



Implementasi dan Optimasi Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Sensor Gas MQ-135 dan SHT21 dengan Metode IoT

Theopilus S.P Sibarani*, Eko Setia Budi, Abdul Rahman Kadafi

Fakultas Teknologi Informasi, Program Studi Informatika, Universitas Bina Sarana Informatika, Jakarta, Indonesia

Email: ^{1,*}theosibarani14@gmail.com, ²eko.etb@bsi.ac.id, ³abdul.alk@bsi.ac.id

Email Penulis Korespondensi: theosibarani14@gmail.com

Abstrak—Penurunan kualitas udara akibat industrialisasi dan urbanisasi menuntut tersedianya metode pemantauan yang otomatis, real-time, dan terjangkau, sementara pengukuran manual oleh petugas kesehatan lingkungan masih terbatas pada kunjungan berkala. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan dan mengoptimalkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor gas MQ-135 dan sensor suhu-kelembaban SHT21, dengan target optimasi pada akurasi kalibrasi sensor gas melalui pendekatan regresi linear serta kecepatan dan keandalan pengiriman data ke basis data MySQL. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi parameter lingkungan seperti konsentrasi gas berbahaya, suhu, dan kelembaban, yang kemudian dikirimkan secara real-time ke platform berbasis web untuk visualisasi dan analisis data. Proses implementasi mencakup integrasi perangkat keras berupa mikrokontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266 dengan sensor MQ-135 dan SHT21, serta pengembangan perangkat lunak yang memungkinkan pengolahan informasi dan komunikasi IoT. Pengujian dilakukan untuk mengukur akurasi sensor, stabilitas pengiriman informasi, dan keandalan sistem dalam kondisi lingkungan berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan informasi yang akurat dan responsif terhadap perubahan parameter lingkungan, serta mengirimkan notifikasi jika konsentrasi gas melebihi ambang batas. Sistem ini tidak hanya berfungsi untuk memantau, tetapi juga untuk Kontribusi utama penelitian ini adalah tersedianya arsitektur sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan yang memadukan basis data mandiri (self-hosted), metode kalibrasi sensor gas MQ-135 yang divalidasi secara kuantitatif, serta integrasi notifikasi dini melalui web dan Telegram dalam satu sistem yang teruji keandalannya. memberi tahu orang tentang pentingnya menjaga kualitas udara. Pengembangan tambahan seperti penggabungan analitik prediktif dan AI untuk menganalisis data kualitas udara yang lebih akurat muncul sebagai hasil dari penelitian ini.

Kata Kunci: Kualitas Udara; Internet of Things (IoT); Sensor MQ-135; SHT21; Sistem Monitoring; ESP8266

Abstract—The decline in air quality caused by industrialization and urbanization requires an automated, real-time, and affordable monitoring method, since manual measurement by environmental health officers is still limited to periodic site visits. This study aims to implement and optimize an air quality monitoring system based on the Internet of Things (IoT) using the MQ-135 gas sensor and the SHT21 temperature-humidity sensor, targeting improved gas-sensor calibration accuracy through linear regression and faster, more reliable data transmission to a MySQL database. The system is designed to detect environmental parameters such as hazardous gas concentrations, temperature, and humidity, which are then transmitted in real-time to a web-based platform for visualization and data analysis. The implementation process involves integrating hardware, including the Arduino Uno and NodeMCU ESP8266 microcontrollers with the MQ-135 and SHT21 sensors, as well as developing software that enables information processing and IoT communication. Testing was conducted to evaluate sensor accuracy, data transmission stability, and system reliability under varying environmental conditions. The results demonstrate that the system can provide accurate information and respond effectively to changes in environmental parameters, sending notifications when gas concentrations exceed predefined thresholds. This system not only serves as a monitoring tool but also as an educational medium to raise awareness of the importance of maintaining air quality. The main contribution of this research is a self-hosted air quality monitoring architecture that combines a quantitatively validated MQ-135 gas-sensor calibration method with an integrated web- and Telegram-based early-warning system. Further development opportunities, such as incorporating predictive analytics and AI for more accurate air quality data analysis, emerge as outcomes of this research.

Keywords: Air Quality; Internet of Things (IoT); MQ-135 Sensor; SHT21 Sensor; Monitoring System; ESP8266

1. PENDAHULUAN

Udara merupakan suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi (atmosfer), yang komposisinya tidak selalu konstan. Udara merupakan komponen lingkungan yang penting dalam kehidupan, sehingga perlu dipelihara dan ditingkatkan kualitasnya [1]. Umumnya, dampak kesehatan yang paling sering terjadi akibat pencemaran udara adalah Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), termasuk asma, bronkitis, dan gangguan pernapasan lainnya. Jika kualitas udara dalam ruangan buruk, maka gangguan kesehatan dan kenyamanan lingkungan akan mempengaruhi kinerja dari setiap individu yang berada di dalam ruangan tersebut. Oleh karena itu, menjaga kualitas udara dalam ruangan harus menjadi perhatian agar dapat menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman untuk ditinggali [2].

Kualitas udara yang memenuhi standar kesehatan sangat penting bagi kesehatan fisik makhluk hidup dan merupakan faktor penting dalam menciptakan lingkungan yang sehat. Udara yang dihirup mengandung oksigen yang sangat penting bagi kelangsungan hidup, namun juga terdapat zat lain seperti karbon monoksida, karbon dioksida, formaldehid, jamur, virus, bakteri, dan debu. Terkadang udara di dalam maupun luar ruangan dapat terkontaminasi oleh zat-zat berbahaya yang, dalam batas tertentu, masih dapat dinetralisasi tubuh, namun jika melebihi ambang batas dapat menyebabkan masalah kesehatan. World Health Organization (WHO) melalui pedoman kualitas udara dalam ruangan (WHO Guidelines for Indoor Air Quality) menetapkan ambang batas aman untuk sejumlah polutan, misalnya konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yang disarankan tidak melebihi kisaran 1000 ppm untuk kenyamanan dan kesehatan penghuni ruangan, sementara Kementerian Kesehatan RI melalui Peraturan Menteri Kesehatan tentang Persyaratan Kesehatan Lingkungan turut menetapkan baku mutu udara dalam ruang sebagai acuan bagi pemilik rumah, pengembang perumahan,



dan pemerintah daerah. Standar-standar inilah yang menjadi acuan ambang batas peringatan pada sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Upaya penanggulangan kualitas udara yang buruk di dalam ruangan perlu dilakukan secara berkelanjutan karena dampaknya dapat mengganggu kesehatan. Namun, pemantauan kualitas udara di dalam rumah saat ini masih umumnya dilakukan secara manual oleh petugas kesehatan lingkungan di Puskesmas atau dinas kesehatan kabupaten/kota, yaitu dengan membawa alat ukur dan melakukan pengukuran langsung di lokasi secara berkala. Pendekatan manual ini memiliki keterbatasan karena hanya memberikan gambaran kondisi udara pada satu waktu tertentu (snapshot), tidak dapat memantau secara berkelanjutan, serta bergantung pada jadwal kunjungan petugas, sehingga kondisi udara yang memburuk di luar jadwal pemantauan tidak dapat terdeteksi secara dini. Kesenjangan (gap) inilah yang mendasari perlunya sistem peringatan dini atau pemantauan kualitas udara yang dapat bekerja secara otomatis dan berkelanjutan [3].

Beberapa penelitian sebelumnya telah merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan parameter seperti suhu, kelembapan, karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), dan partikel debu, umumnya memanfaatkan platform cloud pihak ketiga seperti ThingSpeak atau Google Sheets untuk penyimpanan data. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas udara yang mengintegrasikan mikrokontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266 dengan basis data MySQL yang dikelola secara mandiri (self-hosted), sehingga data pengukuran sepenuhnya berada di bawah kendali pengguna, disertai proses kalibrasi sensor gas MQ-135 menggunakan pendekatan regresi berbasis datasheet resmi agar nilai ppm yang dihasilkan lebih akurat. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada kombinasi arsitektur basis data mandiri, metode kalibrasi sensor yang terukur, serta integrasi notifikasi dini melalui Telegram dan dashboard web dalam satu sistem yang terpadu.

Kesenjangan penelitian ini dapat dijelaskan secara lebih rinci melalui lima studi terkait terkini. Pertama, Yasin et al. [1] mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT menggunakan perangkat sensor yang tersedia secara komersial, namun proses kalibrasi sensor gas belum divalidasi secara kuantitatif terhadap datasheet resmi sehingga akurasi pembacaan konsentrasi gas belum terukur. Kedua, Khan et al. [3] merancang jaringan sensor nirkabel berbasis protokol ESP-MESH untuk pemantauan kualitas udara dalam dan luar ruangan, tetapi penelitian tersebut berfokus pada aspek konektivitas jaringan dan belum membahas metode kalibrasi sensor gas maupun pengujian keandalan pengiriman data secara kuantitatif. Ketiga, Mota et al. [4] menerapkan arsitektur IoT untuk memantau kualitas udara dalam ruangan khusus pada periode tidur menggunakan mikrokontroler ESP32-C6, namun implementasinya spesifik pada satu konteks penggunaan dan belum menyajikan basis data mandiri maupun notifikasi multi-kanal. Keempat, tinjauan sistematis oleh Alsamrai et al. [5] terhadap studi IoT untuk kualitas udara dalam dan luar ruangan menyimpulkan bahwa mayoritas sistem yang ada masih mengandalkan platform cloud pihak ketiga serta jarang menyajikan prosedur kalibrasi sensor yang terukur dan tervalidasi secara kuantitatif. Kelima, Baqer et al. [6] mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan untuk unit perawatan intensif dan gawat darurat yang melaporkan data ke platform cloud pihak ketiga, namun belum mengintegrasikan notifikasi dini multi-kanal yang diuji keandalannya secara kuantitatif, misalnya dari sisi delay dan tingkat kehilangan paket data. Berdasarkan kelima kesenjangan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut melalui: (1) penyediaan basis data mandiri (self-hosted) sehingga data pengukuran sepenuhnya berada di bawah kendali pengguna; (2) penerapan dan validasi kuantitatif metode kalibrasi sensor gas MQ-135 berbasis regresi terhadap datasheet resmi; serta (3) integrasi notifikasi dini melalui Telegram dan dashboard web dalam satu sistem yang teruji keandalan pengiriman datanya.

Selain lima studi utama tersebut, sejumlah penelitian relevan lainnya turut memperkaya kajian pustaka pada bidang pemantauan kualitas udara berbasis IoT. Rochmania et al. [7] memantau kandungan CO₂ berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP8266 dan sensor MQ-135, sedangkan Mashuri dan Zulfa [8] mengembangkan sistem pendukung keputusan kualitas udara berskala kota; kedua penelitian ini masih bergantung pada platform pihak ketiga untuk penyimpanan dan analisis data. Prakoso dan Wellem [9] serta Sadali et al. [10] masing-masing memanfaatkan Wemos D1 Mini dan platform IoT umum (Blynk) untuk pemantauan kualitas udara di jalan raya, namun belum menyajikan metode kalibrasi sensor gas yang divalidasi secara kuantitatif terhadap datasheet resmi. Taştan et al. [11] menerapkan pendekatan e-nose berbasis IoT untuk menganalisis dampak aktivitas manusia terhadap kualitas udara dalam ruangan, sedangkan Surbakti et al. [12] menerapkan protokol MQTT dengan sensor DHT22 dan ESP32 untuk sistem monitoring kualitas udara ruangan; keduanya belum memadukan notifikasi multi-kanal dengan basis data mandiri sebagaimana pada penelitian ini. Kuncoro et al. [13] mengembangkan node sensor VOC nirkabel hemat daya untuk pemantauan kualitas udara dalam ruangan, dan Azizah et al. [14] mengintegrasikan sensor PM2.5, PM10, CO₂, dan NO₂ dengan pembelajaran mesin serta notifikasi otomatis, namun keduanya belum menonjolkan aspek kalibrasi sensor gas MQ-135 berbasis regresi maupun kendali basis data mandiri. Salasa et al. [15] merancang alat pemantau polusi udara menggunakan sensor gas TGS-2442, sementara Aserkar et al. [16] menerapkan sensor optik canggih berbasis IoT untuk pemantauan kualitas udara perkotaan. Seppewali et al. [17] mengembangkan sistem notifikasi berbasis ESP8266 untuk ruang produksi, dan Hasanuddin serta Herdianto [18] merancang sistem deteksi dini pencemaran udara berbasis IoT; keduanya menunjukkan pentingnya notifikasi dini namun belum diuji keandalan pengiriman datanya secara kuantitatif. Ratri et al. [19] merancang sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT, sedangkan Barros et al. [20] mengembangkan kerangka kerja citizen-science IoT berbiaya rendah untuk manajemen kualitas udara dalam ruangan pada lingkungan sekolah. Alsamrai et al. [21] menerapkan pembelajaran mesin untuk pemantauan kualitas udara luar ruangan secara cerdas, sementara Megahed dan Ghoneim [22] meninjau strategi desain bangunan pascapandemi yang memengaruhi kualitas udara dalam ruangan. Kureshi et al. [23] menerapkan model IoT dan COM-B untuk mendorong perubahan perilaku terkait kualitas udara dalam ruangan, Abdel-Salam [24] mengkaji hubungan antara kualitas udara dalam ruangan dan faktor



sosial-ekonomi, sedangkan Anand et al. [25] meninjau kontrol energi bangunan dan kualitas lingkungan dalam ruangan berbasis okupansi pascapandemi. Studi-studi tersebut secara kolektif menegaskan bahwa kombinasi basis data mandiri, kalibrasi sensor gas yang divalidasi secara kuantitatif, dan notifikasi dini multi-kanal yang teruji keandalannya masih jarang diintegrasikan dalam satu sistem yang utuh, sebagaimana ditawarkan oleh penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengoptimalkan sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT menggunakan sensor gas MQ-135 dan sensor suhu-kelembaban SHT21, dengan target khusus: (1) meningkatkan akurasi pembacaan konsentrasi gas melalui kalibrasi regresi linear terhadap datasheet resmi sensor, dan (2) memastikan pengiriman data ke basis data MySQL serta notifikasi melalui website dan Telegram dapat berlangsung secara stabil dan real-time. Dengan sistem ini, petugas kesehatan lingkungan hanya perlu datang sekali ke lokasi untuk memasang alat dan dapat memonitor

hasil pengukuran dari jarak jauh dan real-time melalui situs web yang tersedia. Beberapa penelitian sebelumnya telah merancang sistem pemantauan tingkat kualitas udara, yang meliputi parameter seperti suhu, kelembapan, karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), dan partikel debu. Dalam penelitian ini, sensor SHT21 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan, sementara sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi kualitas udara umum, termasuk gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂). Mikrokontroler yang digunakan ialah Arduino Uno sebagai pengendali utama yang membaca data sensor, kemudian data tersebut diteruskan secara serial ke NodeMCU ESP8266 untuk dikirimkan ke basis data MySQL melalui jaringan internet. Sistem ini dilengkapi dengan tampilan LCD, notifikasi peringatan dini, dan fitur ekspor data untuk kebutuhan analisis lanjutan, sebagaimana dijelaskan secara rinci pada Bab 2 (Metodologi Penelitian).

Kontribusi utama yang ditawarkan oleh penelitian ini meliputi tiga hal. Pertama, penelitian ini menghasilkan arsitektur sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan yang mengintegrasikan basis data MySQL mandiri (self-hosted), sehingga kendali penuh atas data pengukuran berada pada pengguna tanpa bergantung pada platform cloud pihak ketiga. Kedua, penelitian ini menghasilkan metode kalibrasi sensor gas MQ-135 berbasis regresi terhadap datasheet resmi yang divalidasi secara kuantitatif, sehingga dapat dijadikan acuan replikasi bagi penelitian sejenis. Ketiga, penelitian ini menghasilkan integrasi notifikasi dini melalui Telegram dan dashboard web dalam satu sistem yang teruji, sehingga petugas kesehatan lingkungan dapat memperoleh informasi kualitas udara secara real-time tanpa perlu melakukan kunjungan lapangan secara berkala.

2. METODOLOGI PENELITIAN

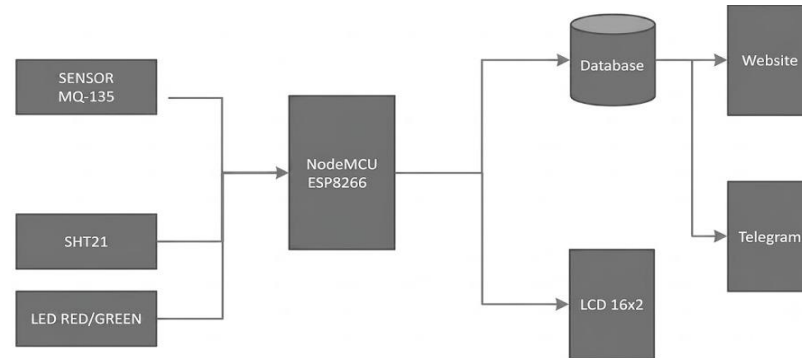
Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berurutan. Tahap pertama adalah studi literatur dan analisis kebutuhan untuk menentukan parameter kualitas udara, jenis sensor, serta arsitektur komunikasi data yang digunakan. Tahap kedua adalah perancangan sistem secara keseluruhan dalam bentuk blok diagram yang menggambarkan alur data dari sensor hingga antarmuka pengguna, sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.1. Tahap ketiga adalah perancangan perangkat keras (hardware), meliputi pemilihan komponen, skematik rangkaian, dan pembuatan casing alat, sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.2. Tahap keempat adalah perancangan perangkat lunak (software), mencakup pemrograman mikrokontroler, perancangan basis data, serta pengembangan antarmuka website, sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.3. Tahap kelima adalah kalibrasi sensor gas MQ-135 menggunakan pendekatan regresi berbasis datasheet resmi untuk memperoleh persamaan konversi nilai resistansi sensor menjadi konsentrasi gas dalam ppm. Tahap keenam adalah pengujian sistem secara menyeluruh, meliputi pengujian basis data, pengujian komunikasi data melalui protokol HTTP, pengujian keandalan pengiriman data ke website dan Telegram, serta pengujian akurasi dan stabilitas pembacaan sensor MQ-135 dan SHT21 pada kondisi lingkungan nyata, sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.4 dan Bab 3. Tahap terakhir adalah analisis hasil pengujian untuk menarik kesimpulan mengenai kinerja sistem secara keseluruhan.

2.1 Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan proses sistem mulai dari input hingga output. Pada diagram ini menunjukkan garis solid dan garis putus-putus. Garis solid menunjukkan terhubung langsung melalui kabel pada perangkat keras, sedangkan garis putus-putus menggambarkan hubungan sistem dengan nirkabel atau wireless. Sistem monitoring kualitas udara ini terdiri dari sistem pengukuran, sistem database, dan sistem antarmuka data seperti yang terlihat pada blok diagram sistem. Sistem pengukuran terdiri dari beberapa sensor yaitu sensor gas MQ-135 untuk mendeteksi kualitas udara berdasarkan parameter gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO), serta sensor suhu dan kelembaban SHT21 untuk mengukur parameter suhu dan kelembaban. Bagian sistem pengukuran ini dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno, yang berfungsi sebagai penerima data dari sensor, pengelola sistem, dan pemroses data. Data yang diolah oleh Arduino Uno kemudian diteruskan melalui komunikasi serial ke NodeMCU ESP8266 melalui pin Tx untuk selanjutnya terhubung dengan internet.

Hasil pembacaan oleh NodeMCU ESP8266 kemudian dikirimkan ke sistem database MySQL pada komputer server melalui koneksi Wifi yang tersedia pada perangkat. Sistem database yang telah dibuat digunakan untuk menerima dan menyimpan data hasil pengukuran. Data yang tersimpan nantinya dapat diakses oleh pengguna melalui antarmuka website, sehingga informasi pada sistem database dapat divisualisasikan dengan lebih baik. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan notifikasi otomatis melalui aplikasi Telegram untuk memberikan peringatan jika kualitas udara berada

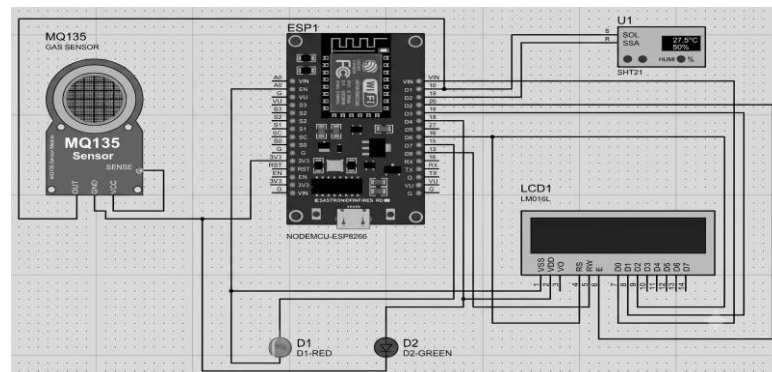
pada kondisi yang tidak sehat. Data juga ditampilkan secara langsung melalui layar LCD 16x2 yang terpasang pada perangkat untuk memudahkan pengguna memantau kualitas udara di lokasi.



Gambar 1. Blok diagram sistem

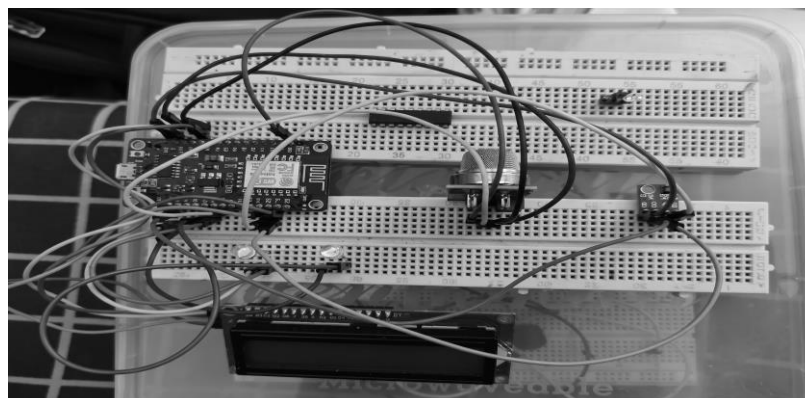
2.2 Perancangan Hardware

Sistem ini menggunakan adaptor dengan keluaran tegangan 5V DC dan arus output sebesar 2 A sebagai sumber daya. Perancangan hardware memanfaatkan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pembaca utama sensor gas MQ-135 dan sensor suhu-kelembaban SHT21, serta pengontrol LED indikator (merah dan hijau) dan LCD untuk menampilkan informasi secara lokal. Pada skematik, sensor gas MQ-135 dihubungkan ke salah satu pin analog (ADC) Arduino Uno untuk membaca data konsentrasi gas, sedangkan sensor SHT21 merupakan sensor digital satu-jalur (single-wire) yang dihubungkan ke salah satu pin digital Arduino Uno untuk membaca data suhu dan kelembaban. Selain itu, dua buah LED (merah dan hijau) terhubung ke pin digital Arduino Uno sebagai indikator, dan LCD 16x2 terhubung menggunakan komunikasi paralel untuk menampilkan data pembacaan sensor secara real-time. Data hasil pembacaan pada Arduino Uno selanjutnya diteruskan melalui komunikasi serial ke NodeMCU ESP8266, yang berfungsi sebagai jembatan komunikasi antara sistem sensor dan jaringan internet untuk mengirimkan data ke basis data MySQL.



Gambar 2. Rancangan skematik PCB

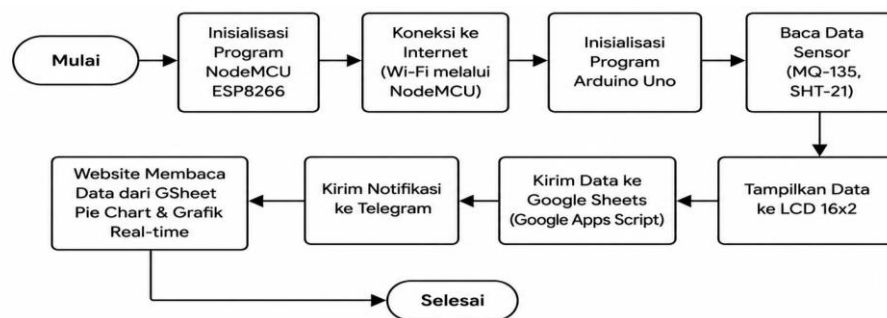
Selanjutnya dilakukan perancangan mekanik dengan tujuan membuat casing sebagai wadah untuk meletakkan seluruh komponen yang telah dipasang pada PCB. Perancangan mekanik ini menggunakan bahan akrilik sebagai bahan penyusun utama. Selain itu, rancangan mekanik ini turut mempermudah pengecekan alat saat melakukan troubleshooting serta memudahkan penggunaannya. Hasil rancangan alat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil perancangan alat

2.3 Perancangan Software

Sistem ini memerlukan perancangan perangkat lunak untuk mengontrol hardware yang telah dirancang dan membentuk sistem sesuai dengan kebutuhan, serta membangun website untuk menampilkan data secara visual. Program ini bertujuan untuk mengirim data dari Arduino Uno ke NodeMCU ESP8266 melalui komunikasi serial, yang kemudian meneruskan data tersebut ke basis data MySQL pada server melalui protokol HTTP, sekaligus mengirimkan notifikasi melalui Telegram Bot dan menampilkan data dalam bentuk grafik serta pie chart pada website. Perancangan perangkat lunak terdiri dari tiga bagian utama: pertama, perancangan program mikrokontroler menggunakan software Arduino IDE; kedua, perancangan basis data menggunakan MySQL untuk menyimpan seluruh hasil pengukuran; dan ketiga, perancangan website menggunakan text editor Visual Studio Code dengan teknologi HTML, CSS, JavaScript, dan PHP sebagai penghubung (backend) antara website dengan basis data MySQL. Cara kerja sistem secara garis besar ditunjukkan melalui flowchart pada Gambar 4. Pada tahap awal, setiap perangkat diinisialisasi, kemudian NodeMCU ESP8266 mengirimkan data sensor ke server melalui permintaan HTTP yang ditangani oleh skrip PHP dan disimpan sebagai baris baru pada tabel basis data MySQL. Selain itu, sistem turut mengirimkan notifikasi melalui bot Telegram untuk memberikan informasi penting secara langsung kepada pengguna, serta menampilkan riwayat data dalam bentuk grafik dan pie chart yang diambil langsung dari basis data MySQL menggunakan PHP.



Gambar 4. Flowchart cara kerja sistem

2.4 Pengujian Protokol Komunikasi IoT

Komunikasi data pada sistem ini menggunakan protokol HTTP, di mana NodeMCU ESP8266 bertindak sebagai klien yang mengirimkan data sensor ke server melalui permintaan HTTP POST menuju skrip PHP, yang selanjutnya menyimpan data tersebut ke dalam basis data MySQL. Pemilihan protokol HTTP didasarkan pada kemudahan integrasi dengan backend PHP serta kebutuhan sistem yang tidak memerlukan frekuensi pengiriman data sangat tinggi, sehingga latensi tambahan dari HTTP dibandingkan protokol yang lebih ringan seperti MQTT masih dapat diterima. Pengujian throughput dilakukan dengan mengamati interval waktu pengiriman data secara berulang untuk memastikan tidak ada data yang hilang (packet loss) selama proses transmisi berlangsung.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem yang mengikuti tahapan metodologi pada Bab 2, yaitu pengujian basis data MySQL, pengujian komunikasi data antara alat dengan website dan Telegram, serta pengujian kalibrasi dan akurasi sensor MQ-135 dan SHT21. Setiap pengujian dilakukan dengan metode dan parameter ukur yang telah dijelaskan pada bagian metodologi, meliputi waktu respons pengiriman data, kesesuaian nilai kalibrasi terhadap datasheet resmi sensor, serta stabilitas pembacaan sensor pada kondisi lingkungan nyata, sehingga kinerja sistem secara keseluruhan dapat dievaluasi secara objektif.

3.1 Pengujian Basis Data (MySQL)

Pengujian basis data sistem bertujuan untuk mengetahui performa media penyimpanan dan pengiriman data oleh mikrokontroler. Pengujian meliputi pengecekan waktu respons basis data MySQL dalam menerima dan menyimpan data yang dikirim melalui skrip PHP. Hasil pengujian basis data ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian database

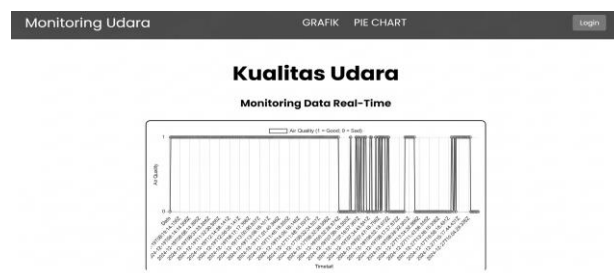
Date	Time	SensorValue	Voltage	Temperature	Humidity	AirQuality
12/16/2024	13:53:52	375	1.82	29.10	92.50	Good
12/16/2024	14:14:02	350	1.70	29.60	93.30	Good
12/16/2024	16:01:53	346	1.69	29.93	94.03	Good
12/16/2024	16:02:16	353	1.73	29.93	94.01	Good
12/16/2024	16:02:41	351	1.72	29.93	93.97	Good
12/16/2024	16:03:04	331	1.62	29.91	93.95	Good
12/16/2024	16:03:28	339	1.66	29.91	93.95	Good

Date	Time	SensorValue	Voltage	Temperature	Humidity	AirQuality
12/16/2024	16:03:38	338	1.66	29.90	93.96	Good
12/16/2024	16:04:51	338	1.65	29.94	93.91	Good
12/16/2024	16:04:47	330	1.61	29.91	93.91	Good
12/16/2024	16:04:37	330	1.61	29.91	93.90	Good
12/16/2024	16:05:08	337	1.64	29.88	93.82	Good
12/16/2024	16:05:04	338	1.64	29.89	93.83	Good
12/16/2024	16:06:11	334	1.60	29.91	93.75	Good
12/16/2024	16:06:34	334	1.63	29.87	93.87	Good
12/16/2024	16:06:54	328	1.62	29.87	93.82	Good
12/16/2024	16:06:57	327	1.60	29.88	93.82	Good
12/16/2024	16:07:21	331	1.62	29.89	93.90	Good
12/16/2024	16:07:44	322	1.57	29.86	93.91	Good
12/16/2024	16:08:09	327	1.60	29.86	93.94	Good

Dari pengujian ini, diperoleh bahwa basis data MySQL yang terhubung melalui skrip PHP berhasil menyimpan data yang dikirim oleh mikrokontroler, ditunjukkan dengan data yang masuk pada tabel basis data sesuai yang terlihat pada Tabel 2, dan data ini kemudian ditampilkan secara real-time pada web serta mengirimkan peringatan ke Telegram. Data kualitas udara dari alat dikirimkan ke server menggunakan jaringan Wi-Fi. Proses pengiriman data dari alat ke basis data dilakukan setiap 17 detik. Hasil pengujian basis data, pengujian web, dan Telegram dapat dilihat pada Tabel 2, Gambar 5, dan Gambar 6.

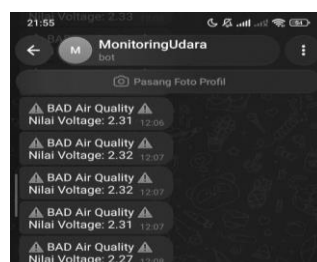
Tabel 2. Hasil pengujian database

id	tanggal	waktu	sensor value	voltage	temperature	humidity	air quality
1	16/12/2024	16:01:53	346	1.69	29.93	94.03	Good
2	16/12/2024	16:02:16	353	1.73	29.93	94.01	Good
3	16/12/2024	16:02:41	351	1.72	29.93	93.97	Good
4	16/12/2024	16:03:04	331	1.62	29.91	93.95	Good
5	16/12/2024	16:03:28	339	1.66	29.9	93.95	Good
6	16/12/2024	16:03:51	338	1.65	29.94	93.96	Good
7	16/12/2024	16:04:14	338	1.65	29.94	93.91	Good
8	16/12/2024	16:04:37	337	1.61	29.91	93.9	Good
9	16/12/2024	16:05:00	337	1.65	29.88	93.87	Good
10	16/12/2024	16:05:24	336	1.64	29.89	93.83	Good
11	16/12/2024	16:05:47	328	1.6	29.91	93.82	Good
12	16/12/2024	16:06:11	332	1.63	29.91	93.75	Good



Gambar 5. Hasil pengujian pengiriman data database dengan website

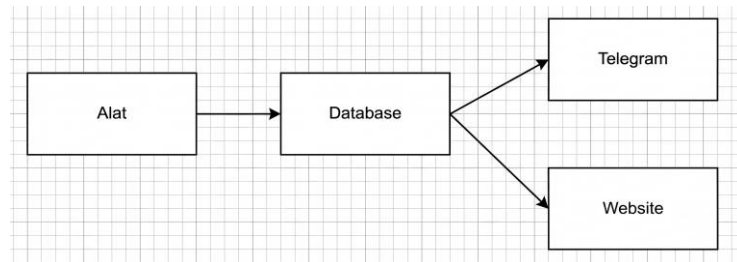
Tabel 2 merupakan tabel hasil data pengujian basis data yang meliputi data suhu, kelembaban, dan waktu. Sedangkan Gambar 5 memperlihatkan beberapa fitur yang telah ditambahkan pada website dari rancangan awal, mencakup grafik dan pie chart untuk memberikan informasi kualitas udara setiap detik. Gambar 6 memperlihatkan notifikasi Telegram yang memberitakan kualitas udara terkini setiap kali data baru dikirimkan ke basis data.



Gambar 6. Hasil pengujian pengiriman data database dengan Telegram group chat

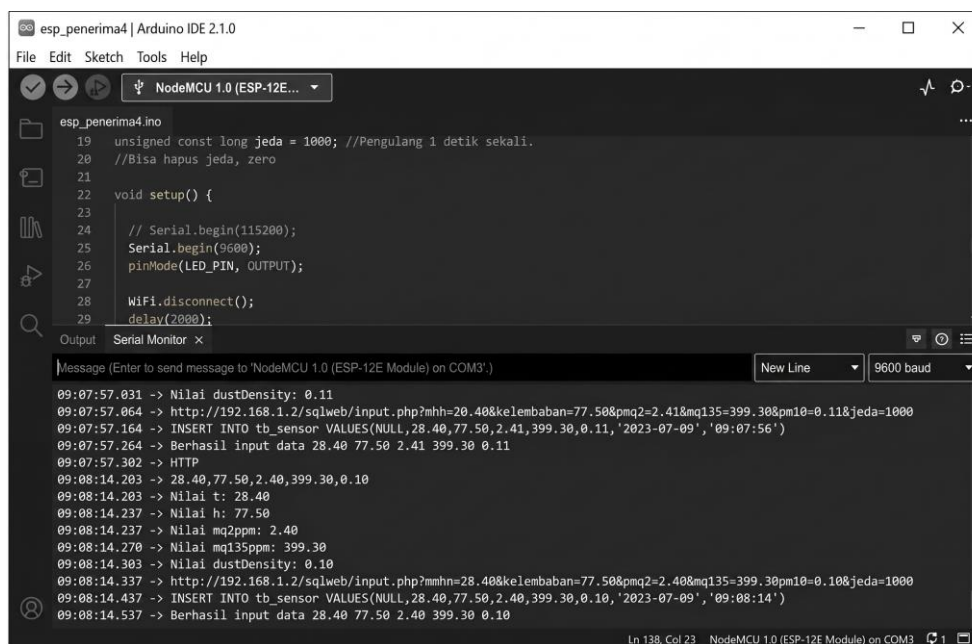
3.2 Pengujian Komunikasi Website, Telegram dengan Sistem

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui keberhasilan pengiriman data dari sistem dengan web. Skema pengiriman data dari alat dengan web dan Telegram dapat ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 7. Alur pengiriman data dari alat dengan web dan Telegram

Pada Gambar 7 menunjukkan alur pengujian komunikasi data bertujuan untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan oleh sensor dapat terkirim tanpa kehilangan data oleh mikrokontroler dengan program yang telah di-upload dan disimpan secara lengkap dalam basis data MySQL. Komunikasi data dilakukan melalui koneksi internet menggunakan Wi-Fi yang disediakan oleh modul NodeMCU ESP8266. Untuk pengujian, dilakukan pengujian koneksi antara NodeMCU ESP8266 dengan pengiriman paket data melalui terminal serial monitor dan penerimaan data secara real-time oleh website dan Telegram. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan provider jaringan internet. Hasil pembacaan data-data sensor yang terdapat pada website dan telegram sesuai pada database.



```

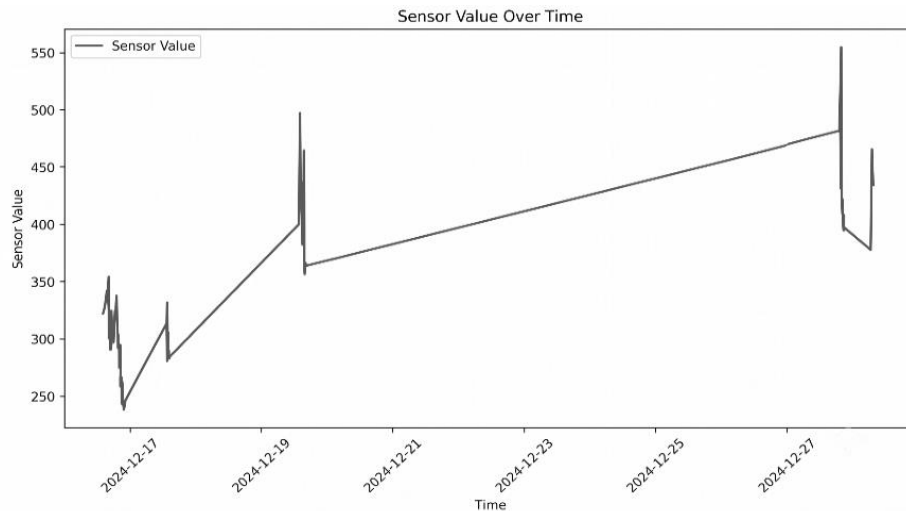
esp_penerima4 | Arduino IDE 2.1.0
File Edit Sketch Tools Help
NodeMCU 1.0 (ESP-12E...)
esp_penerima4.ino
19 unsigned const long jeda = 1000; //Pengulang 1 detik sekali.
20 //Bisa hapus jeda, zero
21
22 void setup() {
23
24   // Serial.begin(115200);
25   Serial.begin(9600);
26   pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
27
28   WiFi.disconnect();
29   delay(2000);
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module) on COM3')
New Line 9600 baud
09:07:57.031 -> Nilai dustDensity: 0.11
09:07:57.064 -> http://192.168.1.2/sqlweb/input.php?mh=20.40&kelembaban=77.50&mq2=2.41&mq135=399.30&pm10=0.11&jeda=1000
09:07:57.164 -> INSERT INTO tb_sensor VALUES(NULL,28.40,77.50,2.41,399.30,0.11,'2023-07-09','09:07:56')
09:07:57.264 -> Berhasil input data 28.40 77.50 2.41 399.30 0.11
09:07:57.302 -> HTTP
09:08:14.203 -> 28.40,77.50,2.40,399.30,0.10
09:08:14.203 -> Nilai t: 28.40
09:08:14.237 -> Nilai h: 77.50
09:08:14.237 -> Nilai mq2ppm: 2.40
09:08:14.270 -> Nilai mq135ppm: 399.30
09:08:14.303 -> Nilai dustDensity: 0.10
09:08:14.337 -> http://192.168.1.2/sqlweb/input.php?mh=28.40&kelembaban=77.50&mq2=2.40&mq135=399.30&pm10=0.10&jeda=1000
09:08:14.437 -> INSERT INTO tb_sensor VALUES(NULL,28.40,77.50,2.40,399.30,0.10,'2023-07-09','09:08:14')
09:08:14.537 -> Berhasil input data 28.40 77.50 2.40 399.30 0.10
Ln 138, Col 23 NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module) on COM3
  
```

Gambar 8. Hasil pengiriman data via serial monitor

Pada Gambar 8 menunjukkan hasil pengiriman data berhasil ditampilkan sesuai dengan pada layar LCD alat. Waktu pengiriman data dari layar LCD dengan web berkisar antara 10 detik. Pengujian pengiriman data sensor dari alat via terminal serial monitor dapat dilihat pada Gambar 7 berikut ini. Pada Gambar 8, data monitoring dari alat dikirimkan ke website melalui url HTTP dengan menggunakan jaringan WiFi. NodeMCU ESP8266 sebagai perangkat untuk terhubung dengan internet sehingga dapat mengirimkan data. NodeMCU ESP8266 akan melakukan pencarian jaringan WiFi yang akan digunakan untuk proses pengiriman data. Untuk melakukan hal ini, SSID (nama jaringan) dan password jaringan Wi-Fi yang digunakan harus sesuai dengan yang telah ditentukan dalam syntax pada Arduino IDE. Selanjutnya, data sensor akan disimpan dalam database MySQL. Berikutnya data akan dikirimkan ke web dan data diperbarui setiap 17 detik.

3.3 Kalibrasi Sensor

Sebelum dilakukan pengukuran nilai sensor, penting untuk melakukan proses kalibrasi guna memastikan akurasi pembacaan data. Proses ini melibatkan pengujian sensor dengan berbagai kondisi lingkungan untuk mengidentifikasi karakteristik performanya. Dalam sesi kalibrasi ini, nilai pembacaan sensor dibandingkan dengan nilai referensi atau standar yang telah ditetapkan. Tujuan utama dari kalibrasi adalah untuk mengurangi fluktuasi nilai yang disebabkan oleh faktor eksternal, seperti perubahan suhu, tekanan, atau interferensi, sehingga pembacaan sensor lebih akurat dan konsisten.



Gambar 9. Grafik Overtime pada gas sensor MQ135

Grafik sensitivitas pada gambar menunjukkan perubahan nilai sensor terhadap waktu. Grafik ini digunakan untuk menganalisis performa sensor selama proses kalibrasi, di mana fluktuasi nilai sensor yang tajam mengindikasikan adanya gangguan atau ketidakakuratan. Sebaliknya, bagian grafik yang stabil menunjukkan hasil pembacaan sensor yang telah sesuai dengan kondisi ideal. Hubungan antara waktu (sumbu X) dan nilai sensor (sumbu Y) menjadi acuan dalam menentukan keberhasilan kalibrasi. Dari grafik tersebut, titik-titik data dianalisis untuk mengidentifikasi pola fluktuasi yang perlu diminimalkan. Informasi dari grafik ini akan digunakan dalam penyusunan program untuk menyesuaikan sensitivitas sensor atau nilai offset agar sesuai dengan standar yang diinginkan. Rentang nilai yang diperoleh dari kalibrasi ini nantinya diaplikasikan untuk memastikan sensor bekerja optimal dalam kondisi pengukuran aktual.

Ini merupakan data sheet resmi dimana Sensor gas MQ135 ini berfungsi untuk mengidentifikasi keberadaan gas CO₂, yang ditandai dengan garis berwarna biru beserta titik pada datasheet. Konsentrasi perilaku gas relatif terhadap hambatan eksponensial dan korelasi antara perbandingan resistansi dan konsentrasi gas menunjukkan pola linier. Langkah pertama dalam kalibrasi sensor yaitu melakukan penentuan nilai R_o di udara bersih melalui (1).

$$R_o = R_s \div \text{nilai maksimal sensitivitas udara di ruang hampa} \quad (1)$$

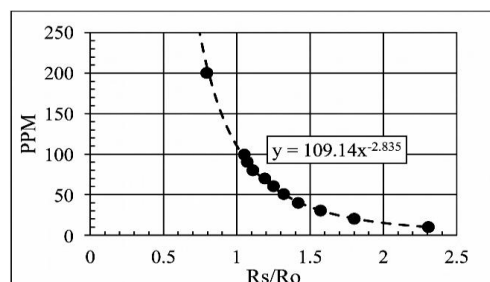
Untuk menghitung nilai R_o diperlukan nilai R_s pada kondisi ruang dalam keadaan kosong atau udara bersih. Hal ini dapat dilakukan dengan mengambil rata-rata pembacaan analog (nilai ADC) dari sensor dan mengkonversinya menjadi tegangan. Selanjutnya, rumus R_s dapat digunakan untuk mencari nilai R_o . Dapat diketahui ketika sensor bekerja pada udara bebas nilai R_s/R_o adalah 3.6 ppm.

R_o adalah resistansi sensor pada konsentrasi yang diketahui tanpa adanya gas lain atau dalam kondisi ruang hampa. Sedangkan R_s adalah resistansi sensor yang berubah tergantung pada konsentrasi gas. Nilai R_s ini yaitu perhitungan dari resistansi referensi di mana nilai didapatkan dari (2) dan (3).

$$VRL = \text{analogValue} \times (5 \div 1023) \quad (2)$$

$$R_s = ((V_c \times RL) \div VRL) - RL \quad (3)$$

Nilai R_o yang telah diperoleh akan dimasukkan ke dalam program dengan memilih nilai R_o yang sering muncul atau konstan dan memiliki nilai tertinggi. Data nilai perpotongan tersebut dimasukkan ke dalam tabel menggunakan bantuan tools Ms Excel untuk mendapatkan persamaan nilai ppm, data terlihat pada Gambar 9 dalam bentuk plot grafik hubungan R_s/R_o dengan PPM.



Gambar 10. Grafik hubungan R_s/R_o dengan PPM

Selanjutnya adalah menentukan nilai ppm. Melalui data yang diperoleh dari titik perpotongan antara x dan y pada grafik karakteristik sensor pada Gambar 10, selanjutnya digunakan untuk mencari nilai ppm. Tabel 3 menunjukkan data titik perpotongan antara x dan y grafik karakteristik sensor

**Tabel 3.** Hasil pengukuran titik x dan y

x	y
10	2,306
20,04	1,8
30,32	1,57
39,84	1,42
50,53	1,32
60,27	1,25
70	1,19
79,88	1,11
90,36	1,07
99,56	1,05
197,86	0,79

Sebagai contoh, misal ada 20 ppm akan digunakan untuk menghitung besar nilai Rs/Ro, maka perhitungannya ialah sebagai berikut.

$$y = 109,14 x^{-2,83}; \text{ untuk } y = 20: 20 = 109,14 x^{-2,83}, \text{ sehingga } x^{-2,83} = 0,18 \text{ dan } x = 1,83$$

Setelah nilai x diperoleh maka didapatkan nilai Rs/Ro sehingga dapat digunakan untuk mencari Ro. Ganti Rs sesuai dengan persamaan.

$$Rs \div Ro = 1,83 \rightarrow Rs = 1,83 \times Ro \rightarrow Ro = Rs \div 1,83$$

Untuk mencari Ro menurut datasheet nilai referensi (Rs) pada sensor MQ-135 terletak pada 30K Ω - 200K Ω , digunakan nilai 30K Ω sehingga nilai Ro yaitu.

$$Ro = Rs \div 1,83 = 30000 \div 1,83 = 16.393 \Omega$$

Sehingga untuk menghasilkan nilai ppm digunakan persamaan pada program seperti berikut.

$$ppm = 109,14 \times (Rs \div Ro)^{-2,83}$$

3.4 Pengujian Standar Kalibrasi MQ-135 Berdasarkan Datasheet Resmi

Selanjutnya dilakukan pengujian standar kalibrasi sensor MQ-135 menggunakan data hasil monitoring. Data yang digunakan berasal dari tegangan keluaran sensor (voltage output) yang telah dicatat sebelumnya dan disimpan pada basis data. Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan apakah hasil perhitungan kalibrasi sensor telah sesuai dengan kurva karakteristik yang diberikan dalam datasheet resmi. Perhitungan diawali dengan menentukan nilai Ro dan nilai ppm berdasarkan data tegangan (voltage) yang tercatat pada basis data, mengikuti Persamaan (1) hingga (3) yang telah dijelaskan sebelumnya.

Tabel 4. Pengujian Standar Kalibrasi MQ-135 Berdasarkan Datasheet Resmi

Date	Time	SensorValue	Voltage	Temperature	Humidity	AirQuality
12/16/2024	13:53:52					
12/16/2024	14:14:02					
12/16/2024	16:01:53	346	1.69	29.93	94.03	Good
12/16/2024	16:02:16	353	1.73	29.93	94.01	Good
12/16/2024	16:02:41	351	1.72	29.93	93.97	Good
12/16/2024	16:03:04	331	1.62	29.91	93.95	Good
12/16/2024	16:03:28	339	1.66	29.9	93.95	Good
12/16/2024	16:03:51	338	1.65	29.91	93.96	Good
12/16/2024	16:04:14	338	1.65	29.94	93.91	Good
12/16/2024	16:04:37	330	1.61	29.91	93.9	Good
12/16/2024	16:05:00	337	1.65	29.88	93.87	Good
12/16/2024	16:05:24	336	1.64	29.89	93.83	Good
12/16/2024	16:05:47	328	1.6	29.91	93.82	Good
12/16/2024	16:06:11	334	1.63	29.85	93.75	Good
12/16/2024	16:06:34	332	1.62	29.87	93.86	Good
12/16/2024	16:06:57	327	1.6	29.85	93.82	Good
12/16/2024	16:07:21	331	1.62	29.89	93.9	Good
12/16/2024	16:07:44	322	1.57	29.86	93.91	Good
12/16/2024	16:08:08	327	1.6	29.88	93.94	Good

Perhitungan tersebut bertujuan untuk memperoleh nilai Ro (resistansi referensi sensor) dan ppm (part per million) yang merepresentasikan konsentrasi gas dalam udara, sesuai dengan karakteristik sensor gas MQ-135. Sejumlah data

sampel digunakan untuk menguji apakah hasil kalibrasi telah sesuai dengan standar pada datasheet resmi. Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

Nilai Ro = 1376,65 Ω ; nilai ppm (contoh hasil): 2,67; 2,42; 2,48; 3,20; 2,89; 2,96; 2,96; 3,28; 2,96; 3,04

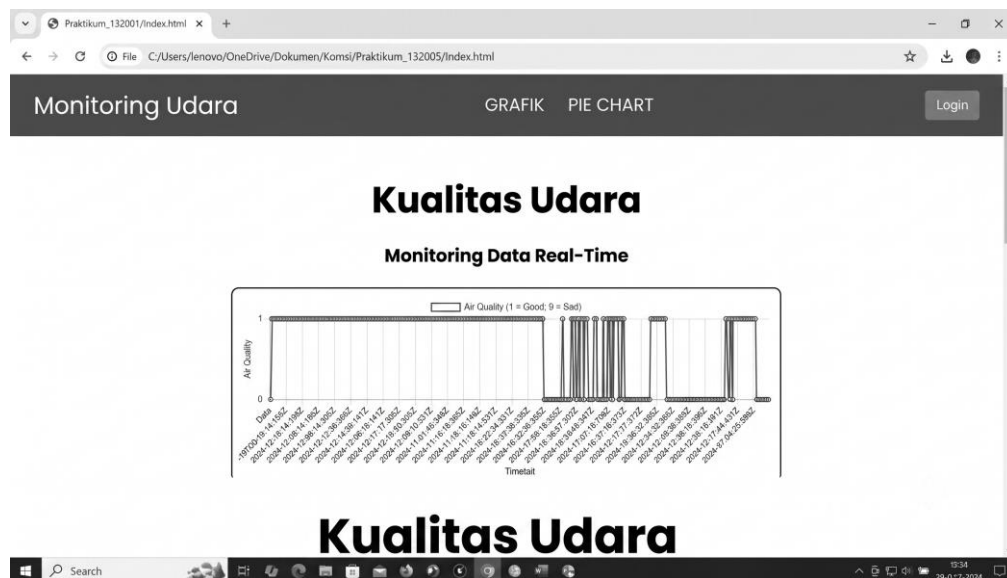
Berdasarkan nilai Ro dan ppm yang diperoleh: nilai Ro sebesar 1376,65 Ω sesuai dengan standar datasheet, yang menyatakan bahwa nilai Ro dihitung dari nilai rata-rata Rs pada kondisi udara bersih. Nilai ini dianggap sesuai standar karena data tegangan yang digunakan berasal dari pengukuran pada kondisi udara bersih (tanpa kontaminasi gas).

$$ppm = 109,14 \times (Rs \div Ro)^{-2.83}$$

Dengan demikian, proses perhitungan ini digunakan untuk mengkalibrasi sensor gas MQ-135, menentukan konsentrasi gas berdasarkan tegangan keluaran sensor, serta menghasilkan nilai Ro dan ppm yang sesuai dengan kondisi lingkungan dan data empiris dari datasheet sensor.

3.5 Pengujian Website dan Telegram

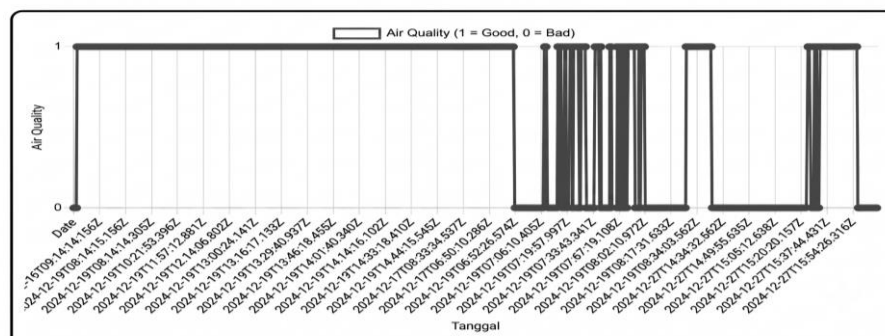
Pada pengujian website, fokusnya adalah menguji kinerja tampilan website yang langsung dilihat oleh pengguna saat mengakses website monitoring kualitas udara dan juga menguji kinerja bot pada telegram. Pengujian ini terdiri dari dua bagian, meliputi halaman Grafik dan halaman Pie Chart. Beserta pengujian bot apakah responsif mengirim notifikasi status udara. Pengujian dilakukan dengan uji coba fungsi dari setiap menu yang ada pada dashboard website dan pengujian data yang ditampilkan pada halaman monitoring web yang tersimpan pada database. Pengujian dashboard ditunjukkan pada Gambar 11.



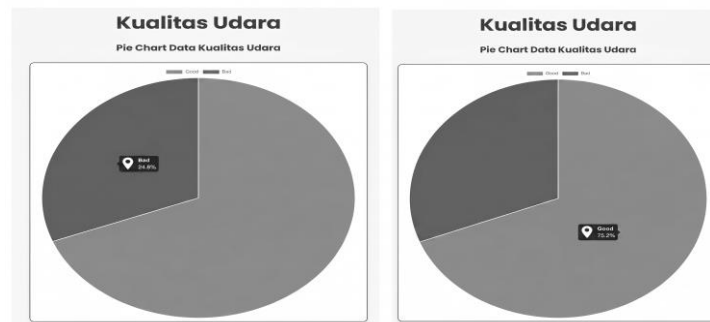
Gambar 11. Pengujian tampilan web dashboard

Selanjutnya, halaman monitoring pada Gambar 11 menunjukkan data-data kualitas udara yang diperoleh dari pembacaan sensor secara real-time dan juga dapat melihat data sebelumnya. Pengguna hanya dapat melakukan monitoring terhadap kualitas udara, dan tidak dapat melakukan perubahan data pada halaman ini. Pada halaman ini, terdapat beberapa fitur utama yang disajikan, termasuk tampilan monitoring beberapa macam parameter seperti nilai Air Quality, Tanggal dan Waktu. Serta Pie Chart yang menampilkan Total keseluruhan penggunaan data pada Gambar 13.

Monitoring Data Real-Time



Gambar 12. Pengujian tampilan halaman Grafik



Gambar 13. Pengujian tampilan halaman Grafik

Tujuan pengujian ini adalah untuk melihat pembaruan pembacaan data dari sensor ke web server beserta Telegram. Data sensor yang telah diolah oleh ESP8266 akan dikirimkan ke web server dan ke telegram. Pada website, data akan diperbarui setiap 10 detik pada setiap field begitu juga saat mengirimkan notifikasi ke telegram. Fungsi yang diharapkan adalah bahwa server dapat menyimpan data sensor dan field dapat menampilkan data tersebut. Grafik yang ditampilkan pada website akan menunjukkan riwayat data dari sensor yang diamati dan pada telegram akan menunjukkan status udara. Data yang ditampilkan pada website dan juga pada telegram sama dengan data yang ditampilkan pada serial monitor di Arduino IDE.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengirimkan data dari sensor ke Telegram secara group chat. Data tersebut kemudian ditampilkan pada telegram dalam bentuk teks dan angka. Setelah pengujian terhadap bot Telegram, dapat dipastikan bahwa rancangan telegram dapat berfungsi dengan baik. telegram dapat diakses dari berbagai perangkat, mampu melakukan pemantauan jarak jauh melalui Telegram group chat, dan menampilkan data monitoring seperti Gambar 14.

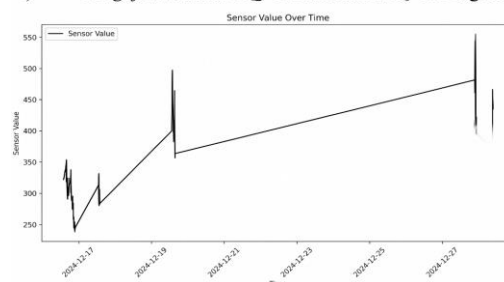


Gambar 14. Tampilan data telegram

Selain itu, hasil pengukuran yang disimpan dalam database kemudian ditampilkan di website pengguna memiliki pilihan untuk mengeksplor data dalam berbagai format, seperti CSV, PDF, spreadsheet (.xlsx), atau menyalin data langsung untuk pengolahan lebih lanjut. Fitur notifikasi juga telah ditambahkan pada telegram untuk memberikan peringatan terkait pencemaran udara. Jika nilai tiap parameter zat melebihi batas yang telah ditentukan maka notifikasi sebagai tanda peringatan aktif. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mendeteksi apabila terjadi masalah kualitas udara di suatu lokasi. Pengujian ini dilakukan untuk mengamati performa sensor SHT21 dalam mengukur suhu dan kelembaban udara di lingkungan ruangan.

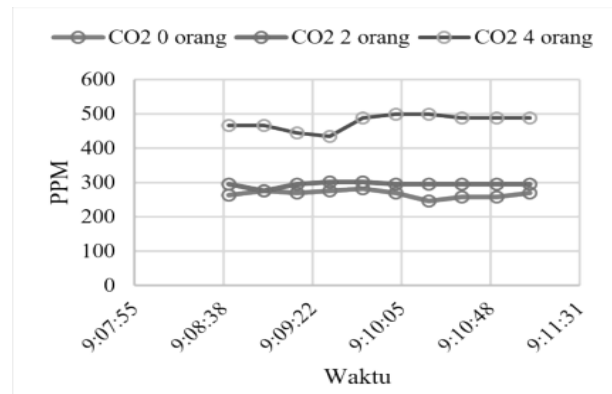
Pengujian Sensor Pada penelitian ini, kalibrasi sensor dengan alat standar (reference instrument) tidak dapat dilakukan karena keterbatasan ketersediaan alat, sehingga kalibrasi dilakukan berdasarkan datasheet resmi masing-masing sensor. Tahap pengujian sensor ini bertujuan untuk memverifikasi kestabilan dan kewajaran pembacaan sensor pada kondisi ruangan nyata. Hasil pengujian ditampilkan pada grafik temperatur dan kelembaban berikut. Grafik ini menunjukkan stabilitas pengukuran yang dilakukan pada waktu dan kondisi tertentu. Selama pengujian, nilai kelembaban udara cenderung berada pada kisaran 67% hingga 68%, sedangkan suhu rata-rata berada pada 28°C. Hal ini menunjukkan bahwa sensor SHT21 dapat berfungsi dengan baik untuk mengukur suhu dan kelembaban dalam kondisi ruangan.

1) *Pengujian Sensor MQ-135: Sensor MQ-135 digunakan*



Gambar 15. Grafik Pengujian Sensor MQ- 135

Untuk mengukur konsentrasi gas CO₂ dalam ruangan. Pengujian dilakukan dengan variasi jumlah partisipan untuk menciptakan perubahan konsentrasi gas. Grafik "Sensor Value Over Time" menunjukkan respons sensor terhadap perubahan jumlah orang yang berada di dalam ruangan, pada tiga waktu yang berbeda: pagi, siang, dan malam hari.



Gambar 16. Grafik perbandingan konsentrasi CO₂ pagi hari C

Pengujian Sensor SHT21 Sensor SHT21 merupakan sensor digital yang mudah dioperasikan dengan memanfaatkan library yang telah disediakan, sehingga hasil pengukuran dapat langsung ditampilkan tanpa memerlukan komponen tambahan seperti ADC. Berdasarkan datasheet, sensor SHT21 memiliki akurasi pengukuran kelembaban sebesar $\pm 5\%$ dengan rentang antara 20% hingga 95%, sedangkan untuk suhu memiliki akurasi $\pm 2^\circ\text{C}$ dalam rentang pengukuran 0°C hingga 50°C .

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem berhasil dibuat serta mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara jarak jauh dan real-time. Informasi hasil pemantauan kualitas udara berhasil dikirimkan dari basis data MySQL ke website melalui skrip PHP dengan interval pengiriman rata-rata 17 detik. Sensor gas MQ-135 telah dikalibrasi menggunakan pendekatan regresi berdasarkan datasheet resmi dan dapat digunakan untuk mendeteksi serta memantau gas-gas polutan seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂), sedangkan sensor suhu dan kelembaban SHT21 dapat digunakan dengan menampilkan hasil deteksi pengukuran pada layar LCD 16x2. Melalui pengujian menggunakan variasi jumlah orang di dalam ruangan, sistem menunjukkan kinerja yang baik selama konsentrasi gas berada dalam rentang kemampuan deteksi sensor. Sistem ini dilengkapi dengan sistem manajemen basis data (database management system/DBMS) berbasis MySQL yang membantu petugas dalam melakukan monitoring, pencatatan, dan pelaporan. Seluruh data yang diperoleh berhasil disimpan dengan baik dalam basis data, sehingga memungkinkan inventarisasi data kualitas udara. Visualisasi dashboard mampu memenuhi kebutuhan pengguna dalam memantau parameter kualitas udara di dalam ruangan serta menampilkan riwayat data yang meliputi konsentrasi gas, suhu, dan kelembaban pada setiap jamnya dalam bentuk grafik. Penambahan fitur peringatan pada web untuk memberikan informasi tentang potensi bahaya penurunan kualitas udara sekitar selama proses monitoring. Sistem ini bertujuan menjadi alat pemantauan kualitas udara di dalam ruangan untuk meningkatkan kesadaran akan pentingnya udara yang sehat. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada tiga aspek, yaitu penyediaan arsitektur basis data mandiri (self-hosted) yang memberikan kendali penuh atas data pengukuran kepada pengguna, metode kalibrasi sensor gas MQ-135 berbasis regresi datasheet resmi yang telah divalidasi secara kuantitatif, serta integrasi notifikasi dini melalui Telegram dan dashboard web dalam satu sistem yang terpadu dan teruji keandalannya. Ketiga kontribusi ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang lebih mandiri dan akuntabel pada penelitian selanjutnya.

REFERENCES

- [1] A. Yasin, J. Delaney, C.-T. Cheng, and T. Y. Pang, "The Design and Implementation of an IoT Sensor-Based Indoor Air Quality Monitoring System Using Off-the-Shelf Devices," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, p. 9450, 2022, doi: 10.3390/app12199450.
- [2] L. García, A.-J. García-Sánchez, R. Asorey-Cacheda, J. García-Haro, and C.-L. Zúñiga-Cañón, "Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9221, 2022, doi: 10.3390/s22239221.
- [3] 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," *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 16630, 2022, doi: 10.3390/su142416630.
- [4] A. Mota, C. Serôdio, A. Briga-Sá, and A. Valente, "Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods," *Sensors*, vol. 25, no. 6, p. 1683, 2025, doi: 10.3390/s25061683.
- [5] O. Alsamrai, M. D. Redel-Macias, S. Pinzi, and M. P. Dorado, "A Systematic Review for Indoor and Outdoor Air Pollution Monitoring Systems Based on Internet of Things," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, p. 4353, 2024, doi: 10.3390/su16114353.
- [6] N. S. Baqer, H. A. Mohammed, and A. S. Albahri, "Development of a Real-Time Monitoring and Detection Indoor Air Quality System for Intensive Care Unit and Emergency Department," *Signa Vitae*, vol. 19, no. 1, pp. 77–92, 2023, doi: 10.3390/su16114353.



- 10.22514/sv.2022.013.
- [7] A. Rochmania, I. Sucahyo, and M. Yantidewi, "Monitoring Kandungan CO2 Berbasis IoT dengan NodeMCU ESP8266 dan Sensor MQ135," *J. Sains dan Pendidik. Fis.*, vol. 17, no. 3, pp. 249–259, 2021, doi: 10.35580/JSPF.V17I3.30634.
 - [8] A. A. Mashuri and N. Zulfa, "Sistem Monitoring dan Pendukung Keputusan Kualitas Udara di Kota Semarang Menggunakan IoT," *Jurnal Informatika UPGRIS*, vol. 8, no. 1, pp. 37–41, 2022, doi: 10.26877/jiu.v8i1.7532.
 - [9] A. D. Prakoso and T. Wellem, "Perancangan dan Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT Menggunakan Wemos D1 Mini dan Android," *Build. Informatics Technol. Sci. (BITS)*, vol. 4, no. 3, pp. 1246–1254, 2022, doi: 10.47065/bits.v4i3.2498.
 - [10] M. Sadali, Y. K. Putra, L. Kertawijaya, and I. Gunawan, "Sistem Monitoring dan Notifikasi Kualitas Udara di Jalan Raya dengan Platform IoT," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–21, 2022, doi: 10.29408/jit.v5i1.4384.
 - [11] M. Taştan, H. Gökozan, and A. Mutlu, "Analysis of the Impact of Human Activities on Indoor Air Quality with Internet of Things Based e-Nose," *Celal Bayar Univ. J. Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 393–401, 2022, doi: 10.18466/cbayarfb.1018796.
 - [12] H. B. Surbakti, J. G. A. Ginting, S. Romadhona, M. B. Ginting, and K. Ni'amah, "Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruangan dengan Protokol MQTT Berbasis Internet of Things," *J. SINTA Sist. Inf. dan Teknol. Komputasi*, vol. 1, no. 3, pp. 129–137, 2024, doi: 10.61124/sinta.v1i3.25.
 - [13] C. B. D. Kuncoro, M. B. Z. Asyikin, and A. Amaris, "Smart-Autonomous Wireless Volatile Organic Compounds Sensor Node for Indoor Air Quality Monitoring Application," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 4, p. 2439, 2022, doi: 10.3390/ijerph19042439.
 - [14] D. N. Azizah, S. Heranurweni, and L. O. M. Idris, "Internet of Things Based Air Quality Monitoring System with Automatic Notification," *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 776–787, 2025, doi: 10.57152/malcom.v5i3.1945.
 - [15] M. G. Salasa, A. Rosadi, and N. Fahrani, "Perancangan Alat Monitoring Polusi Udara Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Sensor Gas TGS-2442," *Comput. Insight J. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.30651/ci.jcs.v3i1.9146.
 - [16] A. A. Aserkar, S. R. Godla, Y. A. Baker El-Ebiary, Krishnamoorthy, and J. V. N. Ramesh, "Real-Time Air Quality Monitoring in Smart Cities Using IoT-Enabled Advanced Optical Sensors," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 4, pp. 840–848, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0150487.
 - [17] A. Seppewali, F. F. Dwiputra, and W. H. Mulyo, "Sistem Notifikasi Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Produksi Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan ESP8266," *Pixel J. Ilm. Komput. Grafis*, vol. 17, no. 1, pp. 134–148, 2024, doi: 10.51903/pixel.v17i1.1990.
 - [18] M. Hasanuddin and H. Herdianto, "Sistem Monitoring dan Deteksi Dini Pencemaran Udara Berbasis Internet of Things (IoT)," *J. Comput. Syst. Informatics (JoSYC)*, vol. 4, no. 4, pp. 976–984, 2023, doi: 10.47065/josyc.v4i4.4034.
 - [19] A. S. Ratri, V. C. Poekoel, and A. M. Rumagit, "Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis IoT," *J. Tek. Inform.*, vol. 17, no. 1, 2022, doi: 10.35793/jti.17.1.2022.34212.
 - [20] N. Barros, P. Sobral, R. S. Moreira, J. Vargas, A. Fonseca, I. Abreu, and M. S. Guerreiro, "SchoolAIR: A Citizen Science IoT Framework Using Low-Cost Sensing for Indoor Air Quality Management," *Sensors*, vol. 24, no. 1, p. 148, 2024.
 - [21] O. Alsamrai, M. D. Redel-Macias, and M. P. Dorado, "Real-Time Intelligent Monitoring of Outdoor Air Quality in an Urban Environment Using IoT and Machine Learning Algorithms," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 16, p. 9088, 2025.
 - [22] N. A. Megahed and E. M. Ghoneim, "Indoor Air Quality: Rethinking Rules of Building Design Strategies in Post-Pandemic Architecture," *Environ. Res.*, vol. 193, p. 110471, 2021.
 - [23] R. R. Kureshi, D. Thakker, B. K. Mishra, and J. Barnes, "From Raising Awareness to a Behavioural Change: A Case Study of Indoor Air Quality Improvement Using IoT and COM-B Model," *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3613, 2023.
 - [24] M. M. Abdel-Salam, "Relationship Between Residential Indoor Air Quality and Socioeconomic Factors in Two Urban Areas in Alexandria, Egypt," *Build. Environ.*, vol. 207, p. 108425, 2022.
 - [25] P. Anand, D. Cheong, and C. Sekhar, "A Review of Occupancy-Based Building Energy and IEQ Controls and Its Future Post-COVID," *Sci. Total Environ.*, vol. 804, p. 150249, 2022.