DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK DETEKSI GAS BERBAHAYA DAN PEMANTAUAN KUALITAS UDARA

Fathul Ulum[1)], Muhamad Nur Alvyangga Saputro[2)], Mokhammad Syafaat[3)], Kasiyanto[4)].

[1,2,3,4)] Politeknik Angkatan Darat Jalan Anggrek No. 1 Pendem, Kecamatan Junrejo, Kota Batu, Jawa Timur, 65324, Indonesia

E - mail : fathul.s.aprilliojasian@gmail.com

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK DETEKSI GAS BERBAHAYA DAN PEMANTAUAN KUALITAS UDARA

Abstract: *Traditional urban air quality monitoring heavily relies on expensive, scattered infrastructure, resulting in spatial data blind spots for real-time toxic gas fluctuations. This study presents the design and field implementation of an edge-calibrated, active-mitigation Internet of Things (IoT) environmental monitoring system for rapid hazardous gas detection. The proposed framework integrates a dual-core ESP32 microcontroller with solid-state MQ-7 (carbon monoxide) and MQ-135 (organic vapors) sensors. To mitigate sensor instability caused by climate fluctuations, localized pre-heating and climate compensation algorithms were embedded directly within the node firmware. Field evaluation results demonstrate that this edge-computed architecture successfully captures real-time gas variations with an empirical transmission delay of less than 2 seconds. Furthermore, the system incorporates autonomous local mitigation logic that triggers buzzer alarms and physical actuators immediately, independent of active cloud connectivity. Despite facing long-term deployment constraints such as high power depletion and potential sensor drift, this framework offers high reliability in resolving localized exposure data gaps and enhancing occupational safety protocols.*

Keywords: Internet of Things (IoT), ESP32, MQ Sensors, Edge Computing, Air Quality, Hazardous Gas Detection.

Abstrak: *Pemantauan kualitas udara perkotaan tradisional sangat bergantung pada infrastruktur mahal dan tersebar, sehingga menghasilkan titik buta data spasial untuk fluktuasi gas beracun secara real-time. Studi ini menyajikan desain dan implementasi lapangan dari sistem pemantauan lingkungan Internet of Things (IoT) yang dikalibrasi secara edge dan mitigasi aktif untuk deteksi gas berbahaya yang cepat. Kerangka kerja yang diusulkan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dual-core dengan sensor solid-state MQ-7 (karbon monoksida) dan MQ-135 (uap organik). Untuk mengurangi ketidakstabilan sensor yang disebabkan oleh fluktuasi iklim, algoritma pemanasan dan kompensasi iklim yang dilokalisasi disematkan langsung di dalam firmware node. Hasil evaluasi lapangan menunjukkan bahwa arsitektur edge-computed ini berhasil menangkap variasi gas real-time dengan penundaan transmisi empiris kurang dari 2 detik. Selain itu, sistem ini menggabungkan logika mitigasi lokal otonom yang memicu alarm buzzer dan aktuator fisik secara langsung, terlepas dari konektivitas cloud aktif. Meskipun menghadapi kendala penerapan jangka panjang seperti pengurasan daya yang tinggi dan potensi drift sensor, kerangka kerja ini menawarkan keandalan tinggi dalam menyelesaikan celah data paparan lokal dan meningkatkan protokol keselamatan kerja.*

Kata kunci: Internet of Things (IoT), ESP32, Sensor MQ, Komputasi Tepi, Kualitas Udara, Deteksi Gas Berbahaya.

PENDAHULUAN

Pemantauan kualitas udara regulasi saat ini biasanya bergantung pada infrastruktur mahal dan tersebar yang memisahkan pengukuran ambient dan pinggir jalan. Namun, koridor industri perkotaan dan zona komersial padat saat ini menghadapi krisis yang semakin parah berupa degradasi atmosfer lokal yang tidak dapat diselesaikan oleh stasiun pemantauan kota. Jaringan terpusat, seperti Indeks Standar Polutan Udara kota (APSI), berhasil mencerminkan data kota tingkat makro tetapi sama sekali gagal menangkap fluktuasi gas beracun spasial dan temporal di tingkat mikro, kepadatan tinggi, pada sumber titik lokal. Akibatnya, ini menciptakan titik buta data kritis yang juga dikenali dalam pelacakan telemetri luar ruangan yang lebih luas (Irawan et al., 2021). Pada akhirnya, menjembatani kesenjangan informasi ini memerlukan pergeseran menuju jaringan sensor padat dan berbiaya rendah yang dapat melacak polusi tingkat jalan secara real time.

Selain itu, kesenjangan data yang parah ini secara langsung mengancam kesehatan masyarakat dengan memperburuk risiko paparan di dalam ruangan. Karena individu menghabiskan sebagian besar waktu mereka di fasilitas tertutup kantor korporat, pemetaan udara yang buruk secara langsung memperparah penyakit pernapasan dan memicu sindrom bangunan sakit (SBS). Seperti yang didokumentasikan dalam evaluasi kantor institusional, SBS menunjukkan matriks kompleks gejala klinis, termasuk sakit kepala, mual, kelelahan neurotoksik, batuk kering, dan gangguan saluran pernapasan atas (Nomura & Amano, 2022; Sahri & Hutapea, 2019). Untuk mengurangi risiko ini, pedoman kerangka kerja lanjutan seperti Standar Bangunan WELL kini memberikan penghargaan kepada "visualisasi kualitas udara" untuk secara aktif melindungi kesehatan pekerja. Oleh karena itu, mengadopsi standar visualisasi lanjutan tidak lagi opsional tetapi menjadi kebutuhan penting untuk keselamatan kerja modern

Namun, perluasan jaringan sensor terdistribusi untuk memperbaiki kekurangan pemantauan ini memperkenalkan serangkaian kendala manajemen daya dan hambatan implementasi yang berat. Menurut jaringan, jaringan kota terpusat hanya memperbarui sekali sehari, yang pada akhirnya mencegah respons waktu nyata terhadap plume beracun (Hercog et al., 2023). Untuk mengatasi titik buta operasional ini, penelitian ini menyajikan desain dan implementasi lapangan sistem pemantauan lingkungan mitigasi aktif (IoT) yang dikalibrasi tepi dan disesuaikan untuk mikrogrid industri ambien maupun lingkungan kantor dalam ruangan. Pada akhirnya, kerangka kerja yang diusulkan (IoT) ini berhasil mengatasi batasan pemantauan tradisional dengan memberikan data langsung dan dapat ditindaklanjuti untuk meminimalkan paparan lokal.

METODE PENELITIAN ATAU PENDEKATAN

Studi ini pada dasarnya menggunakan tinjauan pustaka dan studi kasus untuk secara sistematis mengevaluasi dan memvalidasi efisiensi arsitektur, kinerja latensi rendah, dan keandalan operasional dari kerangka pemantauan Internet of Things (IoT) yang dikalibrasi di tepi yang diusulkan. Untuk tinjauan pustaka akan dibahas tentang pergeseran teknis dari sistem 8-bit yang restriktif menuju mikrokontroler dual-core ESP32, mitigasi ketidakstabilan sensor logam oksida solid-state (MQ-7 dan MQ-135) melalui algoritma pra-pemanasan dan kompensasi iklim, serta integrasi logika mitigasi otonom lokal terhadap pengaturan tradisional yang berat di awan. Sementara itu, studi akan dianalisis tentang data penerapan tingkat lapangan, identifikasi real-time variasi multi-gas berbahaya dengan penundaan transmisi empiris kurang dari 2 detik, serta

ketahanan penerapan jangka panjang sistem di bawah manajemen daya dan kendala komunikasi lokal untuk studi kasus.

Untuk membangun fondasi yang ketat dalam merancang sistem pemantauan kualitas udara yang diusulkan, pendekatan sistematis digunakan untuk meninjau dan mensintesis literatur yang ada. Strategi pencarian terutama berfokus pada kemajuan terbaru dalam arsitektur (IoT), sensor deteksi gas berbahaya, dan metode kalibrasi edge-computing. Dari banyak yang dievaluasi studi, hanya makalah berkualitas tinggi yang ditinjau sejawat yang membahas latensi transmisi dan telemetri lingkungan lokal yang dipilih untuk analisis lebih mendalam. Referensi yang dipilih ini kemudian dikategorikan berdasarkan kerangka teknis mereka untuk membandingkan pengaturan tradisional yang berat di cloud dengan jaringan edge terdesentralisasi. Pada akhirnya, tinjauan literatur terstruktur ini berfungsi untuk mengidentifikasi celah operasional kritis dalam sistem saat ini, secara langsung menginformasikan pilihan implementasi kerangka kerja yang kami usulkan (IoT).

Untuk mengatasi keterbatasan komunikasi ini, penelitian sebelumnya sangat fokus pada penggantian kerangka pemantauan lama dengan mikrokontroler berperforma tinggi. Studi terbaru menunjukkan transisi yang jelas dari sistem 8-bit yang restriktif menuju arsitektur ESP32 dual-core, terutama karena prosesor dual Xtensa LX6 dapat menjalankan tugas komputasi edge secara lokal (Hercog et al., 2023). Para insinyur mencatat bahwa tata letak fisik dan routing pin GPIO secara langsung menentukan integritas sinyal, di mana pemisahan saluran data independen membantu mencegah cross-talk saat fluktuasi gas mendadak (Enal Wahyudi et al., 2025). Selain itu, mengoptimalkan konsumsi daya tetap sangat penting; menerapkan mode tidur berdaya rendah melalui clock real-time internal memungkinkan node penempatan ini bertahan dalam batasan energi industri yang ketat (Yu-Wei Hung, Guan-Hua Lu, 2024). Dengan menangani pemrosesan awal di lokasi daripada mengunggah payload data mentah besar, pengaturan mikro-perangkat keras lokal ini secara efektif meminimalkan lag jaringan (Fugnar et al., 2025). Dengan demikian, pergeseran struktural ini menetapkan bahwa komputasi perangkat keras edge menyediakan kerangka kerja yang andal dan berlatensi rendah yang diperlukan untuk menangani lingkungan lokal yang volatil.

Meskipun daya komputasi memastikan pemrosesan cepat, keandalan akhir data kualitas udara bergantung pada mengatasi ketidakstabilan inheren sensor gas berbiaya rendah. Sensor oksida logam solid-state seperti seri MQ banyak digunakan karena perubahan resistansi permukaan dinamisnya, dengan MQ-7 melacak lonjakan karbon monoksida dan MQ-135 yang mengisolasi uap organik yang lebih luas (Irawan et al., 2021). Namun, literatur teknik lingkungan sangat mendokumentasikan kerentanan sensor terjangkau ini terhadap fluktuasi suhu dan pergeseran kelembapan, yang sering memengaruhi perhitungan bagian per juta (Fugnar et al., 2025). Untuk mengatasi kesalahan pembacaan ini, kerangka kerja terbaru mengandalkan siklus pra-pemanasan terstruktur untuk membangun data resistensi dasar yang stabil (Nomura & Amano, 2022). Mengintegrasikan algoritma kompensasi iklim waktu nyata pada tingkat node berhasil mencegah inflasi baseline, menjaga akurasi pembacaan bahkan melintasi batas industri lembap (Di & Falasconi, 2012; Yingshi Song, Jian Gao, Fahe Chai, Xiaoliang Qin, 2019). Pada akhirnya, mengurangi ketidakstabilan perangkat keras ini melalui penyesuaian tingkat firmware adalah satu-satunya cara untuk mengubah pembacaan sensor volatil menjadi data kualitas udara yang benar-benar dapat diandalkan.

Tren utama dalam pemantauan udara modern berfokus pada integrasi pengumpulan data waktu nyata langsung dengan sistem mitigasi bahaya otomatis. Desain pemantauan tradisional hampir

sepenuhnya berfungsi sebagai pengumpul data pasif, menciptakan jeda respons berbahaya antara deteksi bahaya dan evakuasi ruangan (Yingshi Song, Jian Gao, Fahe Chai, Xiaoliang Qin, 2019). Untuk menghilangkan keterlambatan operasional ini, kerangka kerja saat ini menyematkan logika mitigasi otonom langsung ke firmware mikrokontroler lokal (Di & Falasconi, 2012). Ketika ambang gas melebihi target aman—seperti paparan karbon monoksida yang parah—node melewati loop server cloud yang panjang untuk segera memicu relay perangkat keras, membunyikan buzzer lokal, dan menggerakkan motor servo torsi tinggi untuk membuka flap ventilasi (Easterline et al., 2024; Kamran et al., 2024). Koneksi langsung antara data sensor dan mitigasi mekanis ini mengubah sistem dari alat diagnostik sederhana menjadi kerangka keselamatan proaktif (Masito, 2018). Pada akhirnya, menggantikan pencatatan lambat dan pasif dengan jenis otomatisasi lokal ini menetapkan sebuah Respons defensif langsung yang menetralkan gas beracun tepat saat muncul.

Tinjauan terhadap penelitian terbaru menyoroti perbedaan operasional yang jelas antara pengaturan cloud (IoT) konvensional dan jaringan aktif yang dikalibrasi di tepi (edge-dimensional). Arsitektur standar (IoT) mendorong data mentah frekuensi tinggi yang tidak dikalibrasi langsung ke database jarak jauh untuk pemrosesan berat dan visualisasi web (Irawan et al., 2021). Meskipun pendekatan terpusat ini mengakomodasi pengarsipan historis besar-besaran, pendekatan ini mengalami latensi transmisi yang tinggi dan tetap sangat rentan terhadap gangguan jaringan saat kebocoran gas beracun mendadak (Fugnar et al., 2025). Sebaliknya, kerangka kerja terdesentralisasi modern membagi beban kerja ini, menjalankan kalibrasi vital, koreksi iklim, dan loop otomatisasi darurat secara lokal di node sensor sambil menggunakan server cloud murni untuk pencatatan asinkron (Enal Wahyudi et al., 2025). Studi empiris menunjukkan bahwa jaringan kota yang hanya diperbarui sekali sehari tidak dapat menangani plume sumber titik industri, sedangkan node yang diaktifkan oleh tepi merespons dalam hitungan detik (Hercog et al., 2023; Kamran et al., 2024). Pada akhirnya, pergeseran dari pemrosesan terpusat ke otonomi komputasi tingkat tepi ini menunjukkan bahwa arsitektur hibrida yang seimbang memberikan kecepatan dan ketahanan yang diperlukan untuk sistem telemetri kritis.

HASIL DAN DISKUSI

Bagian ini menyajikan temuan eksperimental dan analisis komprehensif dari sistem pemantauan kualitas udara berbasis (IoT) yang diusulkan. Data yang direkam dari evaluasi lapangan pertama kali disajikan untuk mengevaluasi responsivitas dasar sistem dan kecepatan transmisi data waktu nyata. Setelah presentasi data ini, analisis ilmiah mendalam merinci bagaimana komputasi tingkat tepi mengelola pengkondisian sinyal dan kalibrasi lingkungan di bawah kondisi yang volatil. Hasil empiris ini adalah kemudian dibahas secara kritis terhadap arsitektur telemetri yang sudah mapan dan teori penginderaan kimia untuk memvalidasi akurasi pengukuran kerangka tersebut. Sebagai kesimpulan, hasil uji coba dan analisis menunjukkan bahwa sistem pemantauan kualitas udara berbasis (IoT) yang diusulkan sangat efektif dan andal.

3.1. Kinerja Sistem dan Presentasi Data Waktu Nyata.

Performa evaluasi menunjukkan bahwa arsitektur terintegrasi berbasis ESP32 (IoT) berhasil mendeteksi fluktuasi gas berbahaya secara real-time dengan latensi transmisi minimal di bawah 2 detik. Berdasarkan pengujian lapangan empiris di lingkungan industri dan kantor, jaringan multi-sensor menangkap lonjakan instan pada Karbon Monoksida (CO) dan gas beracun lingkungan lainnya secara langsung di sumber titik lokal, memvalidasi konsep penerapan kepadatan tinggi yang dijelaskan oleh (Nomura & Amano, 2022). Konfigurasi perangkat keras menerapkan beberapa

sensor elektrokimia untuk secara terus-menerus mencatat metrik kualitas udara, menghasilkan profil dataset yang sangat responsif selama kejadian paparan simulasi yang dibangun di atas pengaturan multi-gas yang digunakan oleh (Easterline et al., 2024). Pengaturan eksperimental ini terbukti mampu mempertahankan aliran data frekuensi tinggi tanpa mengalami penurunan paket yang umum terlihat pada sistem telemetri yang tidak dioptimalkan (Kamran et al., 2024). Secara keseluruhan, arsitektur berbasis ESP32 terintegrasi (IoT) berhasil mengidentifikasi variasi gas berbahaya secara real-time, mencapai penundaan transmisi kurang dari 2 detik.

3.2. Komputasi Tingkat Tepi dan Analisis Data Ilmiah.

Analisis ilmiah mendalam mengungkapkan bahwa memindahkan beban kerja komputasi ke lapisan tepi secara signifikan mengoptimalkan kecepatan pemrosesan data dan melokalisasi stabilisasi sensor. Dengan melakukan penyesuaian baseline penting secara lokal pada mikrokontroler, sistem menghindari kebutuhan akan intensitas pasca-pemrosesan pada server jarak jauh, secara langsung menggabungkan metode pemrosesan siap lapangan yang disorot oleh (Enal Wahyudi et al., 2025). Alur kerja komputasi lokal ini secara drastis mengurangi overhead lalu lintas jaringan dan mengurangi risiko kehilangan data kritis saat koneksi tiba-tiba putus, memperkuat tolok ukur arsitektur yang telah ditetapkan untuk papan penerapan ESP32 modern (Fugnar et al., 2025; Hercog et al., 2023). Selain itu, pemrosesan sinyal mentah di tepi memastikan bahwa alarm ambang darurat dipicu secara lokal dalam hitungan milidetik, terlepas dari konektivitas internet. Sebagai kesimpulan, mengalihkan beban komputasi ke lapisan tepi sangat meningkatkan laju pemrosesan data dan melokalisasi stabilitas sensor, seperti yang ditunjukkan oleh analisis kami.

3.3. Validasi Teori Kalibrasi dan Akurasi Sensor Lokal.

Secara teori, temuan ini mendukung dan memperluas kerangka pelacakan sensor kecil yang sudah mapan dengan memvalidasi keandalan struktural dan akurasi pengukuran prototipe yang diusulkan. Keberhasilan pengkondisian sinyal lokal pada modul ESP32 kami sangat selaras dengan prinsip koreksi drift yang dibahas oleh (Di & Falasconi, 2012), membuktikan bahwa stabilisasi data tahap awal sangat penting untuk menjaga akurasi sensor kimia dalam penerapan jangka panjang. Selain itu, integrasi array sensor serbaguna seperti seri MQ dibangun di atas arsitektur multi-gas yang telah divalidasi oleh (Easterline et al., 2024). Dengan menyisipkan koreksi algoritmik ini ke dalam pengaturan perangkat keras yang gesit, penelitian ini melengkapi literatur yang ada dengan menyediakan desain node yang sepenuhnya fungsional dan telah diuji di lapangan. Pada akhirnya, hasil ini secara konseptual memvalidasi presisi pengukuran dan keandalan struktural prototipe yang disarankan, mendukung dan memperluas kerangka pelacakan sensor kecil yang sudah ada.

3.4. Dampak Telemetri Arsitektur terhadap Mitigasi Risiko Lingkungan.

Dalam hal dampak arsitektur, kemampuan sistem untuk menyelesaikan titik buta spasial dan temporal mengubah pelacakan lingkungan lokal menjadi model perlindungan yang sangat tangguh. Dengan menangkap fluktuasi frekuensi tinggi tingkat mikro, pendekatan ini mengatasi keterbatasan standar yang melekat pada jaringan telemetri luar ruangan tradisional (Irawan et al., 2021). Selain itu, dengan memberikan pembaruan hampir instan, kerangka kerja edge-actuated ini menunjukkan keunggulan operasional yang jelas dibandingkan infrastruktur lama yang berat di awan yang sering mengalami jeda transmisi parah (Fugnar et al., 2025; Hercog et al., 2023). Ketersediaan data berlatensi rendah ini secara langsung menyediakan alat praktis untuk penilaian risiko lingkungan dan kesehatan kerja di zona kepadatan tinggi (Masito, 2018; Sahri & Hutapea, 2019), yang

mengubah pemantauan udara dari alat pengarsipan pasif menjadi sistem mitigasi aktif. Mengenai dampak struktural, pelacakan

KESIMPULAN DAN SARAN.

Akhirnya, temuan utama dari studi ini adalah mengevaluasi keberhasilan keseluruhan dari kerangka pemantauan yang dirancang (IoT). Dengan menyusun hasil empiris, bagian-bagian berikut memberikan jawaban definitif terhadap tujuan penelitian terkait deteksi gas berbahaya secara real-time. Sintesis ini secara sistematis diuraikan untuk merangkum pencapaian teknis inti dari arsitektur edge-calibrated. Selain itu, diskusi transparan tentang batasan operasional yang tersisa menyoroti kendala praktis yang ditemui selama pengujian lapangan. Sebagai kesimpulan, temuan utama dari studi ini mengonfirmasi tingginya efektivitas dan keandalan dari kerangka pemantauan yang dikembangkan (IoT). Desain dan implementasi kerangka kerja edge-calibrated (IoT) secara efektif menangani penyelesaian data spasial.

Titik buta pelacakan tradisional dengan menyediakan deteksi gas berbahaya yang cepat dan berlatensi rendah. Data empiris yang dikumpulkan dari evaluasi lapangan mengonfirmasi bahwa pelaksanaan pemrosesan sinyal dan pemantauan ambang batas secara lokal pada mikrokontroler ESP32 meminimalkan keterlambatan transmisi. Pendekatan komputasi lokal ini memastikan pencatatan data berkelanjutan dan stabilitas sistem bahkan saat jaringan tiba-tiba terputus. Akibatnya, prototipe ini menunjukkan keunggulan operasional yang jelas dibandingkan platform lama yang berat dengan cloud yang sering mengalami jeda transmisi parah (Fugnar et al., 2025; Hercog et al., 2023). Pada akhirnya, dengan menawarkan deteksi gas berbahaya yang cepat dan berlatensi rendah, desain dan implementasi kerangka kerja edge-calibrated (IoT) berhasil mengatasi titik buta data spasial dari pelacakan konvensional.

lingkungan lokal menjadi paradigma perlindungan yang sangat tangguh karena kemampuan sistem untuk mengatasi titik buta

Meskipun mencapai tujuan pemantauan waktu nyata, sistem telemetri lingkungan ini menunjukkan keterbatasan teknis spesifik yang memengaruhi ketahanan penerapan jangka panjangnya. Kendala operasional utama adalah kerentanan tinggi node sensor terhadap pengurasan daya cepat di bawah interval pengambilan sampel frekuensi tinggi yang terus-menerus. Selain itu, array sensor elektrokimia menghadapi potensi pergeseran kalibrasi ketika terpapar perubahan iklim luar ruangan ekstrem yang berkepanjangan dalam periode lama (Di & Falasconi, 2012). Prototipe perangkat keras juga tetap terbatas pada zona transmisi lokal jarak pendek, bukan matriks jaringan area luas yang lebih luas. Pada akhirnya, kendala teknis ini menentukan batas ketahanan penerapan jangka panjang sistem saat ini, meskipun berhasil memenuhi tujuan pemantauan real-time.

Untuk membangun temuan dasar ini, penelitian di masa depan harus fokus pada peningkatan perangkat keras, khususnya dengan mengintegrasikan mikrokontroler berdaya rendah dan modul komunikasi jarak jauh. Pengembang masa depan harus mengintegrasikan modul pengumpulan energi khusus, seperti panel mikro-surya, untuk memastikan lapangan lapangan tetap tidak terganggu operasi tanpa kehabisan baterai. Selain itu, menyisipkan algoritma pembelajaran mesin ringan langsung ke lapisan tepi sangat disarankan untuk mengotomatisasi kalibrasi ulang sensor dinamis dan secara efektif mengatasi kesalahan pengukuran runtime (Di & Falasconi, 2012). Memperluas jaringan komunikasi untuk mendukung opsi telemetri jarak jauh juga memungkinkan sistem untuk memperluas batas penerapan dan melindungi koridor industri yang lebih besar (Yu-Wei Hung, Guan-Hua Lu, 2024). Pada akhirnya, studi berikutnya harus fokus pada peningkatan perangkat keras, terutama dengan memasukkan modul komunikasi

jarak jauh dan mikrokontroler berdaya rendah, untuk membangun penemuan fundamental ini.

DAFTAR PUSTAKA

Di, S., & Falasconi, M. (2012). Metode Koreksi Drift untuk Sensor Kimia Gas dalam Sistem Penciuman Buatan: Teknik dan Tantangan. Kemajuan dalam Sensor Kimia. https://doi.org/10.5772/33411

Fugnar, S., Awale, H., & Gawande, P. G. (2025). Analisis Komparatif Papan Pengembangan berbasis ESP32 (IoT): Arsitektur, Kinerja, dan Aplikasi dalam Ekosistem Modern (IoT). Jurnal Riset Internasional tentang Modernisasi dalam Teknologi & Ilmu Teknik Teknik, (11), 6385–6394. https://doi.org/10.56726/irjmets86116

Irawan, Y., Wahyuni, R., Muhardi, M., Fonda, H., Hamzah, M. L., & Muzawi, R. (2021). Pemantauan Sistem Waktu Nyata dan Teknologi Internet of Things (IoT) Berbasis Analisis dalam Mengukur Kualitas Udara Outdoor. Jurnal Internasional Teknologi Mobile Interaktif, 15(10),224–240. https://doi.org/10.3991/ijim.v15i10.20707

Kamran, M., Salahuddin, H., Kashif, I., Bashir, U., Danish, A., & your Rehman, A. (2024). Pemantauan Kualitas Udara dan Karbon Monoksida Menggunakan Sistem Berbasis (IOT). Jurnal Komputasi dan Informasi Biomedis, 7(1), 476–483.

Masito, A. (2018). Penilaian Risiko Kualitas Udara Ambien (NO2 Dan SO2) dan The Respiratory Disorders to Communities in the Kalianak Area of Surabaya. Jurnal Kesehatan Lingkungan, 10(4), 394. https://doi.org/10.20473/jkl.v10i4.2018.394-401

Nomura, K., & Amano, K. (2022). Teknologi pemantauan kualitas udara yang menggunakan/menggunakan sensor kecil. 16–25.

Sahri, M., & Hutapea, O. (2019). Penilaian Kualitas Udara Dalam Ruangan di Gedung Perkantoran Kota Surabaya. Jurnal Higiene Industri dan Kesehatan Kerja, 4(1), 1–12.

Yingshi Song, Jian Gao, Fahe Chai, Xiaoliang Qin, Q. S. (2019). Kemajuan dalam Penerapan Sensor Kualitas Udara dalam Pemantauan Lingkungan. Kemajuan dalam Perlindungan Lingkungan, 09(03),259–267. https://doi.org/10.12677/aep.2019.93037

Yu-Wei Hung, Guan-Hua Lu, L.-M. S. A. H.-L. T. (2024). Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan. 47–63.

Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Desain dan Implementasi Berbasis ESP32 (IoT) Perangkat. Sensor, 23(15). https://doi.org/10.3390/s23156739

Enal Wahyudi, A., Kurniyan Sari, S., Aziz, F., & Jeffry, J. (2025). Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara berbasis Internet of Things (IoT) untuk Meningkatkan Lingkungan Dalam Ruangan. Jurnal Teknik Sistem dan Komputer (JSCE), 6(1), 124–130. https://doi.org/10.61628/jsce.v6i1.1466

Easterline, L. M., Putri, A. A. Z. R., Atmaja, P. S., Dewi, A. L., & Prasetyo, A. (2024). Pemantauan Udara Pintar dengan Sensor MQ-2, MQ-7, MQ-8, dan MQ-135 berbasis (IoT) menggunakan NodeMCU ESP32. Ilmu Komputer Prosedural, 245, 815–824. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.

Milwati, S., Hadi, S., & Utami, N. W. (2015). Penerapan Promosi Kesehatan Metode Demonstrasi dan Keterampilan Pemeri-ksaan Payudara Sendiri (SADARI) bagi Ibu-Ibu PKK di Kota Malang. *Jurnal Informasi Kesehatan Indonesia*, *1*(2), 142–147.

O'connor CT, Soepanto A. (1999). Kunci Bergambar untuk Anopheles Betina dari Indonesia. Ditjen P2M & PL Depkes. Jakarta.

Baroji dan Federick. (1997). Fauna Anopheles di Daerah Endemis Malaria Kabupaten Jepara, Jawa Tengah. *Bull. Penelit. Kesehatan*. 20(3): h: 34-42