://publikasi.mercubuana.ac.id/index.php/sinergi/article/download/24723/8805
6. Design and Development of Low-Cost Datalogger for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring - arXiv, accessed April 15, 2026, https://arxiv.org/html/2603.21266v1
7. IOT-BASED AIR POLLUTION MONITORING AND ... - IRJET, accessed April 15, 2026, https://www.irjet.net/archives/V12/i10/IRJET-V12I10128.pdf
8. Design and Construction of a Real-Time Air Quality Monitoring System Using IoT-Based ESP32 to Strengthen Environmental Policies | Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, accessed April 15, 2026, https://jppipa.unram.ac.id/index.php/jppipa/article/view/9820
9. Iot based air quality index monitoring system using ESP32 - International Research Journal of Education and Technology, accessed April 15, 2026, https://www.irjweb.com/user_upload/Iot%20based%20air%20quality%20index%20monitoring%20system%20using%20ESP32.pdf
10. An algorithm for mobile robot path planning based on 3D grid map - ResearchGate, accessed April 15, 2026, https://www.researchgate.net/publication/267675852_An_algorithm_for_mobile_robot_path_planning_based_on_3D_grid_map
11. Mobile monitoring of urban air quality at high spatial resolution by low-cost sensors - Copernicus ACP, accessed April 15, 2026, https://acp.copernicus.org/articles/21/7199/2021/acp-21-7199-2021.pdf
12. Design of a Carbon Monoxide Gas Measurement Tool Using Microcontroller-Based MQ-7 Gas Sensor in Households | NEWTON: Networking and Information Technology, accessed April 15, 2026, https://ejournal.unwaha.ac.id/index.php/newton/article/view/4881
13. Rancang Bangun Detektor Karbon Monoksida (CO) dengan MQ-7 Berbasis Internet of Things, accessed April 15, 2026, https://journal.aritekin.or.id/index.php/Jupiter/article/download/843/1104
14. Research and application of MQ-7 sensor compensation method - ResearchGate, accessed April 15, 2026, https://www.researchgate.net/publication/378580833_Research_and_application_of_MQ-7_sensor_compensation_method
15. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), accessed April 15, 2026, https://ispu.menlhk.go.id/
16. indeks standar – pencemaran udara - JDIH KEMENTERIAN KEHUTANAN, accessed April 15, 2026, https://jdih.kehutanan.go.id/new2/uploads/files/abstrak/ABSTRAKSIP_142020_p_menlhk_abstrak_08112022104158.pdf
17. Permen lhk nomor 14 tahun 2020 | PDF - Slideshare, accessed April 15, 2026, https://www.slideshare.net/slideshow/permen-lhk-nomor-14-tahun-2020/250526280
18. Informasi Kualitas Udara Indonesia - Iklim BMKG, accessed April 15, 2026, https://iklim.bmkg.go.id/id/kualitas-udara-indonesia/

19. Opportunistic mobile air quality mapping using sensors on postal service vehicles: from point clouds to actionable insights - Frontiers, accessed April 15, 2026, https://www.frontiersin.org/journals/environmental-health/articles/10.3389/fenvh.2023.1232867/full
20. IoT Air Quality Monitor with ESP32 | PDF | Sensor | Microcontroller - Scribd, accessed April 15, 2026, https://www.scribd.com/document/977303766/Design-and-Implementation-of-an-IoT-Based-Air-Quality-Monitoring-System-Using-ESP32
21. Internet of Things Based Air Quality Monitoring System with Automatic Notification | MALCOM - Journal IRPI, accessed April 15, 2026.