

Sistem Pemantauan Suhu, Kelembaban, dan Gas Dalam Ruangan Berbasis Iot Menggunakan Nodemcu Esp8266

Haidar Bagas Syarifudin^{1*}, Agusma Wajiansyah², dan Didi Susilo Budi Utomo³

Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Samarinda
Jl. DR. Ciptomangunkusumo, Kampus Gunung Lipan, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia 75131
email : bhaidar593@gmail.com¹, agusma.wajiansyah@gmail.com², dsbudiutomo10@gmail.com³

*Penulis Korespondensi: Haidar Bagas Syarifudin

Abstract: Indoor activities have the potential to cause a decrease in air quality due to suboptimal ventilation, excessive humidity, and gas accumulation in closed spaces. These conditions can impact the health and comfort of occupants, especially in rooms with poor air circulation. This problem is becoming increasingly important because most households do not have an environmental monitoring system that is capable of working in real-time and can be accessed remotely. This research aims to design and build an Internet of Things (IoT)-based indoor air quality monitoring system using the NodeMCU ESP8266 integrated with the MQ-135 sensor and the DHT11 sensor. The developed system is used to monitor gas concentration, temperature, and humidity as simple indicators of indoor air quality. Data from sensor readings are processed by the NodeMCU ESP8266, displayed locally via an OLED display, and sent via a WiFi network to the ThingSpeak cloud platform for real-time online monitoring. The test results showed that the MQ-135 sensor experienced increased stability after a 48-hour calibration process with a reading range of 52.4–94.6 ppm on the first day to 96.8–108.3 ppm on the second day. The system also successfully displayed real-time temperature, humidity, and gas concentration data on an OLED display and transmitted data to the ThingSpeak platform for remote monitoring without experiencing communication failures during the test. Thus, the developed system can be used as a simple, real-time, and easily accessible indoor environmental monitoring solution.

Keywords: Internet of Things (IoT); indoor air monitoring; MQ-135; DHT11; NodeMCU ESP8266; real-time monitoring

Abstrak: Aktivitas di dalam ruangan berpotensi menyebabkan penurunan kualitas udara akibat ventilasi yang kurang optimal, kelembapan berlebih, serta akumulasi gas di dalam ruangan tertutup. Kondisi tersebut dapat berdampak terhadap kesehatan dan kenyamanan penghuni, terutama pada ruangan dengan sirkulasi udara yang kurang baik. Permasalahan ini menjadi semakin penting karena sebagian besar rumah tangga belum memiliki sistem monitoring lingkungan yang mampu bekerja secara real-time dan dapat diakses secara jarak jauh. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan NodeMCU ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor MQ-135 serta sensor DHT11. Sistem yang dikembangkan digunakan untuk memantau konsentrasi gas, suhu, dan kelembapan sebagai indikator sederhana kualitas udara dalam ruangan. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh NodeMCU ESP8266, ditampilkan secara lokal melalui OLED Display, serta dikirimkan melalui jaringan WiFi ke platform cloud ThingSpeak untuk monitoring online secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor MQ-135 mengalami peningkatan kestabilan setelah proses kalibrasi selama 48 jam dengan rentang pembacaan dari 52,4–94,6 ppm pada hari pertama menjadi 96,8–108,3 ppm pada hari kedua. Sistem juga berhasil menampilkan data suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas secara real-time pada OLED Display serta mengirimkan data ke platform ThingSpeak untuk monitoring jarak jauh tanpa mengalami kegagalan komunikasi selama pengujian. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat digunakan sebagai solusi monitoring lingkungan dalam ruangan yang sederhana, real-time, dan mudah diakses.

Kata kunci: Internet of Things (IoT); monitoring kualitas udara dalam ruangan; MQ-135; DHT11; NodeMCU ESP8266; monitoring real-time

Diterima: 7 Mei 2026
Direvisi: 20 Mei 2026
Diterima: 22 Mei 2026
Diterbitkan: 31 Mei 2026
Versi sekarang: Mei 2026



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Kualitas udara dalam ruangan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuni. Pencemaran udara dalam ruang dapat berasal dari berbagai aktivitas rumah tangga, seperti penggunaan bahan pembersih, asap rokok, pembakaran bahan bakar, penggunaan obat nyamuk, serta ventilasi ruangan yang kurang baik. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah, kualitas udara dalam ruangan dipengaruhi oleh parameter fisik, kimia, dan biologi yang dapat berdampak terhadap kesehatan penghuni rumah. Parameter fisik meliputi suhu, kelembapan, pencahayaan, dan partikulat, sedangkan parameter kimia meliputi karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), dan senyawa kimia lainnya. Kualitas udara yang buruk dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, sakit kepala, asma, infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), hingga gangguan paru-paru dalam jangka panjang [1].

Seiring dengan perkembangan teknologi, berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memanfaatkan sensor dan jaringan internet untuk memperoleh data lingkungan secara *real-time*. Konsep IoT memungkinkan integrasi antara sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, serta platform *cloud* sehingga data dapat dipantau dari jarak jauh secara lebih mudah dan efisien. Pada penelitian ini digunakan NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler utama yang terintegrasi dengan sensor MQ-135 dan DHT11. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi gas di udara sebagai indikator kondisi kualitas udara dalam ruangan, sedangkan sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Berdasarkan standar pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011, suhu ideal dalam ruangan berada pada rentang 18°C–30°C dan kelembapan udara ideal berada pada rentang 40%–60%. Data hasil pembacaan sensor kemudian ditampilkan melalui OLED dan dikirimkan ke platform ThingSpeak menggunakan koneksi WiFi sehingga dapat dimonitor secara *online* dan *real-time*.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu memberikan informasi kondisi lingkungan secara cepat dan berkelanjutan, namun masih memiliki keterbatasan seperti kurangnya tampilan lokal, keterbatasan akses monitoring jarak jauh, serta akurasi sensor yang belum optimal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* menggunakan NodeMCU ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor MQ-135 dan DHT11, serta dilengkapi dengan OLED dan platform ThingSpeak sebagai media monitoring. Penelitian ini difokuskan pada monitoring parameter suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas sebagai indikator sederhana kondisi kualitas udara dalam ruangan. Sistem yang dirancang diharapkan mampu membantu pengguna dalam memantau kondisi lingkungan secara *real-time*, baik melalui tampilan lokal maupun monitoring berbasis *cloud*, sehingga pengguna dapat mengetahui perubahan kualitas udara dalam ruangan dengan lebih mudah dan informatif [2][3][6][7].

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Novelty Penelitian

Peneliti	Sensor	Monitoring Cloud	Tampilan Lokal	Parameter yang Dipantau
Khan et al. (2024)	DHT22, MQ Series	Ya	Tidak	Suhu, kelembapan, kualitas udara
Narayana et al. (2024)	DHT11, MQ-135	Ya	Tidak	Suhu, kelembapan, gas
Wirawan et al. (2023)	DHT11	Tidak	Ya (LCD)	Suhu dan kelembapan
Salvi et al. (2025)	MQ-135, DHT11	Ya	Tidak	Kualitas udara dan lingkungan
Penelitian ini	MQ-135, DHT11	Ya (ThingSpeak)	Ya (OLED)	Suhu, kelembapan,

dan konsentrasi
gas

Berdasarkan penelitian terdahulu pada Tabel 1, sebagian besar sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* telah mampu melakukan pengiriman data secara real-time ke platform *cloud* untuk mendukung monitoring jarak jauh. Namun, beberapa penelitian masih berfokus pada monitoring berbasis cloud tanpa menyediakan tampilan lokal pada perangkat, sehingga pengguna harus selalu mengakses platform web untuk mengetahui kondisi lingkungan. Di sisi lain, terdapat penelitian yang hanya menyediakan tampilan lokal menggunakan LCD atau OLED tetapi belum mendukung penyimpanan dan visualisasi data secara daring. Selain itu, beberapa penelitian hanya memantau satu atau dua parameter lingkungan sehingga informasi yang diperoleh masih terbatas. Oleh karena itu, novelty penelitian ini terletak pada integrasi sensor MQ-135 dan DHT11 dengan NodeMCU ESP8266 yang mampu melakukan monitoring suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas secara bersamaan, serta menampilkan data secara lokal melalui OLED Display dan secara daring melalui platform ThingSpeak. Integrasi dua metode monitoring tersebut diharapkan dapat meningkatkan kemudahan akses informasi dan efektivitas monitoring kualitas udara dalam ruangan secara *real-time*.

2. Tinjauan Literatur

Kualitas udara dalam ruangan dapat dikategorikan berdasarkan beberapa parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂). Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011, suhu udara dalam ruangan yang memenuhi standar kesehatan berada pada rentang 18°C–30°C dengan kelembapan udara ideal sebesar 40%–60%, sedangkan kadar maksimum karbon dioksida (CO₂) yang diperbolehkan dalam ruangan adalah 1000 ppm. Kualitas udara yang berada dalam rentang standar tersebut dapat dikategorikan sebagai kondisi baik, sedangkan peningkatan suhu, kelembapan, maupun konsentrasi gas di atas ambang batas dapat menyebabkan penurunan kenyamanan dan berdampak terhadap kesehatan penghuni seperti sakit kepala, sesak napas, serta gangguan sistem pernapasan. Selain itu, kualitas udara dalam ruangan juga dipengaruhi oleh ventilasi, aktivitas penghuni, dan sirkulasi udara di dalam bangunan [13].

2.1. *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet untuk saling bertukar data secara otomatis. Teknologi ini memungkinkan sistem monitoring dilakukan secara *real-time* dan dapat diakses dari jarak jauh [2]. Dalam konteks monitoring lingkungan, IoT banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, serta platform *cloud* untuk pengolahan dan visualisasi data [9]. Penerapan IoT dalam sistem monitoring kualitas udara terbukti mampu meningkatkan efisiensi dalam pengambilan data serta memberikan informasi yang lebih cepat dan akurat [7]. Pada sistem monitoring berbasis IoT, sensor berfungsi sebagai perangkat input yang bertugas membaca kondisi lingkungan secara langsung. Data yang diperoleh dari sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirimkan melalui jaringan internet menuju server atau platform *cloud*. Proses komunikasi data ini umumnya memanfaatkan jaringan WiFi karena memiliki kecepatan transmisi yang baik serta mudah diterapkan pada lingkungan rumah maupun penelitian skala kecil. Dengan adanya komunikasi data berbasis internet, pengguna dapat memantau kondisi lingkungan tanpa harus berada di lokasi perangkat, sehingga proses monitoring menjadi lebih fleksibel dan efisien.

Selain mendukung monitoring secara *real-time*, teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses akuisisi, penyimpanan, dan analisis data lingkungan secara berkelanjutan melalui platform *cloud*. Integrasi sensor dengan mikrokontroler dan layanan *cloud* memungkinkan data hasil pengukuran dikirim, disimpan, serta divisualisasikan dalam bentuk grafik historis sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan dan analisis kondisi lingkungan dari waktu ke waktu. Menurut penelitian Narayana dan rekannya, pemanfaatan sensor, jaringan *Wi-Fi*, dan platform berbasis web pada sistem IoT mampu menyediakan monitoring lingkungan secara *real-time* yang dapat diakses dari lokasi mana pun

melalui internet. Pada penelitian ini, konsep IoT diimplementasikan menggunakan NodeMCU ESP8266 yang terhubung dengan sensor MQ-135 dan DHT11 untuk mengukur kualitas udara, suhu, dan kelembapan. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan ke platform ThingSpeak untuk disimpan dan divisualisasikan dalam bentuk grafik monitoring berbasis web sehingga pengguna dapat mengakses informasi kondisi lingkungan secara daring dan *real-time* [14].

2.2 Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 merupakan salah satu sensor gas yang banyak digunakan dalam sistem monitoring kualitas udara karena kemampuannya dalam mendeteksi berbagai jenis gas seperti karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), serta senyawa organik volatil (VOC). Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi material semikonduktor berupa timah dioksida (SnO_2) ketika terpapar gas tertentu. Pada kualitas udara bersih, resistansi sensor berada pada nilai tertentu, namun ketika terdapat gas target, resistansi akan berubah secara signifikan sesuai dengan konsentrasi gas yang terdeteksi (Gupta et al., 2021). Perubahan resistansi tersebut kemudian dikonversi menjadi tegangan analog melalui rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*), yang selanjutnya dibaca oleh pin ADC pada mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Nilai tegangan analog ini menjadi parameter awal dalam proses pengukuran, yang kemudian diolah menjadi nilai konsentrasi gas dalam satuan *parts per million* (PPM) menggunakan perbandingan antara resistansi sensor saat ini (R_s) terhadap resistansi referensi pada kualitas udara bersih (R_0). Proses konversi ini umumnya mengacu pada kurva karakteristik sensitivitas sensor yang bersifat non-linear [3]. Penggunaan sensor MQ-135 dalam sistem berbasis IoT telah banyak diterapkan karena harganya yang relatif murah dan kemudahan integrasinya dengan mikrokontroler. Namun demikian, sensor ini memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan sensitivitas terhadap beberapa jenis gas sekaligus, sehingga diperlukan proses kalibrasi untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih valid dan stabil [8]. Keterbatasan pada penggunaan sensor MQ-135 yang memiliki sensitivitas terhadap berbagai jenis gas sehingga tidak dapat mengidentifikasi jenis gas secara spesifik. Nilai ppm yang dihasilkan merupakan indikator umum kualitas udara dan dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan.



Gambar 1. MQ-135

Sensor MQ-135 merupakan sensor gas berbasis metal oxide semiconductor (MOS) yang banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara karena mampu mendeteksi berbagai gas seperti karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), alkohol, dan senyawa organik volatil (VOC). Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi lapisan timah dioksida (SnO_2) ketika berinteraksi dengan gas di lingkungan sekitar. Perubahan resistansi tersebut menghasilkan perubahan tegangan analog yang kemudian dibaca oleh mikrokontroler dan dikonversi menjadi nilai konsentrasi gas dalam satuan *parts per million* (ppm). Meskipun memiliki sensitivitas yang cukup baik dan biaya implementasi yang rendah, MQ-135 tidak mampu membedakan jenis gas secara spesifik karena respons sensor dipengaruhi oleh berbagai jenis gas secara bersamaan. Oleh karena itu, hasil pembacaan sensor umumnya digunakan sebagai indikator umum kualitas udara dan perubahan kondisi lingkungan pada sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) [15].

Table 1. Kategori Kondisi Kualitas Udara Dalam Ruangan

Parameter	Baik	Peringatan	Buruk
Suhu	18–30°C	31–35°C	>35°C
Kelembapan	40–60%	61–70%	>70%
Konsentrasi Gas (MQ-135)	<400 ppm	400–1000 ppm	>1000 ppm

Tabel 1 menunjukkan kategori kondisi kualitas udara dalam ruangan berdasarkan parameter suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor MQ-135. Kategori suhu dan kelembapan mengacu pada standar kualitas udara dalam ruang rumah berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011, sedangkan kategori konsentrasi gas digunakan sebagai indikator sederhana kualitas udara dalam ruangan. Menurut Wahyudi dan rekannya, parameter suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas merupakan indikator utama yang digunakan dalam sistem monitoring lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) karena secara langsung memengaruhi tingkat kenyamanan dan kesehatan penghuni ruangan [16]. Selain itu, Lopes dan rekannya menjelaskan bahwa peningkatan suhu dan kelembapan yang melebihi batas rekomendasi dapat mempercepat pertumbuhan mikroorganisme serta menurunkan kualitas udara dalam ruangan, sedangkan peningkatan konsentrasi gas tertentu dapat menjadi indikasi buruknya sirkulasi udara [17]. Kondisi “Baik” menunjukkan lingkungan masih berada pada rentang aman dan nyaman bagi penghuni, sedangkan kategori “Peringatan” menunjukkan adanya peningkatan parameter yang perlu diperhatikan. Adapun kategori “Buruk” menunjukkan kondisi lingkungan yang berpotensi menurunkan kenyamanan dan kesehatan penghuni sehingga diperlukan upaya perbaikan sirkulasi udara atau ventilasi ruangan untuk menjaga kualitas lingkungan tetap berada pada kondisi yang aman dan sehat.

2.3 Sensor DHT11

Sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara digital. Sensor ini memiliki keunggulan dalam kemudahan penggunaan serta konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk sistem monitoring berbasis IoT [6]. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah dibandingkan sensor sejenis lainnya, DHT11 tetap banyak digunakan dalam penelitian karena biaya yang ekonomis dan cukup memadai untuk aplikasi skala kecil hingga menengah. Data suhu dan kelembapan yang dihasilkan sangat penting dalam analisis kondisi lingkungan karena kedua parameter tersebut saling berkaitan dan memengaruhi kualitas udara.



Gambar 2. DHT11

2.4 ESP8266 dan Baseboard NodeMCU V3

ESP8266 merupakan mikrokontroler berbasis Wi-Fi yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT) karena kemampuannya dalam mengolah data serta mengirimkan informasi secara langsung melalui jaringan internet (Patel et al., 2022). Perangkat ini telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi terintegrasi sehingga memungkinkan komunikasi data secara *real-time* tanpa memerlukan perangkat tambahan. Selain itu, ESP8266 memiliki ukuran yang relatif kecil, konsumsi daya rendah, serta mendukung pemrograman menggunakan Arduino IDE, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi monitoring

lingkungan [10]. Dalam implementasinya, ESP8266 umumnya digunakan dalam bentuk modul pengembangan NodeMCU V3 yang telah dilengkapi dengan antarmuka USB, regulator tegangan, serta pin input/output yang lebih lengkap. NodeMCU V3 memudahkan proses pemrograman dan integrasi dengan berbagai sensor karena menyediakan akses langsung ke pin digital maupun analog. Untuk mendukung perakitan sistem yang lebih stabil, digunakan base board NodeMCU V3 yang berfungsi sebagai papan distribusi koneksi dan tegangan. Baseboard ini mempermudah pemasangan komponen seperti sensor MQ-135 dan DHT11 dengan menyediakan jalur koneksi yang lebih rapi dan terstruktur. Selain itu, penggunaan base board juga dapat mengurangi kesalahan wiring serta meningkatkan keandalan sistem dalam proses pengujian dan implementasi.



Gambar 3. ESP8266 dan Baseboard NodeMCU V3

NodeMCU ESP8266 pada penelitian ini berfungsi sebagai pusat pengendali sistem yang bertugas membaca data dari sensor MQ-135 dan DHT11, mengolah data hasil pembacaan sensor, serta mengirimkan data ke platform ThingSpeak melalui koneksi Wi-Fi. Data analog dari sensor MQ-135 dibaca melalui pin ADC NodeMCU, sedangkan data digital dari sensor DHT11 dibaca melalui pin GPIO menggunakan komunikasi single wire. Setelah data diperoleh, NodeMCU melakukan proses pengolahan dan klasifikasi kualitas udara sebelum menampilkan hasil pengukuran pada OLED Display dan mengirimkannya ke server cloud secara real-time. Penggunaan NodeMCU ESP8266 pada sistem ini memberikan kemudahan dalam integrasi perangkat keras dan perangkat lunak karena telah mendukung fitur konektivitas internet, pemrograman berbasis Arduino IDE, serta komunikasi dengan berbagai sensor dan modul output dalam satu perangkat yang ringkas dan efisien.

2.5 ThingSpeak

ThingSpeak merupakan platform berbasis *cloud* yang banyak digunakan dalam sistem *Internet of Things* (IoT) untuk mengumpulkan, menyimpan, dan memvisualisasikan data secara *real-time*. Platform ini memungkinkan perangkat seperti NodeMCU ESP8266 untuk mengirimkan data sensor melalui jaringan internet dan menampilkannya dalam bentuk grafik yang mudah dipahami. Penggunaan ThingSpeak dalam sistem monitoring kualitas udara telah banyak diterapkan karena kemudahannya dalam integrasi serta kemampuannya dalam menyediakan visualisasi data secara langsung [2]. Selain itu, ThingSpeak juga mendukung analisis data sederhana yang dapat membantu pengguna dalam memahami pola perubahan kondisi lingkungan [1].

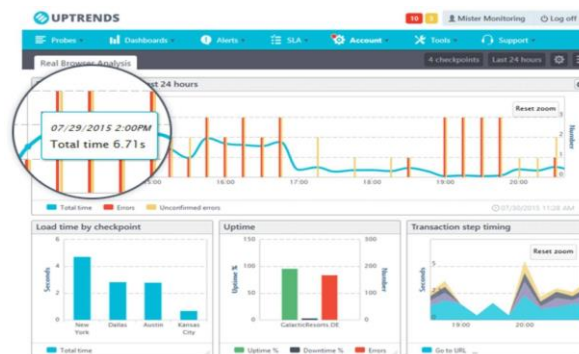


Gambar 4. ThingSpeak

Pada penelitian ini, ThingSpeak digunakan sebagai media monitoring berbasis cloud untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor secara online dan real-time. Platform ThingSpeak menyediakan layanan penyimpanan data, visualisasi grafik, serta *Application Programming Interface* (API) yang memungkinkan perangkat *Internet of Things* (IoT) berkomunikasi dengan server melalui jaringan internet. NodeMCU ESP8266 mengirimkan data suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas ke server ThingSpeak melalui koneksi Wi-Fi menggunakan protokol HTTP. Pemanfaatan jaringan *Wi-Fi* pada ESP8266 memungkinkan proses transmisi data berlangsung secara nirkabel dengan konsumsi daya yang relatif rendah serta mendukung monitoring jarak jauh secara berkelanjutan [18]. Data yang berhasil dikirim kemudian disimpan dan divisualisasikan dalam bentuk grafik sehingga memudahkan pengguna dalam memantau perubahan kondisi lingkungan berdasarkan waktu pengamatan. Selain menampilkan data terbaru, ThingSpeak juga memungkinkan penyimpanan data historis yang dapat digunakan untuk proses analisis dan evaluasi performa sistem monitoring. Menurut Sholid dan Firmansyah [19], integrasi *cloud computing* dengan sistem monitoring berbasis sensor mampu meningkatkan ketersediaan data, kemudahan akses informasi, serta efisiensi pengelolaan data hasil pengukuran secara real-time. Selain itu, penggunaan platform ThingSpeak memungkinkan proses pengiriman, penyimpanan, dan pengambilan data sensor dilakukan secara otomatis melalui jaringan internet sehingga sistem dapat beroperasi secara lebih fleksibel dan terintegrasi [20]. Dengan adanya integrasi antara NodeMCU ESP8266 dan ThingSpeak, sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring kualitas udara dalam ruangan secara jarak jauh melalui *dashboard* berbasis web yang dapat diakses kapan saja melalui internet.

2.6 Web Monitoring

Web monitoring merupakan salah satu pendekatan dalam sistem IoT yang digunakan untuk menampilkan data hasil pengukuran sensor secara *real-time* melalui antarmuka berbasis web. Dengan adanya web monitoring, pengguna dapat mengakses informasi kondisi lingkungan kapan saja dan di mana saja selama terhubung dengan jaringan internet. Implementasi web monitoring dalam sistem kualitas udara memungkinkan penyajian data yang lebih interaktif dan informatif, seperti dalam bentuk grafik maupun indikator status lingkungan. Selain itu, penggunaan web sebagai media monitoring juga meningkatkan fleksibilitas sistem serta memudahkan dalam pengembangan fitur lanjutan seperti notifikasi dan analisis historis data (Hassan et al., 2021).



Gambar 5. Contoh Web Monitoring

2.7 OLED Display 128×64

OLED Display berukuran 0.96 inci dengan resolusi 128×64 piksel digunakan sebagai media output untuk menampilkan data sensor secara langsung pada perangkat. OLED memiliki keunggulan dalam konsumsi daya yang rendah serta mampu menampilkan informasi dengan kontras tinggi. Hal ini menjadikan OLED cocok digunakan dalam sistem monitoring berbasis IoT yang membutuhkan tampilan data secara *real-time* [7].



Gambar 6. Oled Display

OLED Display pada penelitian ini dihubungkan dengan NodeMCU ESP8266 menggunakan komunikasi I2C melalui pin SDA dan SCL sehingga proses pertukaran data dapat dilakukan dengan lebih sederhana dan efisien. Tampilan OLED digunakan untuk menampilkan informasi hasil pembacaan sensor secara langsung, meliputi nilai konsentrasi gas dari sensor MQ-135, suhu, kelembapan udara, serta kategori kualitas udara dalam ruangan. Dengan adanya tampilan lokal ini, pengguna dapat mengetahui kondisi lingkungan secara cepat tanpa harus membuka platform monitoring berbasis web. Selain itu, penggunaan OLED juga membantu proses pengujian dan monitoring sistem karena data sensor dapat diamati secara real-time langsung dari perangkat yang dirancang.

2.8 Resistor

Resistor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi menghambat arus listrik dan membagi tegangan dalam rangkaian elektronik. Pada penelitian ini resistor digunakan sebagai bagian dari rangkaian pembagi tegangan pada sensor MQ-135 agar tegangan output dapat dibaca dengan aman oleh ADC NodeMCU ESP8266. Dalam sistem elektronika, resistor sering digunakan sebagai bagian dari rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) untuk menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan perangkat lain (Gupta et al., 2021). Pada penelitian ini, resistor digunakan dalam rangkaian pembagi tegangan pada sensor MQ-135 untuk mengonversi perubahan resistansi sensor menjadi tegangan analog yang dapat dibaca oleh pin ADC pada NodeMCU ESP8266. Kombinasi resistor dengan nilai 47 k Ω dan 56 k Ω digunakan untuk menghasilkan rasio tegangan yang sesuai sehingga output sensor berada dalam batas aman pembacaan mikrokontroler. Penggunaan konfigurasi ini juga membantu meningkatkan kestabilan sinyal serta akurasi dalam proses pengukuran data kualitas udara.



Gambar 7. Resistor

Pada rangkaian sistem yang dirancang, resistor juga digunakan untuk menjaga kestabilan arus dan tegangan pada proses komunikasi antara sensor dan mikrokontroler. Penggunaan resistor dengan nilai tertentu membantu mengurangi risiko pembacaan data yang tidak stabil akibat fluktuasi tegangan dari sensor MQ-135. Selain itu, konfigurasi resistor pada rangkaian pembagi tegangan memungkinkan NodeMCU ESP8266 menerima sinyal analog dalam rentang yang sesuai dengan spesifikasi ADC yang bekerja pada tegangan 3,3V. Dengan demikian, penggunaan resistor tidak hanya berfungsi sebagai pembatas arus, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan keamanan, kestabilan, dan keakuratan proses pembacaan data pada sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things*.

3. Metode

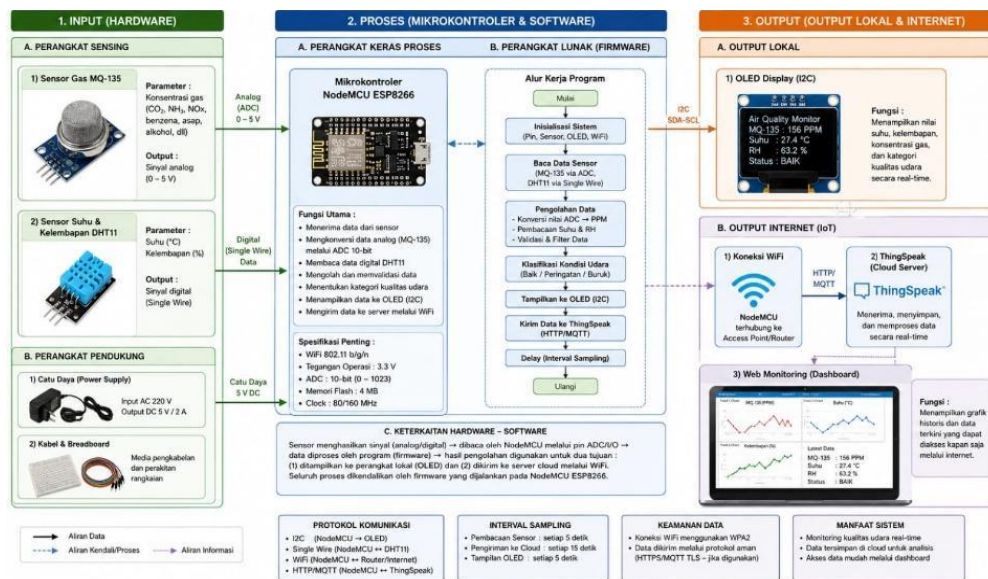
Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis eksperimen terapan. Penelitian dilakukan untuk menguji kinerja sensor DHT11 dan MQ-135 dalam sistem monitoring kualitas udara dan suhu berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk digunakan pada lingkungan rumah.

3.1. Rancangan Sistem

Algoritma sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C yang telah disesuaikan dengan arsitektur NodeMCU ESP8266. Struktur program dirancang secara modular dalam beberapa tahapan utama, yaitu proses inisialisasi perangkat, pembacaan data sensor, pengolahan data, penentuan status, serta pengiriman dan penampilan keluaran (output). Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan sistem dapat bekerja secara sistematis, efisien, dan mudah dikembangkan pada tahap selanjutnya (Patel et al., 2022). Pada tahap inisialisasi, sistem mengaktifkan seluruh komponen yang digunakan, meliputi koneksi Wi-Fi, sensor DHT11, sensor MQ-135, serta modul OLED Display berbasis komunikasi I2C. Setelah koneksi jaringan berhasil, sistem akan melakukan sinkronisasi dengan platform *cloud* untuk memastikan proses pengiriman data dapat berjalan dengan baik. Tahap ini sangat penting karena kestabilan koneksi jaringan akan mempengaruhi performa sistem dalam melakukan monitoring secara *real-time* [2]. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data sensor secara berkala berdasarkan interval waktu yang telah ditentukan. Data analog dari sensor MQ-135 dibaca melalui pin ADC pada NodeMCU, kemudian dikonversi menjadi nilai digital untuk diproses lebih lanjut. Sementara itu, data suhu dan kelembapan dari sensor DHT11 diperoleh dalam bentuk sinyal digital yang telah terkalibrasi secara internal [6] (Gupta et al., 2021; Wirawan et al., 2023). Proses pembacaan data ini dilakukan secara kontinu untuk mendapatkan representasi kondisi lingkungan secara *real-time*.

Data yang diperoleh kemudian diproses menggunakan struktur logika kondisional (if-else) untuk menentukan status kualitas udara berdasarkan ambang batas tertentu. Kategori yang digunakan dalam penelitian ini adalah “Baik” dan “Buruk”, yang ditentukan berdasarkan nilai konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor MQ-135. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk memberikan interpretasi sederhana namun informatif terhadap kondisi lingkungan [8].

Hasil pengolahan data selanjutnya ditampilkan secara langsung pada OLED Display sebagai indikator lokal sehingga pengguna dapat memantau kondisi lingkungan tanpa harus mengakses perangkat tambahan. Selain itu, data juga dikirimkan ke platform *cloud* ThingSpeak melalui jaringan Wi-Fi untuk keperluan monitoring jarak jauh. Platform ini memungkinkan visualisasi data dalam bentuk grafik sehingga memudahkan pengguna dalam menganalisis perubahan kondisi lingkungan dari waktu ke waktu [1][9]. Sistem menggunakan koneksi WiFi IEEE 802.11 b/g/n yang terintegrasi pada NodeMCU ESP8266. Data sensor dibaca setiap 10 detik dan dikirim ke platform ThingSpeak setiap 15 detik menggunakan protokol HTTP melalui REST API.

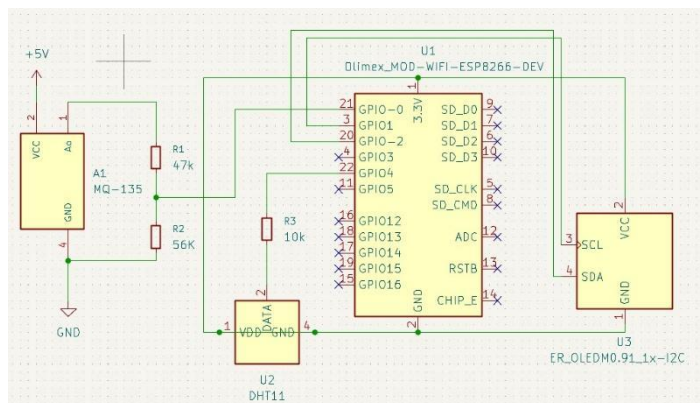


Gambar 8. Blok Diagram Sistem Monitoring Kualitas Udara

Gambar 8 menunjukkan arsitektur sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input (*hardware*), proses (mikrokontroler dan *software*), serta output (lokal dan internet). Pada bagian input, sistem menggunakan sensor MQ-135 sebagai pendeteksi konsentrasi gas di udara dan sensor DHT11 sebagai pembaca suhu serta kelembapan udara. Sensor MQ-135 menghasilkan sinyal analog dengan rentang tegangan 0–5 V yang dibaca melalui pin ADC pada NodeMCU ESP8266, sedangkan sensor DHT11 mengirimkan data digital menggunakan komunikasi single wire. Seluruh data sensor kemudian diproses oleh NodeMCU ESP8266 yang berfungsi sebagai pusat pengendali sistem. Pada bagian *software* atau firmware, NodeMCU menjalankan program yang terdiri dari proses inisialisasi perangkat, pembacaan data sensor, konversi data analog menjadi nilai ppm, validasi data, klasifikasi kualitas udara, hingga proses pengiriman data ke server cloud menggunakan koneksi WiFi melalui protokol HTTP/MQTT. Hasil pengolahan data ditampilkan secara lokal menggunakan OLED Display berbasis komunikasi I2C yang menampilkan nilai suhu, kelembapan, konsentrasi gas, dan kategori kualitas udara secara real-time. Selain itu, data juga dikirimkan ke platform ThingSpeak untuk disimpan dan divisualisasikan dalam bentuk grafik monitoring berbasis web sehingga pengguna dapat memantau kondisi lingkungan secara daring. Diagram ini juga memperlihatkan keterkaitan antara *hardware* dan *software* melalui aliran data sensor menuju mikrokontroler, proses pengolahan firmware, hingga penyajian informasi pada media output lokal maupun cloud secara terintegrasi.

3.2 Schematic Diagram

Berikut adalah schematic diagram alat pendeteksi udara NodeMCU ESP8266



Gambar 9. Schematic Diagram

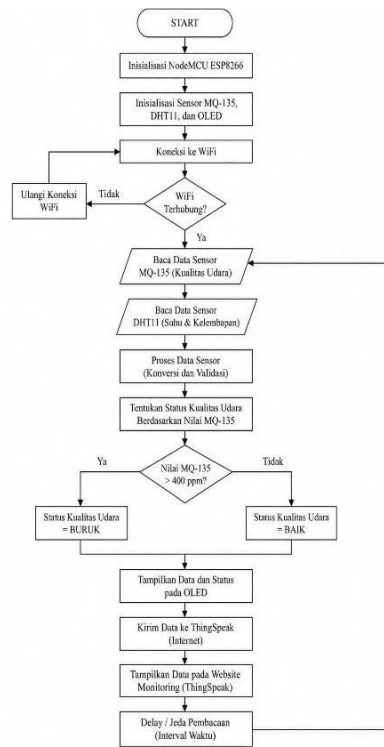
Gambar 9 menunjukkan rancangan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler utama, sensor MQ-135 sebagai pendeteksi kualitas udara, sensor DHT11 sebagai pembaca suhu dan kelembapan, serta OLED Display berbasis komunikasi I2C sebagai media tampilan lokal. NodeMCU ESP8266 berfungsi sebagai pusat pengendali yang mengatur proses pembacaan data sensor, pengolahan data, hingga pengiriman informasi melalui jaringan WiFi ke platform monitoring. Pada rangkaian tersebut, NodeMCU memperoleh data analog dari sensor MQ-135 dan data digital dari sensor DHT11 untuk kemudian diproses menjadi parameter kualitas udara, suhu, dan kelembapan ruangan secara *real-time*.

Sensor MQ-135 pada rangkaian dihubungkan dengan sumber tegangan +5V dan ground, sedangkan pin output analog sensor terhubung ke jalur pembagi tegangan yang terdiri dari resistor R1 sebesar 47 k Ω dan resistor R2 sebesar 56 k Ω . Konfigurasi resistor ini digunakan untuk menyesuaikan tegangan output sensor agar berada dalam batas aman pembacaan ADC NodeMCU ESP8266 yang bekerja pada tegangan 3,3V. Perubahan konsentrasi gas di udara akan memengaruhi resistansi internal sensor MQ-135 sehingga menghasilkan perubahan tegangan analog pada output sensor. Tegangan tersebut kemudian dibaca oleh pin ADC NodeMCU untuk dikonversi menjadi nilai digital yang merepresentasikan kualitas udara dalam bentuk parameter ppm. Sensor DHT11 dihubungkan ke salah satu pin GPIO NodeMCU sebagai jalur komunikasi data digital, sedangkan resistor pull-up 10 k Ω digunakan untuk menjaga kestabilan sinyal data agar komunikasi antara sensor dan mikrokontroler dapat berjalan dengan baik.

Selain proses pembacaan sensor, rangkaian ini juga dilengkapi dengan OLED Display yang terhubung melalui jalur komunikasi I2C menggunakan pin SDA dan SCL pada NodeMCU ESP8266. OLED berfungsi untuk menampilkan informasi hasil pengukuran secara langsung pada perangkat, seperti nilai kualitas udara, suhu, kelembapan, serta status kualitas udara di dalam ruangan. Setelah seluruh data berhasil diproses, NodeMCU akan mengirimkan data tersebut melalui koneksi WiFi menuju platform ThingSpeak untuk divisualisasikan dalam bentuk grafik monitoring berbasis *cloud*. Dengan konfigurasi rangkaian ini, sistem mampu melakukan proses monitoring kualitas udara secara *real-time*, baik melalui tampilan lokal menggunakan OLED maupun melalui monitoring jarak jauh berbasis internet.

3.3 Flowchart Sistem

Berikut merupakan diagram alur (*flowchart*) yang menggambarkan proses kerja dari sebuah sistem berbasis mikrokontroler NodeMCU ESP8266.



Gambar 10. Flowchart Sistem Monitoring kualitas Udara

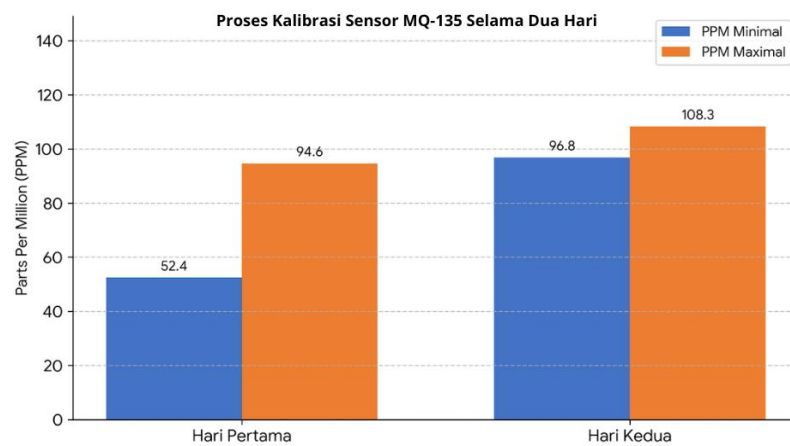
Sistem monitoring kualitas udara ini diawali dengan proses inialisasi, di mana NodeMCU ESP8266 melakukan booting dan mengaktifkan seluruh komponen yang digunakan, termasuk sensor MQ-135 dan sensor DHT11, serta melakukan koneksi ke jaringan Wi-Fi. Setelah koneksi berhasil, sistem akan terhubung dengan server *cloud* ThingSpeak untuk mempersiapkan proses pengiriman data [6]. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data, di mana sensor MQ-135 membaca konsentrasi gas dalam bentuk nilai analog (ADC), sedangkan sensor DHT11 membaca suhu dan kelembapan lingkungan. Data dari kedua sensor tersebut kemudian dikirim ke mikrokontroler untuk diproses lebih lanjut. Pada tahap pengolahan data, nilai gas yang diperoleh dibandingkan dengan ambang batas (threshold) yang telah ditentukan dalam program, serta disertai dengan data suhu dan kelembapan sebagai parameter pendukung dalam analisis kualitas udara. Berdasarkan hasil tersebut, sistem melakukan penentuan status menggunakan logika kondisional (if-else), yaitu jika nilai MQ-135 kurang dari 400 maka kualitas udara dikategorikan sebagai “Baik”, sedangkan jika nilai lebih dari 400 maka dikategorikan sebagai “Buruk”.

Hasil akhir dari proses ini ditampilkan sebagai output, di mana sistem menampilkan nilai gas, suhu, kelembapan, serta status kualitas udara melalui OLED sebagai media monitoring lokal. Selain itu, data juga dikirimkan secara berkala ke platform ThingSpeak untuk divisualisasikan dalam bentuk grafik monitoring berbasis *cloud*, sehingga memungkinkan pengguna untuk melakukan monitoring kondisi lingkungan secara *real-time* dan jarak jauh.

3.4 Kalibrasi Sensor

Pengujian sistem dilakukan melalui beberapa tahapan untuk memvalidasi hipotesis penelitian. Tahap pertama adalah kalibrasi sensor yang bertujuan untuk memastikan bahwa nilai pembacaan mendekati kondisi lingkungan sebenarnya. Kalibrasi pada sensor MQ-135 dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu zero-point calibration dan relative calibration [11]. Selanjutnya, *relative calibration* dilakukan dengan membandingkan perubahan nilai pembacaan sensor terhadap kondisi lingkungan sekitar, sehingga sistem dapat mendeteksi peningkatan atau penurunan kualitas udara berdasarkan selisih nilai yang terukur. Sementara itu, sensor DHT11 tidak memerlukan proses kalibrasi tambahan karena telah dikalibrasi secara pabrik. Pengujian sistem dilakukan melalui beberapa tahapan untuk memvalidasi hipotesis penelitian. Tahap pertama adalah kalibrasi sensor, yang bertujuan untuk memastikan bahwa nilai yang terbaca mendekati kondisi lingkungan sebenarnya. Kalibrasi pada sensor MQ-135

dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu zero-point calibration dan relative calibration. Zero-point calibration dilakukan dengan menempatkan sensor pada kualitas udara bersih selama 24–48 jam untuk memperoleh nilai dasar (baseline) sebagai titik acuan pembacaan sensor. Sensor diletakkan di luar ruangan dengan sirkulasi udara yang baik agar diperoleh kondisi referensi yang representatif. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa proses kalibrasi sangat berpengaruh dan memiliki koefisien kalibrasi yang tersimpan pada memori internalnya. Tahap kedua adalah pengujian pembacaan sensor yang dilakukan dengan menjalankan sistem pada kondisi di dalam ruangan. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi perubahan kualitas udara, sedangkan sensor DHT11 membaca parameter suhu dan kelembapan. Data hasil pembacaan kemudian ditampilkan pada serial monitor serta dikirimkan ke platform ThingSpeak untuk memastikan bahwa sistem mampu membaca dan mengirimkan data secara *real-time*. Pendekatan ini umum digunakan dalam sistem monitoring berbasis IoT dengan sensor biaya rendah [4]. Tahap ketiga adalah pengujian pengiriman data ke platform IoT, yang bertujuan untuk memastikan bahwa NodeMCU ESP8266 dapat mengirimkan data sensor ke server ThingSpeak melalui jaringan internet secara stabil dan berkelanjutan. Tahap keempat adalah pengujian respon sistem, yang dilakukan dengan memberikan variasi kualitas udara di sekitar sensor MQ-135, kemudian mengamati perubahan nilai yang ditampilkan. Pengujian ini penting untuk mengevaluasi performa sistem sebagaimana dilakukan pada penelitian monitoring lingkungan berbasis IoT lainnya [5].



Gambar 11. Fase Kalibrasi Sensor MQ-135

Berdasarkan pada hasil pengujian dari tabel di atas, terlihat adanya transisi nilai yang signifikan selama proses kalibrasi 48 jam yang dilakukan. Pada hari pertama, sensor mencatat rentang nilai yang cukup rendah dengan titik minimal di 52,4 PPM dan maksimal di 94,6 PPM. Namun, memasuki hari kedua, terjadi peningkatan ambang batas pembacaan di mana nilai minimal naik secara stabil ke angka 96,8 PPM dan nilai maksimal mencapai 108,3 PPM. Peningkatan nilai dasar (*baseline*) ini mengindikasikan bahwa *internal heater* pada sensor telah mencapai suhu operasional yang stabil, sehingga reaksi kimia pada lapisan sensitif sensor menjadi lebih konsisten. Dengan demikian, data pada hari kedua menunjukkan tingkat reliabilitas yang lebih tinggi dibandingkan hari pertama.

Data yang diperoleh dari seluruh tahapan pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam membaca, mengolah, dan mengirimkan data secara *real-time*. Keberhasilan sistem ditunjukkan oleh kemampuan NodeMCU ESP8266 dalam menampilkan data sensor secara stabil pada OLED serta mengirimkannya ke platform ThingSpeak dalam bentuk grafik monitoring yang dapat diakses secara daring. Selain itu, analisis juga dilakukan terhadap konsistensi pembacaan sensor serta respon sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan. Sebelum proses analisis dilakukan, tahap kalibrasi sensor menjadi langkah penting untuk memastikan akurasi hasil pengukuran. Sensor MQ-135 memerlukan proses pemanasan (*burn-in period*) untuk menstabilkan kinerjanya, khususnya pada penggunaan awal. Setelah sensor berada pada kondisi stabil, dilakukan perhitungan nilai hambatan sensor ($R_{\{s\}}$) menggunakan persamaan dasar sebagai berikut:

$$R_s = \frac{V_c - V_{rl}}{V_{rl}} \times R_l$$

Di mana V_c merupakan tegangan input (5V), V_{rl} adalah tegangan output yang dibaca pada pin analog, dan R_l adalah resistor beban. Pada penelitian ini, digunakan resistor 47 k Ω dan 56 k Ω (toleransi 1%) sebagai bagian dari rangkaian pembagi tegangan untuk menyesuaikan pembacaan dengan karakteristik ADC pada NodeMCU ESP8266. Setelah nilai $R_{\{s\}}$ diperoleh, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai R_0 , yaitu hambatan sensor pada kualitas udara bersih dengan konsentrasi gas normal (sekitar 400 ppm CO₂). Nilai R_0 dihitung berdasarkan rasio karakteristik sensor MQ-135 pada udara bersih, di mana nilai perbandingan R_s/R_0 secara umum adalah sekitar 3,6. Dengan demikian, nilai R_0 dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$R_0 = \frac{R_s}{3.6}$$

Nilai R_0 ini kemudian digunakan sebagai acuan dalam menentukan konsentrasi gas berdasarkan perbandingan nilai R_s terhadap R_0 . Perhitungan konsentrasi gas dilakukan menggunakan pendekatan kurva sensitivitas sensor dalam bentuk persamaan logaritmik sebagai berikut:

$$PPM = \alpha \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^b$$

Di mana α dan b merupakan konstanta yang diperoleh dari kurva karakteristik sensor MQ-135 untuk jenis gas tertentu.

Melalui pendekatan ini, sistem mampu mengonversi nilai analog dari sensor menjadi estimasi konsentrasi gas dalam satuan ppm. Hasil perhitungan tersebut kemudian dianalisis untuk melihat pola perubahan kualitas udara berdasarkan waktu serta kondisi lingkungan. Visualisasi data dalam bentuk grafik pada platform ThingSpeak juga digunakan untuk mempermudah interpretasi data dan mengidentifikasi tren perubahan kualitas udara secara *real-time*. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mampu memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat, stabil, dan representatif terhadap kondisi lingkungan dalam ruangan.

3.5 Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setelah seluruh komponen sistem berhasil dirakit dan terhubung dengan baik, meliputi NodeMCU ESP8266, sensor MQ-135, sensor DHT11, OLED Display, serta platform ThingSpeak. Pengujian dilaksanakan di ruang keluarga rumah penulis yang memiliki aktivitas harian cukup tinggi sehingga dapat merepresentasikan kondisi lingkungan dalam ruangan yang sebenarnya. Sebelum proses pengambilan data dilakukan, sensor MQ-135 terlebih dahulu melalui proses kalibrasi dan pemanasan (*burn-in*) selama 48 jam untuk memperoleh kestabilan pembacaan sensor. Pengambilan data dilakukan selama satu hari, yaitu mulai pukul 08.00 hingga 23.00 WITA dengan interval pembacaan sensor setiap 30 detik. Pada setiap interval pengukuran, NodeMCU ESP8266 membaca data suhu dan kelembapan dari sensor DHT11 serta nilai konsentrasi gas dari sensor MQ-135. Data hasil pembacaan kemudian ditampilkan secara langsung pada OLED Display dan dikirimkan secara otomatis ke platform ThingSpeak melalui jaringan *WiFi* untuk keperluan monitoring dan penyimpanan data secara *real-time*. Dengan interval pembacaan 1 detik selama 15 jam pengujian, diperoleh sebanyak 54.000 sampel data pengukuran.

Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring yang dikembangkan. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi kestabilan pembacaan sensor, keberhasilan pengiriman data ke platform ThingSpeak, kemampuan sistem menampilkan data secara *real-time* pada OLED Display, serta respons sensor terhadap perubahan kondisi lingkungan selama periode pengujian. Selain itu, dilakukan analisis terhadap pola perubahan suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas yang terekam selama pengujian untuk mengetahui kemampuan sistem dalam memantau kondisi udara dalam ruangan secara berkelanjutan. Sistem dinyatakan bekerja dengan baik apabila

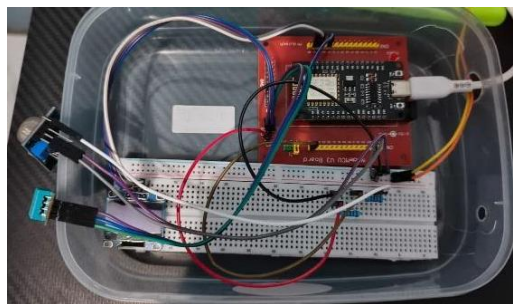
seluruh parameter dapat terbaca secara konsisten, ditampilkan pada OLED Display tanpa gangguan, serta berhasil dikirim dan tersimpan pada platform ThingSpeak sesuai waktu pengukuran. Hasil evaluasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menilai kinerja sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* yang dikembangkan pada penelitian ini.

4. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menjelaskan tentang hasil akhir dari perakitan perangkat keras (*hardware*) dan pembuatan antar muka perangkat lunak (*software*) sebelum melakukan pengujian lebih lanjut.

4.1 Realisasi Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat utama pada penelitian ini terdiri dari NodeMCU ESP8266 sebagai unit pengendali, sensor DHT11 sebagai pengukur suhu dan kelembapan, serta sensor MQ-135 sebagai pendeteksi konsentrasi gas di dalam ruangan. Seluruh komponen tersebut dirakit menjadi sebuah purwarupa (*prototype*) sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT). Proses perakitan dilakukan menggunakan kabel jumper dan breadboard untuk memudahkan konfigurasi rangkaian serta pengujian tanpa penyolderan permanen, sehingga apabila terjadi kesalahan koneksi atau diperlukan modifikasi, penyesuaian dapat dilakukan dengan cepat dan efisien. Perangkat ditempatkan di dalam rumah penulis, tepatnya pada ruangan keluarga yang memiliki tingkat aktivitas cukup tinggi dibandingkan ruangan lain. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk memperoleh variasi data yang lebih terhadap kondisi nyata, mengingat aktivitas manusia, sirkulasi udara, serta penggunaan peralatan rumah tangga dapat memengaruhi perubahan suhu, kelembapan, dan kualitas udara.



Gambar 13. Wujud Fisik Prototipe Pendeteksi Kualitas Udara Berbasis NodeMCU

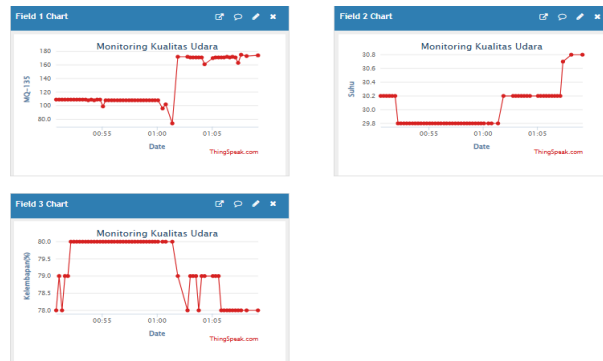
Piranti ini juga dilengkapi dengan OLED yang akan menjadi indikator pada piranti nantinya, dengan menghubungkan prototipe dengan kabel USB data selanjutnya akan dilanjutkan dengan percobaan koneksi dan antarmuka dari sensor.

4.2 Realisasi Pengguna (*user interface*) ThingSpeak

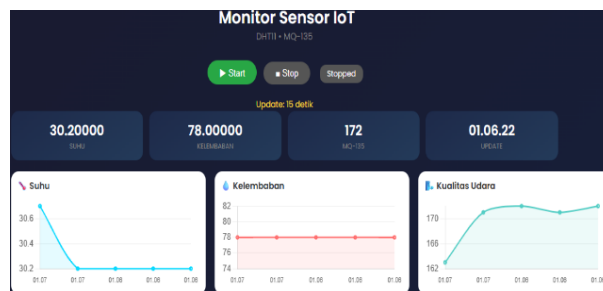
Dari sisi perangkat lunak, sistem diintegrasikan dengan platform *cloud* ThingSpeak sebagai media utama dalam proses penyimpanan dan visualisasi data berbasis *Internet of Things* (IoT). Konfigurasi pada platform ini dilakukan dengan membagi parameter pengukuran ke dalam beberapa *field*, yaitu konsentrasi gas dari sensor MQ-135, serta suhu dan kelembapan dari sensor DHT11. Data yang dikirimkan oleh NodeMCU ESP8266 akan tersimpan secara otomatis pada server *cloud* dan divisualisasikan dalam bentuk grafik *time series*, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau perubahan kondisi lingkungan secara kontinu [8][9]. Selain menggunakan ThingSpeak, sistem juga dikembangkan dengan web monitoring sebagai antarmuka tambahan yang berfungsi untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor secara lebih fleksibel dan interaktif. Web monitoring ini berperan sebagai *frontend* yang mengambil data dari server ThingSpeak melalui API, kemudian menyajikannya kembali dalam bentuk tampilan yang lebih informatif, seperti grafik, indikator status, serta data numerik secara *real-time*. Pendekatan ini memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi kualitas udara melalui browser tanpa harus masuk langsung ke platform ThingSpeak, sehingga meningkatkan kemudahan akses dan pengalaman pengguna [1][2]. Selain monitoring berbasis web dan *cloud*, sistem juga dilengkapi dengan tampilan lokal menggunakan OLED yang terpasang pada perangkat. OLED berfungsi sebagai indikator langsung yang menampilkan

nilai konsentrasi gas, suhu, kelembapan, serta status kualitas udara (Baik/Buruk) berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan dalam program. Keberadaan tampilan lokal ini menjadi penting untuk memastikan bahwa pengguna tetap dapat memperoleh informasi secara langsung meskipun tidak sedang terhubung dengan jaringan internet.

Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mengintegrasikan tiga metode monitoring, yaitu melalui platform ThingSpeak sebagai penyimpanan data *cloud*, web monitoring sebagai antarmuka visual berbasis browser, serta OLED sebagai tampilan lokal. Integrasi ini memberikan fleksibilitas tinggi bagi pengguna dalam mengakses informasi kualitas udara secara *real-time*, baik secara langsung di lokasi maupun secara daring, sehingga sistem mampu mendukung monitoring lingkungan secara lebih komprehensif dan berkelanjutan.



Gambar 14. Tampilan Antarmuka Grafik Time Series pada Platform ThingSpeak

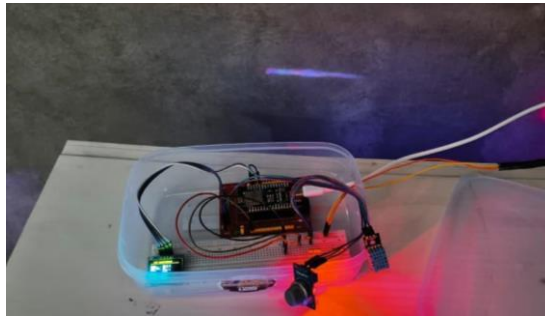


Gambar 15. Tampilan Antarmuka Dashboard Monitoring Kualitas Udara Berbasis Web

4.3 Pengujian Alat

Pengujian sistem monitoring kualitas udara dilakukan secara langsung di dalam ruangan untuk mensimulasikan kondisi lingkungan nyata. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati respons sensor MQ-135 terhadap perubahan kualitas udara, serta memverifikasi kestabilan pembacaan suhu dan kelembapan dari sensor DHT11 yang terintegrasi dengan NodeMCU ESP8266. Proses pengujian dilakukan melalui beberapa tahapan terkontrol. Pada tahap awal, sistem dinyalakan dan dibiarkan dalam kondisi lingkungan normal selama beberapa menit untuk memperoleh nilai dasar (*baseline*) pembacaan sensor. Pada tahap ini, nilai konsentrasi gas, suhu, dan kelembapan dicatat melalui tampilan OLED serta dibandingkan dengan data yang ditampilkan pada platform ThingSpeak. Selanjutnya, dilakukan tahap pemberian stimulus terhadap kualitas udara di sekitar sensor, seperti menghadirkan sumber asap atau meningkatkan aktivitas dalam ruangan, untuk mengamati perubahan nilai yang dihasilkan oleh sensor MQ-135. Data yang ditampilkan pada OLED kemudian dibandingkan dengan data yang terekam pada ThingSpeak guna memastikan konsistensi antara pembacaan lokal dan data yang dikirimkan ke server.

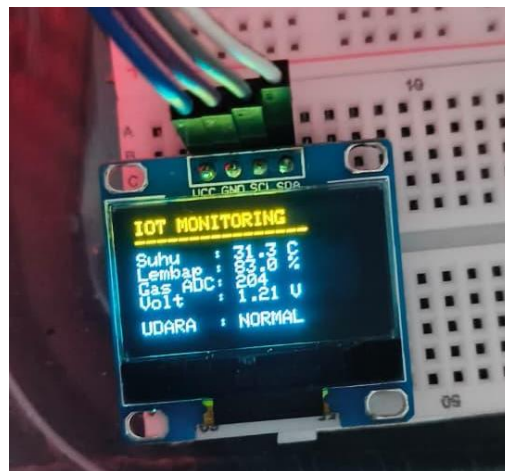
Melalui rangkaian pengujian tersebut, sistem dievaluasi berdasarkan tiga aspek utama, yaitu akurasi respons sensor terhadap perubahan kualitas udara, kestabilan pembacaan parameter lingkungan, serta keandalan komunikasi data dalam sistem berbasis *Internet of Things* (IoT).



Gambar 16. Proses Pengujian Alat

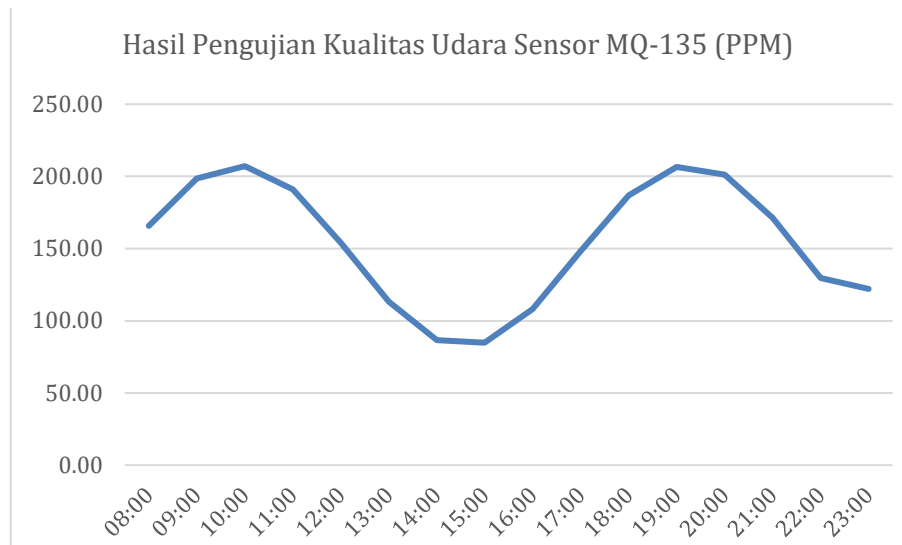
4.4 Hasil Dari Penelitian

Berdasarkan hasil realisasi perangkat keras, seluruh komponen berhasil dirangkai dan berfungsi sesuai dengan perancangan awal. Sensor MQ-135 mampu mendeteksi perubahan konsentrasi gas di dalam ruangan yang ditunjukkan melalui fluktuasi nilai analog (ADC). Sensor DHT11 juga berhasil membaca suhu dan kelembapan lingkungan dengan cukup stabil. Data yang diperoleh kemudian diproses oleh NodeMCU ESP8266 dan ditampilkan secara langsung melalui OLED sebagai indikator kualitas udara lokal. Tampilan OLED memuat informasi nilai gas, suhu, kelembapan, serta status kualitas udara berdasarkan ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan. Konsumsi daya sistem relatif rendah karena menggunakan NodeMCU ESP8266, sensor DHT11, MQ-135, dan OLED Display dengan suplai 5V USB. Selama pengujian berlangsung, koneksi *WiFi* tetap stabil dan tidak ditemukan kegagalan pengiriman data ke platform ThingSpeak.



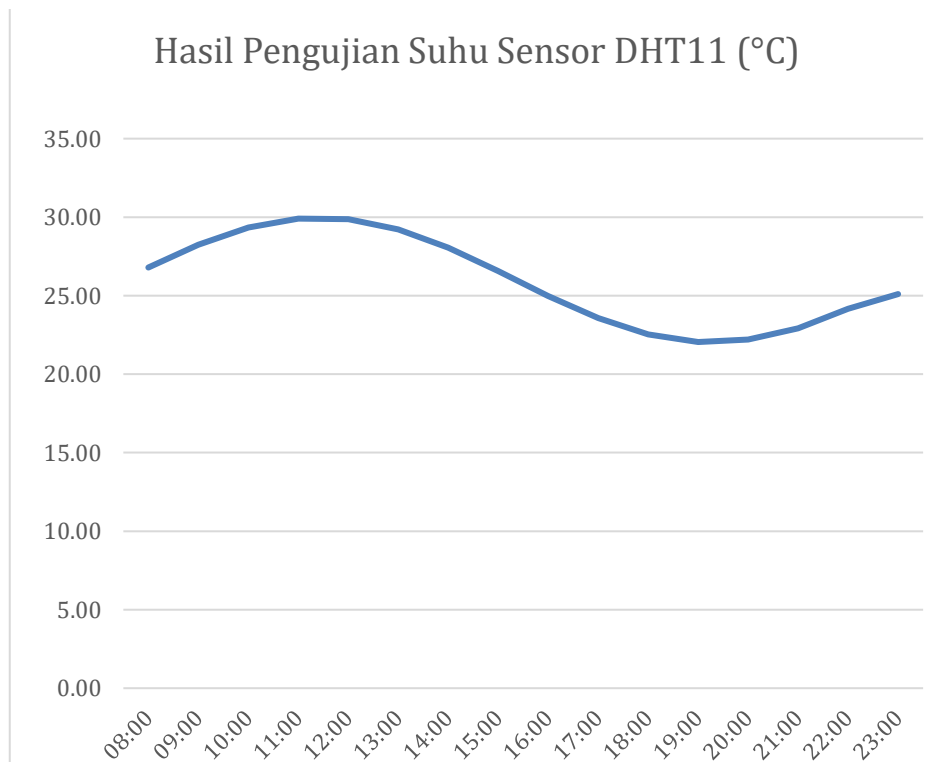
Gambar 17. Contoh Tampilan Oled Sesuai kualitas udara Didalam Ruangan

Data diambil dari jam 08:00 pagi sampai jam 23:00 malam untuk melihat apakah alat dapat bekerja dengan baik seperti yang terlihat pada grafik berikut ini:



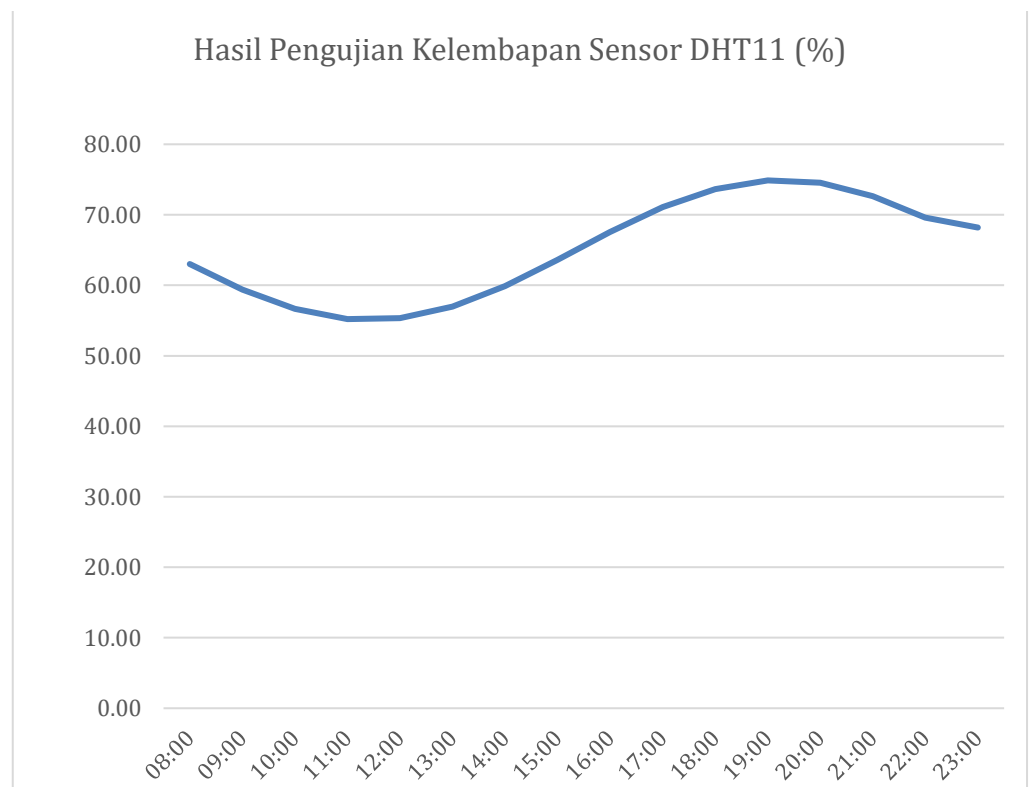
Gambar 18. Hasil Pengujian Kualitas Udara Sensor MQ-135

Berdasarkan Gambar 18, yaitu hasil pengujian kualitas udara menggunakan sensor MQ-135, terlihat bahwa konsentrasi gas di dalam ruangan mengalami perubahan yang cukup dinamis pada rentang waktu pukul 08.00 hingga 23.00. Nilai konsentrasi gas pada pagi hari cenderung meningkat dan mencapai puncak sekitar pukul 10.00 dengan nilai di atas 200 ppm. Setelah itu, nilai konsentrasi gas mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai titik terendah pada sekitar pukul 14.00–15.00 dengan nilai sekitar 85–90 ppm. Memasuki sore hingga malam hari, konsentrasi gas kembali meningkat dan mencapai puncak kedua pada sekitar pukul 19.00 dengan nilai lebih dari 200 ppm sebelum akhirnya kembali menurun pada pukul 22.00–23.00. Fluktuasi nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor MQ-135 mampu mendeteksi perubahan kualitas udara secara real-time yang dipengaruhi oleh aktivitas di dalam ruangan, sirkulasi udara, serta keberadaan sumber polutan seperti asap, penggunaan perangkat elektronik, maupun aktivitas penghuni ruangan.



Gambar 19. Hasil Pengujian Suhu Sensor DHT11

Berdasarkan Gambar 19, yaitu hasil pengujian suhu menggunakan sensor DHT11, terlihat bahwa suhu ruangan mengalami perubahan secara bertahap selama periode pengamatan dari pukul 08.00 hingga 23.00. Pada pagi hari, suhu berada pada kisaran 26–27°C dan terus meningkat hingga mencapai suhu tertinggi sekitar 30°C pada pukul 11.00–12.00. Kondisi ini menunjukkan adanya peningkatan suhu lingkungan akibat pengaruh aktivitas penghuni dan intensitas panas pada siang hari. Setelah pukul 12.00, suhu mulai mengalami penurunan secara perlahan hingga mencapai titik terendah sekitar 22°C pada pukul 19.00–20.00. Memasuki malam hari, suhu kembali mengalami sedikit peningkatan hingga mencapai sekitar 25°C pada pukul 23.00. Perubahan suhu yang terjadi menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu membaca kondisi suhu lingkungan secara stabil dan *real-time* sesuai dengan perubahan kualitas udara di dalam ruangan sepanjang waktu pengamatan.



Gambar 20. Hasil Pengujian Kelembapan Sensor DHT11

Berdasarkan grafik hasil pengujian kelembapan menggunakan sensor DHT11, terlihat bahwa tingkat kelembapan udara di dalam ruangan mengalami perubahan yang cukup stabil selama periode pengamatan dari pukul 08.00 hingga 23.00. Pada pagi hari, kelembapan berada pada kisaran 63% kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai nilai terendah sekitar 55% pada pukul 11.00–12.00. Setelah itu, kelembapan mulai meningkat secara perlahan pada sore hari dan mencapai nilai tertinggi sekitar 74–75% pada pukul 19.00–20.00. Memasuki malam hari, tingkat kelembapan kembali mengalami sedikit penurunan hingga berada pada kisaran 68% pada pukul 23.00. Pola perubahan tersebut menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik dengan suhu udara, di mana ketika suhu meningkat maka kelembapan cenderung menurun, sedangkan ketika suhu menurun maka kelembapan meningkat. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu membaca perubahan kelembapan udara secara *real-time* dan konsisten sesuai kondisi lingkungan di dalam ruangan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu merekam perubahan parameter lingkungan secara *real-time* pada rentang waktu pukul 08.00 hingga 23.00. Nilai konsentrasi gas yang dibaca sensor MQ-135 mengalami fluktuasi yang cukup signifikan dengan nilai tertinggi mencapai 206 ppm pada pukul 10.00 dan 19.00, sedangkan nilai terendah berada pada pukul 15.00 sebesar 85 ppm. Perubahan tersebut menunjukkan adanya

pengaruh aktivitas penghuni, sirkulasi udara, dan kondisi lingkungan terhadap konsentrasi gas di dalam ruangan. Sementara itu, suhu ruangan mengalami peningkatan pada siang hari dan mencapai nilai tertinggi sekitar 29.9°C pada pukul 12.00 sebelum mengalami penurunan pada sore hingga malam hari.

Pada parameter kelembapan udara, nilai yang diperoleh menunjukkan pola yang berbanding terbalik dengan suhu. Kelembapan terendah terjadi pada pukul 11.00–12.00 dengan nilai sekitar 55%, sedangkan kelembapan tertinggi terjadi pada malam hari dengan nilai mencapai 74% pada pukul 19.00–20.00. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketika suhu meningkat maka kelembapan udara cenderung menurun, sedangkan saat suhu menurun kelembapan meningkat. Secara keseluruhan, data hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan dalam ruangan secara konsisten dan dapat digunakan sebagai indikator sederhana untuk mengetahui perubahan kualitas udara berdasarkan parameter konsentrasi gas, suhu, dan kelembapan udara.

Meskipun demikian, beberapa pendekatan yang telah dikembangkan masih memiliki keterbatasan, seperti akurasi sensor yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan serta kurangnya kalibrasi terhadap alat standar [8]. Selain itu, sebagian sistem hanya berfokus pada satu parameter lingkungan tanpa mempertimbangkan keterkaitan antara kualitas udara, suhu, dan kelembapan [9]. Di sisi lain, kelebihan dari sistem berbasis IoT adalah kemampuannya dalam melakukan monitoring secara *real-time*, fleksibel, dan dapat diakses secara jarak jauh melalui jaringan internet [10]. Keterbatasan penelitian ini adalah belum dilakukan pengujian akurasi sensor menggunakan alat ukur standar yang telah terkalibrasi. Oleh karena itu, validitas nilai pengukuran suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas masih mengacu pada karakteristik bawaan sensor yang digunakan. Pengujian menggunakan alat referensi terkalibrasi disarankan pada penelitian selanjutnya untuk memperoleh tingkat akurasi yang lebih terukur.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor DHT11 dan MQ-135 Berdasarkan Waktu Pengamatan

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	MQ-135 (PPM)
08:00	26,8	63,0	165
09:00	28,2	59,0	198
10:00	29,5	56,5	206
11:00	30,0	55,0	191
12:00	29,9	55,2	152
13:00	29,2	57,0	112
14:00	28,0	60,0	86
15:00	26,6	63,5	84
16:00	25,0	67,5	108
17:00	23,6	71,0	146
18:00	22,5	73,8	186
19:00	22,0	74,8	205
20:00	22,1	74,5	200
21:00	22,8	72,8	171
22:00	24,0	69,5	128

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, suhu tertinggi tercatat pada pukul 11.00 sebesar 30,0°C, sedangkan suhu terendah terjadi pada pukul 19.00 sebesar 22,0°C. Pada parameter kelembapan, nilai tertinggi tercatat sebesar 74,8% pada pukul 19.00, sementara nilai terendah sebesar 55,0% terjadi pada pukul 11.00. Pengukuran kualitas udara menggunakan sensor MQ-135 menunjukkan konsentrasi gas tertinggi sebesar 206 ppm pada pukul 10.00

dan nilai terendah sebesar 84 ppm pada pukul 15.00. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan suhu cenderung diikuti oleh penurunan kelembapan udara, sedangkan konsentrasi gas mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aktivitas di dalam ruangan. Selama proses pengujian berlangsung, seluruh parameter berhasil dibaca oleh sensor, ditampilkan pada OLED Display, serta dikirimkan ke platform ThingSpeak secara *real-time* tanpa mengalami kendala komunikasi. Pengujian dilakukan pada satu lokasi yaitu ruang keluarga rumah penulis sehingga variasi kondisi lingkungan yang diperoleh masih terbatas. Pengujian pada beberapa lokasi dengan karakteristik ventilasi dan aktivitas berbeda diperlukan untuk memperoleh hasil yang lebih representatif.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* menggunakan NodeMCU ESP8266, dapat disimpulkan bahwa sistem telah berhasil bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Integrasi antara sensor MQ-135, sensor DHT11, OLED Display, serta platform ThingSpeak mampu berjalan dengan baik dalam proses pembacaan, pengolahan, penampilan, dan pengiriman data secara *real-time*. Sistem mampu memantau parameter konsentrasi gas, suhu, dan kelembapan udara sebagai indikator sederhana kondisi kualitas udara dalam ruangan. Data hasil pembacaan sensor juga berhasil ditampilkan secara lokal melalui OLED dan dipantau secara *online* melalui platform ThingSpeak berbasis cloud.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merekam perubahan kondisi lingkungan pada rentang waktu pukul 08.00 hingga 23.00 secara konsisten. Nilai konsentrasi gas yang dibaca sensor MQ-135 berada pada rentang 85–206 ppm, suhu udara berada pada rentang 22,0–29,9°C, dan kelembapan udara berada pada rentang 55–74%. Nilai konsentrasi gas tertinggi terjadi pada pukul 10.00 dan 19.00 sebesar 206 ppm, sedangkan nilai terendah terjadi pada pukul 15.00 sebesar 85 ppm. Suhu tertinggi tercatat pada pukul 12.00 sebesar 29,9°C dan suhu terendah pada pukul 19.00 sebesar 22,0°C. Sementara itu, kelembapan tertinggi terjadi pada pukul 19.00–20.00 sebesar 74% dan kelembapan terendah pada pukul 11.00–12.00 sebesar 55%. Berdasarkan kategori kualitas udara yang digunakan dalam penelitian, sebagian besar hasil pengujian masih berada pada kategori baik hingga peringatan sehingga sistem dapat digunakan sebagai solusi monitoring kualitas udara dalam ruangan yang sederhana dan *real-time*.

Meskipun sistem telah berjalan dengan baik, masih terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan untuk meningkatkan performa dan akurasi sistem. Penggunaan sensor gas dengan kemampuan identifikasi gas yang lebih spesifik dan tingkat akurasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan kualitas hasil pengukuran dibandingkan sensor MQ-135 yang bersifat umum. Selain itu, proses kalibrasi sensor dapat dilakukan menggunakan alat ukur standar untuk memperoleh validitas data yang lebih baik. Pengembangan berikutnya juga dapat dilakukan dengan menambahkan fitur notifikasi otomatis ketika kualitas udara berada pada kategori buruk, serta penambahan parameter lain seperti PM2.5, karbon monoksida (CO), dan TVOC agar sistem monitoring kualitas udara menjadi lebih lengkap, akurat, dan informatif.

Kontribusi Penulis:

Konseptualisasi: HB dan DS; Metodologi: HB; Perangkat Lunak: HB; Validasi: HB, AW, dan DS; Analisis formal: HB; Investigasi: HB; Sumber daya: AW; Kurasi data: HB; Penulisan—persiapan draf asli: HB; Penulisan peninjauan dan penyuntingan: AW dan DS; Supervisi: AW.

Pendanaan:

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data:

Data hasil pengujian sistem tersedia atas permintaan kepada penulis yang sesuai.

Ucapan Terima Kasih:

Saya Haidar Bagas Syarifudin sebagai Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Agusma Wajiansyah dan Bapak Didi Susilo Budi Utomo selaku dosen pembimbing di Politeknik Negeri Samarinda atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan makalah ini. Seluruh komponen perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini merupakan pengadaan mandiri oleh penulis sebagai mahasiswa Politeknik Negeri Samarinda. Dalam proses penelitian ini, penulis memanfaatkan perangkat kecerdasan buatan (AI), yaitu ChatGPT (OpenAI) dan Gemini (Google), sebagai alat bantu dalam pembangkitan kode program (code generation) pada implementasi perangkat lunak berbasis Arduino IDE, khususnya dalam penulisan logika program dan pengelolaan tampilan OLED. Seluruh hasil yang dihasilkan dari penggunaan perangkat AI tersebut telah ditinjau, dimodifikasi, dan divalidasi oleh penulis sesuai dengan kebutuhan sistem. Adapun keseluruhan ide penelitian, metodologi, analisis, dan interpretasi hasil sepenuhnya merupakan hasil kerja penulis.

Konflik Kepentingan:

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] M. Khan, Z. Rahman, S. Chowdhury, T. Ontor, M. Hossen, N. Khan, and H. Rahman, "Real-Time Environmental Monitoring Using Low-Cost Sensors in Smart Cities with IoT," *International Journal for Multidisciplinary Research*, 2024, doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i01.23163.
- [2] P. Srinivasan, J. Fredlin, M. Subramanian, and R. Shankar, "IoT-Based Real-Time Air and Water Quality Monitoring System Using ESP32 and ThingSpeak," *FMDB Transactions on Sustainable Intelligent Networks*, 2025, doi: 10.69888/fts.2025.000369.
- [3] A. Aserkar, S. Godla, Y. El-Ebiary, K. Ramesh, and J. Ramesh, "Real-time Air Quality Monitoring in Smart Cities using IoT-enabled Advanced Optical Sensors," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2024, doi: 10.14569/ijacsa.2024.0150487.
- [4] P. R., "Real-Time Air Quality Monitoring Using Low-Cost Sensors – IoT System," *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 2025, doi: 10.55041/ijrem47226.
- [5] C. Enrique, P. Salvador, O. Alsamrai, M. Redel-Macias, and M. Dorado, "Real-Time Intelligent Monitoring of Outdoor Air Quality in an Urban Environment Using IoT and Machine Learning Algorithms," *Applied Sciences*, 2025, doi: 10.3390/app15169088.
- [6] E. Wirawan, A. Tafrikhatin, I. Elyana, "Design of a NodeMCU-Based Real-Time Air Quality Monitoring System Using the Blynk Application," *Jurnal E-Komtek*, 2023, doi: 10.37339/e-komtek.v7i2.1533.
- [7] S. Salvi, H. Tiwari, and S. Bobade, "Integrated IoT System for Real-Time Air Quality Assessment in Diverse Environments," *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*, 2025, doi: 10.47857/irjms.2025.v06i01.02831.
- [8] S. Shahid, D. Brown, P. Wright, A. Khasawneh, B. Taylor, and O. Kaiwartya, "Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research," *Sensors*, vol. 25, 2025, doi: 10.3390/s25072070.
- [9] T. Narayana et al., "Advances in Real-Time Smart Monitoring of Environmental Parameters Using IoT and Sensors," *Helijon*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.helijon.2024.e28195.
- [10] M. Benammar, A. Abdaoui, S. Ahmad, F. Touati, and A. Kadri, "A Modular IoT Platform for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 18, 2018, doi: 10.3390/s18020581.

- [11] Y. Abdullahi, I. G. Saidu, M. B. Abdullahi, and K. A. Dabai, "Development and Validation of an Ammonia (NH₃) Gas Concentration Measurement Device for Industrial and Health Application," *IJRLAS*, vol. 10, no. 7, pp. 212–230, 2024.
- [12] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2011). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/MENKES/PER/V/2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- [13] Merabet, G. H., Essaaidi, M., Ben Haddou, M., Qolomany, B., Qadir, J., Anan, M., Al-Fuqaha, A., Abid, M. R., & Benhaddou, D. (2021). Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques. arXiv.
- [14] T. Lakshmi Narayana, C. Venkatesh, A. Kiran, C. B. J., A. Kumar, S. Bhatia Khan, A. Almusharraf, and M. T. Quasim, "Advances in Real Time Smart Monitoring of Environmental Parameters Using IoT and Sensors," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28195.
- [15] C. N. Lita, M. F. Anwar, and A. R. Hidayat, "Prototype Design IoT Based Air Quality Monitoring Tool for Classrooms Based on Blynk Applications," *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 85–92, 2024.
- [16] A. E. Wahyudi, S. K. Sari, F. Aziz, and Jeffry, "Implementation of an Internet of Things (IoT)-Based Air Quality Monitoring System for Enhancing Indoor Environments," *Journal of Smart Computing Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.61628/jsce.v6i1.1466.
- [17] S. I. Lopes, J. Ferreira, and M. Rodrigues, "Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Environmental Monitoring and Air Quality Assessment," *Sensors*, vol. 25, no. 24, Art. no. 7567, 2025, doi: 10.3390/s25247567.
- [18] B. Fadillah, A. Setiawan, and R. Pratama, "Perancangan Pemantauan Banjir Realtime Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP32 dan ThingSpeak," *Jurnal Aplikasi Teknologi Informasi*, vol. 9, no. 1, pp. 45–54, 2025.
- [19] R. G. Sholid and M. I. Firmansyah, "Sistem Monitoring Berbasis Internet of Things Menggunakan Cloud ThingSpeak untuk Pengelolaan Data Sensor Real-Time," *Jurnal Sains Informatika Terapan*, vol. 4, no. 2, pp. 101–110, 2025.
- [20] R. S. P. Wahyudi and D. Prakoso, "Sistem Monitoring Berbasis ESP32, WiFi, dan ThingSpeak untuk Transmisi Data Sensor Secara Real-Time," *Jurnal Komputasi dan Teknologi Informasi*, vol. 3, no. 1, pp. 15–24, 2026.