

Rancang Bangun Sistem Sensor Nirkabel (WSN) Berbasis IoT untuk Pemetaan Polusi Udara di Area Padat Penduduk

¹Theofilus Herly Hatonangan Samosir, ²Thia Annisa,

¹Sistem Komputer, Universitas Pamulang

²Teknik Elektro, Universitas Pamulang

E-mail: ¹theosamosir@unpam.ac.id

ABSTRAK

Polusi udara merupakan ancaman besar bagi kesehatan masyarakat, terutama di daerah yang padat penduduk dan tidak memiliki banyak fasilitas untuk memantau kualitas lingkungan. Untuk melacak polusi udara secara real-time, penelitian ini mengembangkan dan menerapkan Sistem Sensor Nirkabel (WSN) yang berbasis Internet of Things (IoT). R&D (Research and Development) digunakan dengan metode eksperimental. Menggabungkan mikrokontroler Arduino Uno, modul komunikasi ESP32, dan sensor gas MQ-135 untuk mengumpulkan data konsentrasi gas berbahaya adalah komponen yang dikembangkan dalam sistem ini. Platform IoT mengirimkan data dari node sensor secara nirkabel. Indeks kualitas udara mengolah data ini dan kemudian memberikan petakan digital. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi dan membedakan tingkat polusi dari kondisi aman (50–60 ppm) hingga kondisi berbahaya (100 ppm), yang memicu alarm buzzer. Jumlah polusi udara di wilayah padat penduduk dapat diukur dengan menggunakan WSN berbasis IoT ini. Selain memberikan peringatan dini kepada masyarakat, sistem ini membantu pihak berwenang membuat kebijakan mitigasi lingkungan yang tepat sasaran dengan menyediakan basis data yang valid.

Kata kunci : Sistem Sensor Nirkabel, Internet of Things, Pemetaan Polusi, MQ-135

ABSTRACT

Air Pollution is a serious threat to the public's health, especially in areas where there are little opportunities for maintaining the quality of the environment. The goal of this study is to develop and deploy the Internet of Things (IoT)-based Sensor Network System (WSN) for real-time udara pollution monitoring. The approach used is Research and Development (R&D) through experimental research. This system is developed by integrating the Arduino Uno microcontroller, the ESP32 communication module, and the MQ-135 gas sensor to collect data on gas concentrations. Data from the sensor node is sent nirkabel to the Internet of Things platform, converted into an udara quality index, and then processed digitally. The results of the investigation show that the system is capable of detecting and adjusting pollution levels in a responsive manner, from aman conditions (50–60 ppm) to berbahaya conditions (over 100 ppm), which automatically sound a warning buzzer. Through the use of this IoT-based WSN, sebaran polusi udara in residential areas can be carried out in a dynamic manner. This system helps the general public by providing valid baseline data for those who are interested in developing environmentally sound mitigation strategies.

Keyword : Wireless Sensor Network, Internet of Things, Pollution Mapping, MQ-135

1. PENDAHULUAN

Salah satu masalah lingkungan global paling penting yang dihadapi oleh masyarakat modern, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia, adalah polusi udara. Faktor utama yang menyebabkan penurunan kualitas udara ambien adalah pertumbuhan ekonomi yang pesat, masifnya urbanisasi, dan meningkatnya jumlah aktivitas industri dan kendaraan bermotor. Fenomena ini paling mungkin terjadi di daerah perkotaan dan pemukiman padat penduduk. Akumulasi gas berbahaya meningkat di daerah padat penduduk karena bangunan yang rapat dan emisi dari transportasi lokal dan aktivitas rumah tangga seperti pembakaran sampah. Terdapat bukti klinis bahwa paparan jangka panjang terhadap gas beracun seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), amonia (NH₃), dan senyawa organik mudah menguap (VOCs) dapat memperburuk infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), merusak organ paru-paru, dan meningkatkan risiko kanker.

Paparan polutan memiliki efek negatif yang tidak hanya merusak stabilitas ekosistem dan menyebabkan perubahan iklim global, tetapi juga berhubungan langsung dengan risiko kesehatan masyarakat. Beberapa studi epidemiologi menunjukkan bahwa polusi udara yang berkelanjutan dapat memperburuk gangguan fungsi pernapasan, menyebabkan infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), peningkatan risiko kanker, dan kematian dini. Pemantauan kualitas udara yang berkelanjutan adalah alat penting untuk mengurangi risiko karena polutan gas selalu berubah dan seringkali tidak terlihat (Snyder et al., 2013)

Namun, hambatan utama dalam mengatasi masalah ini adalah keterbatasan infrastruktur yang ada. Sistem stasiun pemantau kualitas udara resmi milik

pemerintah biasanya berukuran besar, memerlukan biaya tinggi untuk operasional, dan tersebar secara terbatas atau tidak merata di wilayah padat penduduk. Akibatnya, sulit untuk melakukan pemantauan manual atau pemantauan spasial yang tepat pada level lingkungan mikro, seperti perumahan atau sekolah. Untuk mengatasi kekurangan data ini, diperlukan perangkat monitoring alternatif yang mandiri, ekonomis, efisien, dan dapat menyajikan visualisasi data secara real-time kepada masyarakat. Namun, hambatan utama dalam mengatasi masalah ini adalah keterbatasan infrastruktur yang ada. Sistem stasiun pemantau kualitas udara resmi milik pemerintah biasanya memiliki dimensi yang besar, memerlukan biaya operasional yang tinggi, dan tersebar sangat luas. (Nasrulloh & Wijaya, 2023) Dengan kekurangan data ini, diperlukan perangkat monitoring alternatif yang mandiri, ekonomis, dan efisien. Perangkat ini juga harus dapat memberikan masyarakat visualisasi data secara real-time.

Perancangan perangkat pemantau kualitas udara berbiaya rendah (monitor kualitas udara murah) sangat menjanjikan di tengah kemajuan baru di bidang sistem tertanam (embedded system) dan teknologi sensor elektrokimia. Sensor MQ-135 adalah salah satu sensor yang terbukti dapat mendeteksi banyak gas beracun dalam konsentrasi rendah hingga sedang. Ini dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler berbasis ATmega328P, seperti Arduino Uno (Samosir & Hidayat, 2026), untuk mengubah sinyal analog menjadi representasi digital yang informatif. Mekanisme perubahan resistansi internal sensor bergantung pada konsentrasi gas di sekitarnya.

Studi sebelumnya bertujuan untuk mengoptimalkan arsitektur perangkat serupa. Sebagai contoh, (Andika, 2021) menunjukkan bahwa sensor MQ-135 dan Arduino Uno bekerja sama dengan baik untuk mendeteksi dinamika konsentrasi

gas di udara secara langsung dan dapat memberikan peringatan dini (early warning). Sebaliknya, penelitian yang dilakukan oleh (Sari, 2022) mengeksplorasi kemampuan alat ini dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang berbasis Internet of Things (IoT) untuk pengiriman data jarak jauh melalui platform berbasis web. Meskipun sistem berbasis Internet of Things memiliki jangkauan yang luas, penerapan di lapangan terkadang menjadi tantangan karena jaringan internet lokal yang tidak stabil, ketergantungan daya yang lebih tinggi, dan kompleksitas konfigurasi bagi masyarakat umum.

Oleh karena itu, penelitian ini berkonsentrasi pada pembuatan sistem deteksi polusi udara mandiri dengan penekanan pada efisiensi biaya, responsivitas deteksi lokal, dan kemudahan pengoperasian melalui integrasi LCD dan alarm buzzer langsung. Arsitektur ini diharapkan akan memungkinkan sistem untuk memberikan peringatan dini yang tanggap di lokasi pengukuran saat jaringan tidak terputus-putus. Perangkat ini dibuat sebagai alat teknologi tepat guna yang dapat mendeteksi secara interaktif dan akurat perubahan kadar gas berbahaya dalam lingkungan mikro.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Parameter Kualitas Udara dan Polusi Udara

Internet Polusi udara didefinisikan sebagai kehadiran substansi fisik, kimia, atau biologi di atmosfer dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan manusia, tumbuhan, dan hewan, serta mengganggu estetika dan kenyamanan ekosistem (Manisalidis et al., 2020). Polutan udara dapat dibagi menjadi dua kategori utama: gas beracun (atau partikel padat) dan partikel padat (atau partikulat) berdasarkan sifat materialnya. Dalam pengawasan lingkungan mikro perkotaan, beberapa jenis gas pencemar yang harus

diperhatikan adalah karbon monoksida (CO), amonia (NH_3) (Utama & Kolago, 2024), nitrogen oksida (NO_2), dan senyawa organik yang mudah menguap atau VOCs (Organization, 2021). Gas-gas ini biasanya muncul karena aktivitas industri, dekomposisi limbah organik, dan pembakaran mesin kendaraan bermotor yang tidak sempurna.

2.2 Sensor Gas Semiconductor (MQ-135)

Sensor gas elektrokimia berbasis semikonduktor oksida logam (biasanya menggunakan lapisan SnO_2 atau timah dioksida) Sensor MQ-135 dirancang untuk mengidentifikasi kontaminan gas di udara ambien. Prinsip kerja sensor ini bergantung pada bagaimana nilai konduktivitas elektrik permukaannya berubah saat terhubung dengan molekul gas pencemar. Dalam kondisi udara bersih, ketika sensor dipanaskan oleh elemen pemanas internal (heater), oksigen di udara akan teradsorpsi pada permukaan semikonduktor dan menarik elektron bebas. Namun, ketika udara sekitar mengandung gas reduksi seperti CO, NH_3 , atau asap, gas tersebut akan bereaksi dengan oksigen yang teradsorpsi dan melepaskan kembali elektron ke pita konduksi semikonduktor. Dalam proses ini, resistansi sensor menurun secara signifikan, yang sebanding dengan konsentrasi gas di lingkungan (Pratama & Ramadhan, 2019). Perubahan resistansi ini kemudian diubah menjadi sinyal tegangan analog, yang pin analog mikrokontroler dapat memproses.

2.3 Mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P

Papan rangkaian elektronik open-source bernama Arduino Uno berbasis mikrokontroler ATmega328P dan berfungsi sebagai unit pemroses pusat dalam sistem tertanam (Hidayat & Sanjaya, 2020). Papan ini memiliki enam pin input analog dan empat belas pin

input/output digital. Beberapa di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM. Pin input analog Arduino Uno terhubung ke fitur Konverter Analog-to-Digital (ADC) internal beresolusi 10-bit. Fungsi ADC adalah mengubah tegangan analog kontinu yang dihasilkan oleh sensor MQ-135, yang berkisar antara 0V dan 5V, menjadi nilai digital diskret yang berkisar antara 0 dan 1023. Nilai digital dikalibrasi ke dalam satuan PPM (Parts Per Million) melalui algoritma pemrograman dalam bahasa C/C++ pada software IDE Arduino. Kemudian, nilai ini dikirimkan ke perangkat keluaran, seperti LCD dan aktuator peringatan (Setiawan, 2022)

2.4 Buzzer Elektromagnetik

Buzzer adalah bagian dari aktuator peringatan dini (alarm peringatan dini). Prinsip induksi elektromagnetik menjalankan perangkat ini. Ini menggetarkan diafragma internal untuk menghasilkan suara dengung yang kuat ketika mikrokontroler mengetahui bahwa tingkat gas pencemar telah melampaui ambang aman yang ditetapkan (Andika, 2021)

3. METODOLOGI

Untuk merancang, membuat, dan menguji prototipe alat pendeteksi polusi udara berbasis mikrokontroler, penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratoris. Penelitian ini dibagi menjadi empat tahap utama, yaitu

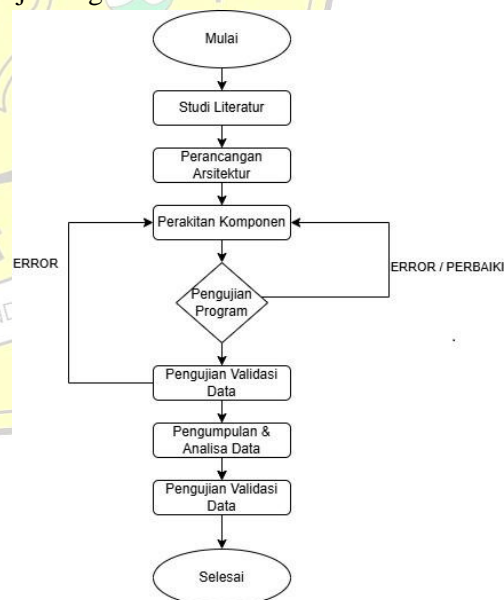
1. Tahap analisis kebutuhan perangkat lunak dan perangkat keras sistem
2. Tahap perancangan dan integrasi sistem

3. Tahap pemeriksaan fungsionalitas komponen secara menyeluruh dan parsial

langkah-langkah pengambilan data dan analisis kinerja sensor dalam berbagai lingkungan mikro.

3.1 Flowchart Sistem

Sensor Diagram alir berikut menunjukkan proses pelaksanaan penelitian secara sistematis, Penelitian dimulai dengan mempelajari literatur dan kemudian membuat arsitektur alat. Setelah arsitektur selesai, Menurut (Samosir & Hidayat, 2026) komponen dipasang dan program diuji. Sistem akan diperiksa kembali pada tahap perakitan dan pemrograman jika alat tidak bekerja. Pengujian validasi data lingkungan, pengumpulan hasil, dan penyusunan laporan akhir naskah dilakukan jika alat bekerja dengan baik.



Gambar 3.1 Flowchar Sistem

3.2 Arsitektur Perangkat Keras

Sensor Sistem pemantau kualitas udara ini terdiri dari tiga komponen utama: input (masukan), pemrosesan

(proses), dan keluaran (keluaran). Diagram blok berikut menunjukkan hubungan antar komponen tersebut secara skematis:

- Blok Input: Sensor gas MQ-135 mendeteksi konsentrasi gas berbahaya di udara ambien dan menghasilkan sinyal tegangan analog dari konsentrasi gas.
- Blok Pemrosesan: Menggunakan mikrokontroler Arduino Uno (ATmega328P), pin A0 menerima input analog. Kemudian, mikrokontroler mengkonversi nilai tegangan menjadi satuan PPM (Parts Per Million), dan melakukan konversi ADC 10-bit.
- Blok Output: Terdiri dari Liquid Crystal Display (16x2) berbasis I2C yang dapat menampilkan data teks secara real-time dan buzzer elektromagnetik untuk memberi tahu orang ketika parameter gas melewati ambang batas normal.

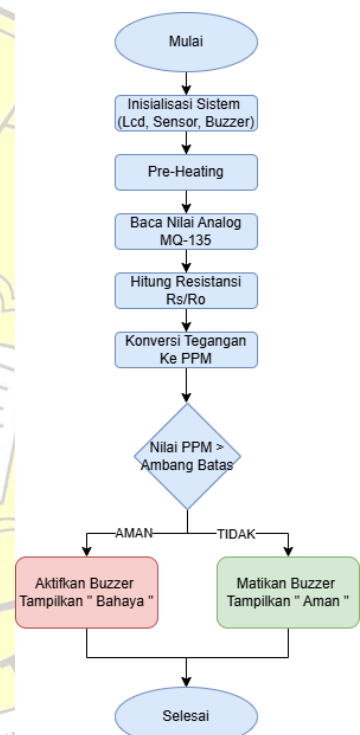


Gambar 3.2 Arsitektur Perangkat

3.3 Perancangan Program Mikrokontroler

Perancangan Algoritma pengkondisian sinyal mengontrol proses pembacaan sensor di perangkat lunak Arduino IDE. Agar sensor MQ-135 mencapai stabilitas termal, mereka membutuhkan waktu

pemanasan awal. Nilai resistansi sensor di udara bersih (R_0) diperoleh dengan menggunakan basis referensi linearitas. Nilai resistansi dinamis R_s akan berubah saat sensor menemukan gas pencemar. Mikrokontroler menggunakan persamaan pendekatan kurva karakteristik sensor yang ada pada datasheet untuk membaca rasio R_s / R_0 secara kontinu dan mengkonversinya ke nilai PPM. Diagram logika berikut menunjukkan alur kerja logika program mikrokontroler:



Gambar 3.3 Program pada Sistem

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, sebuah alat pendeteksi polusi udara berbasis sensor MQ-135 dan mikrokontroler Arduino Uno telah dirancang dan dibuat dengan baik. Alat ini memantau kualitas udara secara real-time dengan mendeteksi konsentrasi gas-gas yang dapat mencemari lingkungan. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama: sensor MQ-135 sebagai pendeteksi gas, mikrokontroler Arduino Uno

sebagai pengolah data, LCD 16x2 sebagai media tampilan informasi, dan LED sebagai penggerak.

Hasil perancangan menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat terhubung dan melakukan fungsi yang direncanakan. Sensor MQ-135 dapat mengirimkan data pembacaan gas ke Arduino Uno. Data ini kemudian diproses dan ditampilkan sebagai informasi kualitas udara pada LCD. Selain itu, sistem juga memiliki kemampuan untuk memberikan peringatan otomatis melalui buzzer ketika tingkat polusi melebihi batas aman.

4.1 Pengujian Perangkat Keras

Sebelum pengujian sistem secara terintegrasi, masing-masing komponen elektronik diuji secara parsial untuk memastikan bahwa parameter elektrik berada pada rentang operasional yang aman, seperti yang ditunjukkan dalam lembar data. Dengan menggunakan multimeter digital, tegangan kerja pada pin VCC sensor MQ-135, LCD 16x2 I2C, dan buzzer diuji. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pin 5V Arduino Uno memiliki suplai tegangan konstan 4,92V +/- 0,05V. Nilai ini masih berada di bawah batas toleransi operasional masing-masing komponen, yaitu 4,5V hingga 5,5V. Isyarat digital dari pin ke buzzer dan modul I2C juga stabil tanpa adanya perubahan impedansi yang dapat menyebabkan interferensi sinyal.

4.2 Pengujian Blackbox Alat

Untuk menguji sensitivitas, kecepatan respons, dan keandalan fungsionalitas sistem alarm otomatis, pengujian dilakukan secara langsung di lapangan. Pengujian nirkabel ini dibagi menjadi dua skenario lingkungan mikro yang berbeda. Yang pertama adalah ruangan kontrol di mana kondisi udara bersih; yang kedua adalah kondisi udara yang tercemar oleh gas atau asap kendaraan atau pembakaran sampah. Ringkasan data kuantitatif hasil

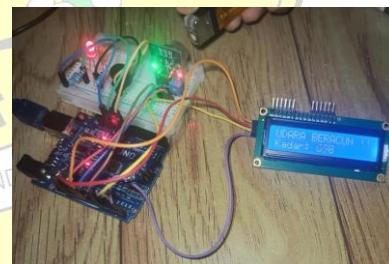
pembacaan kadar polusi udara dalam satuan PPM (Parts Per Million) dan status indikator output yang teramati selama pengujian disajikan di sini.

No	Skenario Lingkungan	Nilai Sensor (PPM)	Visual pada LCD	Status Alarm Buzzer	Status LED indikator	Kategori Kualitas Udara
1	Kamar tidur/Ruangan ber-AC	50 – 60 PPM	"AMAN"	Mati (Tidak Berbunyi)	Hijau Aktif	Bersih / Normal
2	Ruang Lab / Kelas Kosong	65 – 80 PPM	"AMAN"	Mati (Tidak Berbunyi)	Hijau Aktif	Bersih / Normal
3	Area Parkir Sepeda Motor	110 – 145 PPM	"BAHAYA"	Menyala Otomatis	Merah Aktif	Tercemar
4	Dekat Pembakaran Sampah	180 – 250 PPM	"BAHAYA"	Menyala Otomatis	Merah Aktif	Tercemar / Kritis

Gambar 4.1 Pengujian Alat

Perangkat yang dikembangkan menunjukkan konsistensi fungsionalitas yang tinggi, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Sistem menetapkan status "AMAN" dalam lingkungan udara bersih pada 50–60 PPM. Sebaliknya, ketika alat terpapar emisi gas berbahaya, seperti asap kendaraan atau pembakaran sampah, yang menghasilkan konsentrasi gas di atas 100 PPM, sistem secara otomatis mengubah tampilan teks menjadi "BAHAYA", dan alarm buzzer secara otomatis dihidupkan tanpa latensi.

4.3 Pengujian Prototype



Gambar 4.2 Status Kadar Beracun

Situs Pengujian alat pendeteksi polusi udara dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor MQ-135 untuk mendeteksi perubahan kualitas udara dalam berbagai kondisi lingkungan. Pengujian ini dilakukan dengan mengamati respons sensor terhadap udara bebas dan polutan. Kemudian, hasil pembacaan yang ditampilkan pada LCD dibandingkan dengan kondisi lingkungan sebenarnya.

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh bagian sistem, termasuk sensor MQ-135, Arduino Uno, LCD, indikator LED, dan buzzer, bekerja sesuai dengan desain yang telah dibuat.

Pada tahap pertama, pengujian dilakukan di area terbuka yang jauh dari sumber asap kendaraan dan pembakaran. Hasil pengukuran sensor menunjukkan nilai rata-rata antara 50 dan 60 ppm. Dalam situasi seperti itu, LCD menampilkan status "AMAN", indikator LED menunjukkan kondisi normal, dan buzzer tidak aktif. Hasil menunjukkan bahwa sensor dapat mengidentifikasi kondisi udara ketika masih berada di bawah ambang aman, sehingga tidak ada peringatan yang diberikan kepada pengguna.



Gambar 4.3 Status Kadar Gas Aman

Pengujian lanjutan dilakukan di tempat yang terkontaminasi, seperti tempat yang terkena asap kendaraan bermotor atau pembakaran kertas. Nilai pembacaan sensor dalam situasi ini akan meningkat hingga mencapai 100 ppm. Jika nilai tersebut melebihi ambang batas yang ditentukan dalam program, Arduino secara otomatis akan mengaktifkan buzzer sebagai peringatan. Selain itu, LCD menampilkan status "BAHAYA" untuk memberi tahu pengguna bahwa kualitas udara telah menurun dan kondisi tidak aman. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat menanggapi perubahan konsentrasi gas di sekitarnya dengan cepat.

Selama pengujian, sensor MQ-135 menunjukkan kemampuan mendeteksi tingkat gas udara yang berubah. Ketika konsentrasi polutan meningkat, respons sensor relatif cepat, sehingga informasi di LCD dapat diperbarui secara real-time. Selain itu, sebagai pengendali utama, Arduino Uno berfungsi dengan baik untuk mengolah data sensor, membandingkannya dengan nilai ambang batas, dan secara otomatis mengontrol perangkat output seperti buzzer, LCD, dan LED.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa detektor polusi udara yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian. Alat ini dapat secara langsung menampilkan informasi tentang kualitas udara dan membedakan antara udara bersih dan tercemar. Selain itu, mereka dapat memberikan peringatan dini ketika tingkat polusi melebihi batas aman yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, alat ini dapat digunakan sebagai sistem pemantauan kualitas udara sederhana yang membantu pengguna secara cepat dan mudah mengetahui kondisi lingkungan sekitarnya.

5. KESIMPULAN

Hasil perancangan, perakitan, dan pengujian eksperimental awal alat pendeteksi polusi udara ini mencapai beberapa kesimpulan utama: Berbasis mikrokontroler Arduino Uno (ATmega328P) dan sensor gas MQ-135, sistem mekanis dan pemrograman alat pendeteksi polusi udara telah dirancang dan diintegrasikan dengan baik. Dengan koneksi yang stabil antara komponen masukan dan keluaran, mikrokontroler dapat memproses sinyal analog sensor melalui fitur ADC 10-bit. Ini memungkinkan mikrokontroler untuk menghindari kesalahan software atau kegagalan sistem tertanam (embedded system). Perangkat yang dikembangkan telah terbukti efektif dan responsif dalam mendeteksi perubahan kualitas udara

dalam berbagai lingkungan mikro secara real-time. Sensor mendeteksi kadar polutan rendah pada 50–60 PPM pada pengujian kontrol (ruangan bersih/ber-AC). Namun, sensor secara tanggap membaca lonjakan besar antara 110 dan 250 PPM ketika terpapar asap kendaraan dan pembakaran sampah. Sistem peringatan dini otomatisasi dapat langsung aktif tanpa latensi jaringan setelah kadar polusi melampaui ambang batas kritis 100 PPM melalui visualisasi teks LCD dan bunyi alarm buzzer auditori.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika, R. (2021). Rancang Bangun Alat Deteksi Polusi Udara Menggunakan Sensor MQ-135 dan Arduino. *Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 55–62.
- Hidayat, T., & Sanjaya, W. (2020). Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Sensor MQ-135 Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 9(3), 185–192.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental pollution and health effects. *Frontiers in Public Health*, 8, 14.
- Nasrulloh, M., & Wijaya, A. (2023). Integrasi Sensor Gas dan Teknologi IoT untuk Pemantauan Pencemaran Udara Real-Time. *Jurnal Rekayasa Sistem Dan Teknologi*, 5(2), 102–110.
- Organization, W. H. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.
- Pratama, Y., & Ramadhan, F. (2019). Prototipe Detektor Gas Berbahaya di Lingkungan Domestik Menggunakan Sensor Semi-Konduktor. *Jurnal Otomasi Dan Instrumentasi*, 11(1), 23–30.
- Samosir, T. H. H., & Hidayat, I. (2026). Perancangan Sistem Monitoring Volume Air Dengan Sensor Ultrasonic HC-SR04 Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno. *IKRA-ITH Teknologi Jurnal Sains Dan Teknologi*, 10(1), 84–90.
- Sari, M. (2022). Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT Menggunakan ESP32. *Jurnal Elektronika Dan Komputer*, 9(1), 40–48.
- Setiawan, B. (2022). Rancang Bangun Perangkat Peringatan Dini Gas Karbon Monoksida Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Inovasi Teknologi Dan Edukasi Vokasi*, 10(2), 78–85.
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Gross-Kushner, R., Olstad, D. L., Graham, J. A., Joseph, D. F., Oliver, R. C., & James, G. F. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377.
- Utama, Y. A. K., & Kolago, D. P. (2024). Desain dan analisis akurasi alat ukur ketinggian air di sungai untuk sistem peringatan dini bencana banjir berbasis Internet of Things. *Infotronik: Jurnal Teknologi Informasi Dan Elektronika*, 9(1).