RANCANG BANGUN SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS UDARA (CO2, NH3, PARTIKULAT DEBU PM2.5, SUHU, DAN KELEMBAPAN) DENGAN SENSOR MQ 135, DHT22, DAN DSM501A SECARA REAL-TIME BERBASIS ESP32 DAN IOT

Ermasa Cintana Indah Sitopu[1)], Arkhan Subari[2)]
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
*)E-mail : *arkhansubari@live.undip.ac.id*

ABSTRACT

Declining air quality caused by human activities increases health risks, especially to the respiratory system. Gases like CO_2, NH_3, and fine particulate matter (PM2.5) are difficult to detect directly but pose significant health hazards, making real-time air quality monitoring systems necessary. This study designs a system based on ESP32 and IoT to measure the concentrations of CO_2, NH_3, PM2.5, temperature, and humidity in real-time using MQ135, DHT22, DSM501A sensors, and an RTC DS3231 module. Data is displayed on a dot matrix display and stored on the Arduino IoT Cloud platform. Testing shows that the system effectively monitors these parameters with good accuracy (sensor error rates: CO_2 1.82%, temperature 3.33%, humidity 0%, PM2.5 8.17%). The system successfully provides accurate real-time data and facilitates further analysis, with potential for further development including automatic notification features and increased data logging capacity.

Keywords: *Air quality, ESP32, Internet of Things (IoT), Real-time monitoring, Gas sensor*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya zaman dan semakin meningkatnya kebutuhan manusia, mengakibatkan kualitas udara menjadi semakin menurun atau dengan kata lain mengakibatkan pencemaran udara. Sumber pencemaran yang kerap terjadi berasal dari kegiatan – kegiatan yang dilakukan manusia/mahkluk hidup sehingga menimbulkan gangguan bagi lingkungan sekitarnya anatara lain emisi dari pembakaran sampah, transfortasi, dan aktivitas industri. Udara tercemar adalah udara yang tercampur dengan zat, energi, dan atau komponen lain yang tidak diinginkan. Gas yang berada di udara bervariasi, dan tidak dapat dilihat dengan mata telanjang.[1]

Dampak kesehatan yang sering terjadi oleh pencemaran udara adalah infeksi pada saluran pernapasan. Jika kualitas udara yang berada di sekitar buruk, maka akan menggangu kesehatan dan kenyaman lingkungan. Gas seperti CO2, NH3, dan partikel debu halus PM 2.5 menjadi berbahaya apabila konsentrasi dari gas – gas tersebut melebihi dari ambang batas yang di tetapkan.

Gas CO2 merupakan komponen penting dalam siklus kehidupan di bumi. Namun, aktivitas manusia meningkatkan konsentrasi gas CO2, salah satu sumber penyumbang karbon dioksida adalah pembakaran bahan bakar fosil dan pengundulan hutan. Gejala awal paparan CO2 yang tinggi meliputi sakit kepala ringan, pusing, sesak napas, serta gangguan kognitif yang terlihat, seperti kesulitan berkonsentrasi dan mengambil keputusan. Seiring meningkatnya kadar CO2, dampak yang dirasakan dapat menjadi lebih serius, termasuk sakit kepala hebat, disorientasi, gangguan penglihatan dan pendengaran, bahkan kehilangan kesadaran. Menurut +IQAir sebuah platform untuk pemantauan kualitas udara, konsentrasi gas CO2 yang aman berada pada range 400 – 1000 PPM. Part per million (PPM) atau bagian per juta adalah satuan konsentrasi suatu zat yang digunakan untuk menunjukkan kandungan suatu senyawa dalam larutan, polutan dalam air atau udara, atau konsentrasi bahan kimia dalam suatu formulasi.[2]

Senyawa utama yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor adalah Karbon Monoksida (CO), namun terdapat pula senyawa lain yang terbentuk akibat gas buang, seperti Amonia (NH3). Namun demikian, NH3 juga dapat menjadi polutan atmosfer yang berperan dalam beberapa masalah pencemaran udara. Sumber emisi gas NH3 sebagian besar berasal dari kegiatan pertanian namun di daerah perkotaan sumber emisi gas tersebut berasal dari transfortasi atau kendaraan bermotor. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa emisi NH3 dari kendaraan bermotor berperan penting dalam pembentukan partikulat di atmosfer seperti PM 2,5.[3] Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 50 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebauan menyatakan konsentrasi NH3 yang masih berada pada batas aman berada pada konsentrasi NH¬3 yang tidak melebihi 2 PPM.[4]

Particulate matter (PM) adalah campuran kompleks partikel padat dan cair yang tersuspensi di udara. PM 2.5 adalah partikel udara yang berukuran

lebih kecil atau sama dengan 2,5 µm (mikrometer). Sumber utama PM 2.5 berasal dari lalu lintas dan industri termasuk pembakaran bahan bakar dari pembangkit listrik, dan lain – lain. PM 2.5 termasuk kedalam PM yang kurang dari 10 µm, sehingga dapat merugikan manusia khususnya bagi masalah kesehatan manusia[5]. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menyatakan bahwa konsentrasi PM2.5 yang >55.5µg/m^3 termasuk kedalam kategori yang tidak sehat[6].

Kualitas fisik udara khususnya dalam ruangan rumah adalah parameter yang mengidikasi kondisi fisik seperti kelembapan, suhu, dan partikulat. Temperatur suhu yang terlalu rendah dapat merugikan manusia, sehingga manusia mengalami gangguan kesehatan seperti hypotermia, dan sebaliknya apa bila suasa panas dapat mengakibatkan dehidrasi sampai dengan heat stroke. Oleh karena itu batas aman temperatur suhu yang dianjurkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI No 1077 tahun 2011 bahwasnya suhu yang baik berada pada rentang 18 -30□C[7]. Dampak dari kelembapan persentase perhitungan yang terukur apabila tinggi maupun rendah dapat menyebabkan suburnya pertumbuhan mikroorganisme. Baiknya persentase kelembapan yang dianjurkan oleh standar Peraturan Menteri Kesehatan RI No 1077 tahun 2011 berada pada rentang nilai >40%, sebalikanya apabila konsentrasi kelembapan melebihi <60% maka kelembapan tersebut tidak baik[7].

Sensor MQ 135

MQ-135 adalah sensor udara yang dirancang untuk mendeteksi gas amonia (NH3), natrium-(di)oksida (NOx), alkohol/ethanol (C2H5OH), benzena (C6H6), karbon dioksida (CO2). Gas – gas tersebut apabila konsentrasi melebihi ambang batas dapat menganggu kualitas udara dan kesehatan manusia. Sensor ini bekerja pada tegangan 5 Volt dan dilengkapi dengan elemen pemanas internal yang menjaga suhu kerja sensor agar stabil, sensor ini membutuhkan sesi preheat sebelum pembacaan yang stabil. Prinsip kerja dari sensor MQ135 adalah mendeteksi konsentrasi gas tertentu dengan mengubah kadar gas menjadi tegangan analog yang dibaca oleh ESP32 melalui pin analog.[8]



Gambar 1. Bentuk Fisik Sensor MQ135

Sensor DHT22

DHT-22/AM2302 adalah sensor digital yang digunakan untuk mengukur kelembapan dan suhu, dengan output berupa digital-output. Sensor DHT22 bekerja dengan prinsip kapasitif untuk kelembapan dan termistor untuk suhu. Saat kelembapan udara berubah, kapasitor polimer di dalam sensor mengubah kapasitansinya, sementara termistor mengubah resistansinya sesuai suhu lingkungan. Sensor kemudian mengolah perubahan ini menjadi sinyal digital melalui komunikasi satu kawat (single wire digital communication). Data suhu dan kelembapan dikirim secara serial ke mikrokontroler dengan interval pengukuran sekitar 2 detik. Beroperasi dengan sumber tegangan sebesar 3.3 – 6 VDC, dengan konsumsi arus sebesar 1 – 1,5 mA[9].



Gambar 2. Bentuk Fisik Sensor DHT22

Sensor DSM501A

Sensor debu DSM 501A merupakan sebuah modul sensor yang dapat mendeteksi konsentrasi partikel debu di udara, sensor ini dapat bekerja dengan baik dalam mendeteksi debu dengan ukuran minimal debu sebesar 1µm dengan. Sensor debu DSM 501 dapat diintegrasikan kedalam sistem pemantauan ataupun sistem pembersih udara. Output dari pengukuran konsentrasi debu berupa sinyal PWM, sinyal digital yang memiliki pulsa – pulsa dengan lebar yang bervariasi. Lebar pulsa dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi debu tersebut. Sensor dapat membedakan partikel debu berdasarkan ukuran, yaitu partikel berukuran lebih dari 1 µm dan lebih dari 2.5 µm, yang masing-masing memiliki output PWM berbeda. Sensor ini beroperasi pada range tegangan 4,5 - 5,5 V[10].

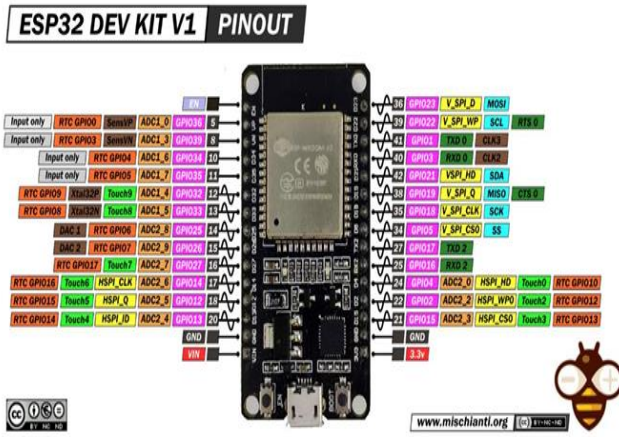


Gambar 3. Bentuk Fisik Sensor DSM501A

ESP32 DevKit V1

ESP32 adalah salah satu contoh mikrokontroler modern yang sangat populer, karena menggabungkan kemampuan prosesor ganda (dual-core), memori yang cukup besar, serta fitur konektivitas WiFi dan Bluetooth bawaan. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 sangat cocok untuk

ADC (Analog to Digital Converter), DAC (Digital to Analog Converter), PWM (Pulse Width Modulation), serta antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, dan I2C. Dengan kemampuan ini, ESP32 DEVKIT V1 dapat menghubungkan sensor, aktuator, dan perangkat lain untuk membangun sistem IoT yang kompleks dan responsive.



Gambar 4. Bentuk Fisik Board ESP32 DevKit V1

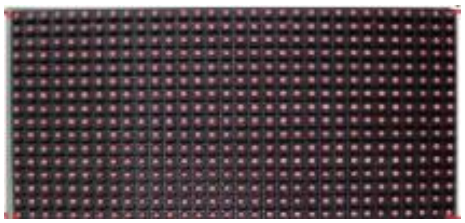
Arduino IOT Cloud

Arduino IoT Cloud adalah sebuah platform berbasis cloud yang dikembangkan oleh Arduino untuk memudahkan pembuatan dan pengelolaan proyek Internet of Things (IoT). Platform ini bersifat open source dan menyediakan antarmuka yang intuitif untuk menghubungkan perangkat mikrokontroler Arduino atau ESP32 ke internet sehingga data sensor dapat dikirim, dipantau, dan dikendalikan secara real-time dari jarak jauh.

Dot Matriks Display P10

Panel P10 merupakan modul display yang dirancang untuk penggunaan semi-outdoor dengan fitur utama berupa tingkat kecerahan tinggi, konsumsi daya rendah, dan umur pakai yang panjang. , konsumsi daya maksimum 20W, dan tegangan input DC 5V. Setiap panel P10 memiliki resolusi 32x16 pixel dengan pixel pitch 10mm, serta dilengkapi dengan konfigurasi 1W Pixel dan constant voltage drive untuk memastikan kecerahan yang stabil[12].

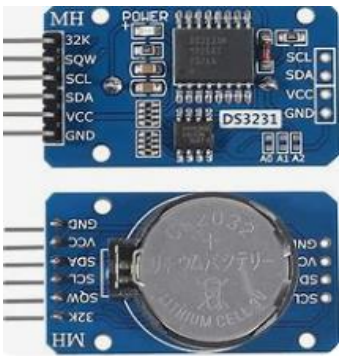
aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan pengolahan data sensor secara real-time, komunikasi nirkabel, dan pengendalian perangkat secara efisien dalam satu modul kecil dan hemat energi[11].
Board ini menyediakan berbagai pin input/output (GPIO) yang dapat dikonfigurasi sebagai digital input/output,



Gambar 5. Bentuk Fisik DMD P10

RTC DS3231

Modul Real-Time Clock (RTC) yang sangat presisi dan efisien dalam konsumsi daya. Menggunakan osilator kristal yang dikompensasi suhu (Temperature-Compensated Crystal Oscillator/TCXO), modul ini mampu mempertahankan akurasi waktu dengan sangat baik. Kemampuannya mencatat waktu mencakup detik, menit, jam, hari, tanggal, bulan, hingga tahun, dengan fitur otomatis yang menyesuaikan tanggal pada bulan dengan kurang dari 31 hari serta memperhitungkan tahun kabisat. Beroperasi dengan tegangan sebesar 2,3 – 5,5 V[13].



Gambar 6. RTC DS3231

1.2 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan arah tugas akhir, berikut adalah batasan-batasannya:

1. Sistem memantau gas CO_2 dan NH_3 dengan sensor MQ135, suhu dan kelembapan dengan sensor DHT22, serta PM2.5 dengan sensor DSM501A, menggunakan mikrokontroler ESP32 dan platform Arduino IoT Cloud. Data ditampilkan di dot matriks display secara real-time.
2. Kalibrasi sensor MQ135 dilakukan menggunakan alat ukur komersial untuk CO_2 (400-5000 ppm), dan kalibrasi NH_3 berdasarkan datasheet sensor.

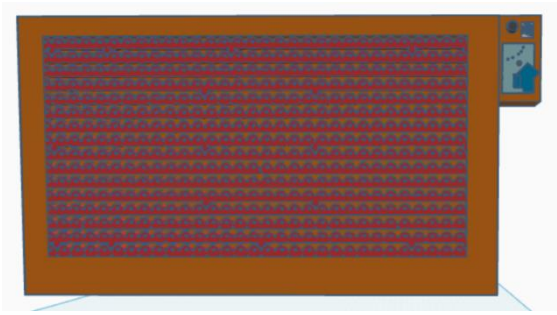
3. Pengukuran PM2.5 stabil diperoleh dengan sampling minimal 15 detik menggunakan DSM501A.
4. Penggunaan platform Arduino IoT Cloud gratis, bersifat privat, dan belum mendukung notifikasi otomatis maupun kendali jarak jauh.
5. Baku mutu yang digunakan: CO_2 400-1000 ppm menurut +IQAir, NH_3 maksimal 2 ppm sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup, dan PM2.5 >55.5 µg/m³ sebagai batas tidak sehat menurut BMKG.
6. Temperatur ideal 18-30°C dan kelembapan ideal 40%-60% RH berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No 1077 Tahun 2011.

2. PERANCANGAN SISTEM

Perancangan sistem pada sistem pemantauan kualitas udara dari konsentrasi gas yang terukur di udara dilakukan dalam dua aspek utama, yaitu perancangan perangkat keras (*Hardware)* dan perancangan perangkat lunak (*Software).*

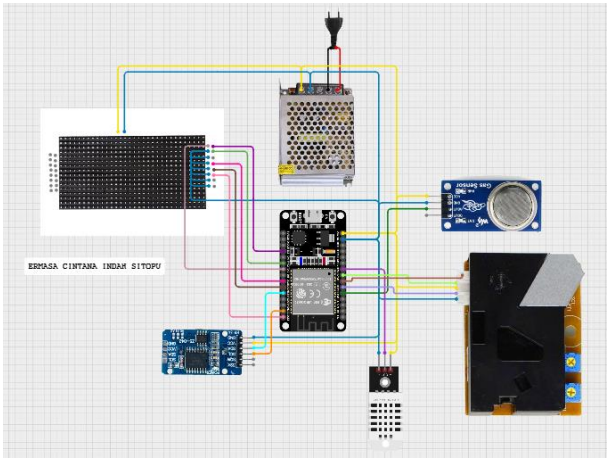
2.1 Perancangan Perangkat Keras

Tahap ini dilakukan perancangan model desain 3D Sistem. Desain ini bertujuan untuk mempresentasikan struktur fisik dari sistem pemantauan kualitas udara. Dan wiring diagram dari sistem pemantauan kualitas udara.



Gambar 7. Tampilan Desain Sistem

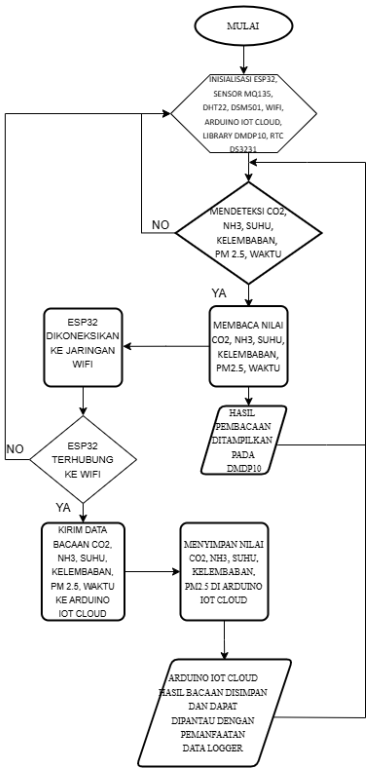
Wiring diagram ini menampilkan komponen – komponen yang digunakan dan diintegrasikan dengan ESP32. Media visualisasi yang digunakan menggunakan DMD P10.



Gambar 8. Wiring diagram Sistem

2.2 Perancangan Perangkat Lunak

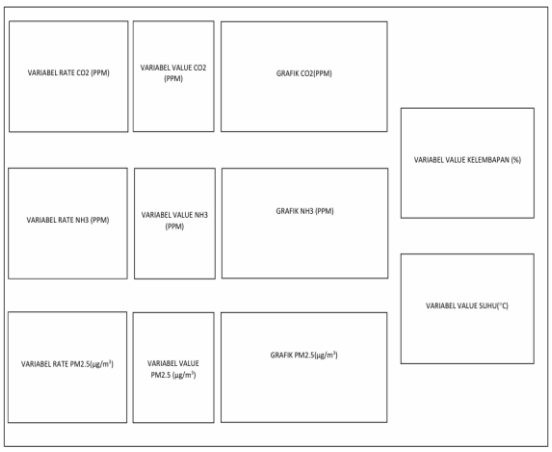
Pada sisi perangkat lunak, perancangan sistem dilakukan dengan menyusun alur logika dengan menggunakan flowchart, yang menggambarkan jalannya sistem. Sistem ini dikendalikan dengan menggunakan ESP32, dengan pemanfaatan data logger melalui *platform* Arduino IOT Cloud.



Gambar 9. Flowchart Sistem

Untuk mendukung analisi lebih lanjut, sistem ini memanfaatkan data logger oleh Platform Arduino IOT Cloud, dan dilengkapi dengan tampilan *dashboard* pada Arduino IOT Cloud untuk menampilkan hasil pembacaan sensor dan dapat di

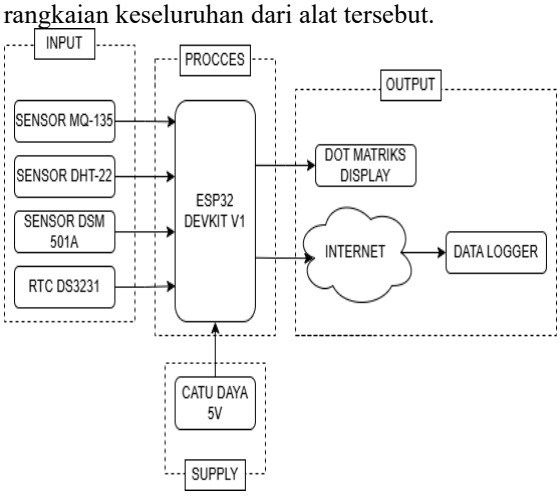
pantau secara jarak jauh.



Gambar 10. Perancangan Layout Dashboard Arduino IOT Cloud

3. METODE PENELITIAN

Untuk mencapai target penelitian yang diharapkan, tahapan penelitian ini meliputi pembuatan alat dan pengambilan data. Pembuatan alat meliputi cetak PCB, cetak frame DMD P10, dan merangkai keseluruhan komponen dan dihubungkan dengan sumber daya. Pengambilan data meliputi pengambilan data pembacaan konsentrasi CO2, PM2.5, suhu, dan kelembapan yang pembacaanya dibandingkan dengan pembacaan alat ukur komersial, serta pembacaan konsentrasi NH3 yang berada di udara. Berikut ini adalah gambar blok rangkaian keseluruhan dari alat tersebut.



Gambar 11. Diagram Blok Alat

Cara kerja dari alat ini adalah:

1. Catu daya 5 Volt sebagai sumber tegangan yang dimana Catu daya memanfaatkan sumber tegangan dari PLN.
2. Sensor MQ-135 digunakan untuk memberikan pembacaan konsentrasi gas CO2 dan NH3 yang akan ditampilkan pada dot matriks display.
3. Sensor DHT-22 digunakan untuk memberikan pembacaan temperatur suhu dan kelembapan untuk udara.
4. Sensor DSM 501A digunakan untuk memberikan pembacaan PM 2.5, pembacaan PM 2.5 untuk partikel seperti debu. Pembacaan berisi kadar partikulat debu PM 2.5 di udara.
5. RTC DS3231 digunakan untuk menyimpan dan mengakses informasi waktu secara akurat
6. ESP32 DevKit V1 yang digunakan sebagai otak dalam melakukan proses pemantauan kualitas udara.
7. DMD P10 merupakan display yang digunakan sebagai tampilan secara real-time yang menampilkan hasil bacaan sensor seperti konsentrasi gas CO2, NH3, suhu dan kelembapan udara, serta PM 2.5.
8. Hasil pembacaan dari alat tersebut dicatat menggunakan pemanfaatan Data Logger berbasis Cloud yaitu platform Arduino IoT Cloud untuk dapat digunakan sebagai pemantauan dan analisis lebih lanjut.

4. HASIL PENGUKURAN

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam memantau kualitas udara melalui pengukuran konsentrasi parameter – parameter.

4.1 Pengujian Sensor MQ135 Pada Gas CO2

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui selisih pembacaan oleh sensor MQ135 dan alat ukur komersial dalam membaca konsentrasi gas CO2 di udara. Hasil pengujian dan pengukuran didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor MQ135 untuk Gas CO2

No	Kondisi	Sensor MQ135 (PPM)	Alat Ukur Komersial	Selisih
1	Udara bercampur dengan asap pembakaran	825	815	10
2	Udara sebelum bercampur asap	420	410	10

Pengujian Sensor MQ135 Pada Gas NH3

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui selisih pembacaan oleh sensor MQ135 dalam membaca konsentrasi gas NH3 di udara. Hasil pengujian dan pengukuran didapatkan data sebagai

berikut:

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor MQ135 untuk Gas NH3

NO	Kondisi	Hasil Sensor MQ135 untuk NH3 (PPM)
1	Udara sebelum tercampur uap cairan NH3	1
2	Udara tercampur uap cairan NH3	2,1

Sensor menunjukkan pembacaan nilai konsentrasi yang meningkat secara konsisten ketika gas NH3 diperkenalkan di area sensor, yang menandakan bahwa sensor MQ135 mampu mendeteksi konsentrasi gas NH3 dengan baik.

4.2 Pengujian Sensor DHT22

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui selisih pembacaan oleh sensor DHT22 dan alat ukur komersial dalam memantau temperatur suhu dan kelembapan di udara. Hasil pengujian dan pengukuran didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor DHT22 untuk suhu dan kelembapan

Tanggal	Jam	Koneksi Wifi	Status Kirim data	Kolom Arduino IoT Cloud
3/06/2025	10.00	Terhubung	Berhasil	Muncul di semua Field
10/06/2025	08.00	Terhubung	Berhasil	Muncul di semua Field
13/06/2025	08.00	Terhubung	Berhasil	Muncul di semua Field

Keterangan	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
DHT22	33	77
Alat Komersial	30	77
Selisih	3	0

Pengujian Sensor PM 2.5

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui selisih pembacaan oleh sensor DSM501A dan alat ukur komersial dalam memantau konsentrasi PM 2.5 di udara. Hasil pengujian dan pengukuran didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Pengujian Sensor MQ135 untuk Gas NH3

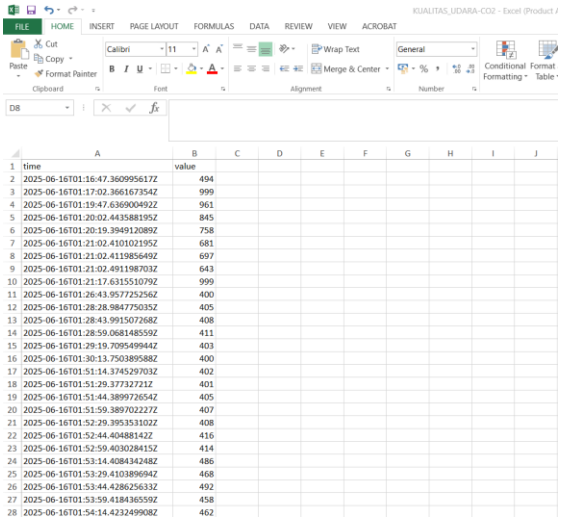
No	Kondisi udara	Sensor DSM501A (µg/m³)	Alat ukur Komersial (µg/m³)	Selisih (µg/m³)
1	Udara bercampur dengan asap pembakaran	138	133	5
2	Udara tidak bercampur dengan asap pembakaran	25,9	25	0,9

Pengujian Koneksi Kirim data Arduino IOT Cloud

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa proses koneksi antara sistem monitoring kualitas udara berbasis ESP32 dan platform Arduino IoT Cloud berjalan dengan sangat baik. Seluruh tahapan pengujian yang tercatat pada tabel menunjukkan status koneksi WiFi yang selalu "Terhubung" dan status pengiriman data yang "Berhasil" pada setiap waktu pengujian yang dilakukan, baik pada tanggal 3 Juni, 10 Juni, maupun 13 Juni 2025.

Tabel 2. Hasil Pengujian Koneksi

Berikut salah satu data hasil pemantauan parameter kualitas udara. Tampilan file Excel hasil pemantauan gas CO2 dengan memanfaatkan data logger oleh Arduino IOT Cloud.



	A	B
1	time	value
2	2025-06-16T01:16:47.360995617Z	494
3	2025-06-16T01:17:02.366167354Z	999
4	2025-06-16T01:19:47.6369004922	961
5	2025-06-16T01:20:02.443588195Z	845
6	2025-06-16T01:20:19.3949120892	758
7	2025-06-16T01:21:02.410102195Z	681
8	2025-06-16T01:21:02.411985649Z	697
9	2025-06-16T01:21:02.491198703Z	643
10	2025-06-16T01:21:17.631551079Z	999
11	2025-06-16T01:26:43.957725256Z	400
12	2025-06-16T01:28:28.984775035Z	405
13	2025-06-16T01:28:43.991507268Z	408
14	2025-06-16T01:28:59.068148559Z	411
15	2025-06-16T01:29:19.709549944Z	403
16	2025-06-16T01:30:13.750389588Z	400
17	2025-06-16T01:51:14.374529703Z	402
18	2025-06-16T01:51:29.377327212Z	401
19	2025-06-16T01:51:44.389972654Z	405
20	2025-06-16T01:51:59.389702227Z	407
21	2025-06-16T01:52:29.395353102Z	408
22	2025-06-16T01:52:44.404881422	416
23	2025-06-16T01:52:59.403028415Z	414
24	2025-06-16T01:53:14.408434248Z	486
25	2025-06-16T01:53:29.410389694Z	468
26	2025-06-16T01:53:44.428625633Z	492
27	2025-06-16T01:53:59.418436559Z	458
28	2025-06-16T01:54:14.423249908Z	462

Gambar 12. File Excel Hasil Pembacaan Gas CO2

ANALISIS

Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada gas CO2 ketika udara bercampur dengan asap pembakaran, nilai yang diukur oleh sensor sebesar 825, sedangkan nilai dari alat komersial sebesar 815, sehingga diperoleh eror sebesar 1,22%. Sedangkan ketika udara belum bercampur dengan asap pembakaran, nilai yang diukur oleh sensor sebesar 420, dan alat ukur komersial mengukur sebesar 410. Dari data tersebut nilai erorr sebesar 2,43%. Dari kedua kondisi tersebut didapatkan nilai rata – rata eror sebesar 1,82%. Sedangkan pembacaan NH3 oleh sensor MQ135 menunjukkan pembacaan nilai yang meningkat secara konsisten ketika gas NH3 diperkenalkan di area sensor, yang menandakan bahwa sensor MQ135 mampu mendeteksi konsentrasi gas NH3 dengan baik.

Berdasarkan hasil pengukuran suhu dan kelembapan oleh sensor DHT22 menunjukkan bahwa hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada pengujian DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, nilai suhu yang diukur oleh sensor sebesar 33°C, sedangkan nilai dari alat komersial sebesar 32°C, sehingga diperoleh eror sebesar 3,33%. Nilai Kelembapan yang diukur oleh sensor sebesar 77%, sedangkan nilai dari alat komersial sebesar 77%, sehingga diperoleh eror sebesar 0%, nilai kelembapan yang ditampilkan berada pada level akurat yang baik.

Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada pengujian DSM501A untuk mengukur PM2.5, nilai PM2.5 yang diukur oleh sensor sebesar 138µg/m³, sedangkan nilai dari alat komersial sebesar 133µg/m³, sehingga diperoleh eror sebesar 3,75%. Sedangkan ketika kondisi udara belum bencampur dengan asap nilai eror yang didapat sebesar 3,6%, dari kedua nilai eror tersebut didapatkan nilai eror rata – rata sebesar 3,67%.

Sensor MQ135, DHT22, DSM501A, dapat berfungsi dengan baik sesuai spesifikasi teknis. Pemanfaatan data logger dapat diunduh apabila hendak melakukan analisis lebih lanjut untuk data tersebut. Sementara itu tampilan antarmuka oleh arduino IOT Cloud juga dapat memudahkan pengguna dalam pemantauan jarak jauh.

KESIMPULAN

1. Sistem pemantauan kualitas udara mengintegrasikan sensor MQ135 (CO_2, NH_3), DHT22 (suhu, kelembapan), dan DSM501A (PM2.5) dengan mikrokontroler ESP32 untuk pengukuran real-time. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata error: CO_2 1,82%, suhu 3,33%, kelembapan 0%, PM2.5 3,67% dibanding dengan alat ukur komersial
2. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan koneksi IoT, memungkinkan tampilan data langsung pada display dot matriks dan penyimpanan di Arduino IoT Cloud.

SARAN

1. Kembangkan sistem notifikasi otomatis melalui aplikasi mobile atau email agar pengguna cepat mendapat peringatan saat parameter melebihi ambang batas.
2. Pertimbangkan penggunaan layanan cloud IoT berbayar atau platform alternatif dengan fitur lebih lengkap, seperti kapasitas variabel dan penyimpanan lebih besar serta notifikasi otomatis yang fleksibel.
3. Tambahkan sistem backup data lokal, misalnya menggunakan SD card, untuk menjaga data tetap aman saat terjadi gangguan koneksi atau keterbatasan cloud.
4. Gunakan sensor CO_2 dengan jangkauan lebih besar daripada MQ135 yang hanya mampu mengukur hingga 1000 PPM untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. G. Salasa, A. Rosadi, and N. Fahriani, "Perancangan Alat Monitoring Polusi Udara Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Sensor Gas TGS-2442," *Comput. Insight J. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.30651/ci:jcs.v3i1.9146.

[2] +IQAir, "Karbon dioksida dalam ruangan." [Online]. Available: https://www.iqair.com/id/newsroom/indoor-carbon-dioxide-co2?srsltid=AfmBOorfq1v7q3pbs4vrYGtFHAKwmMixYhTGYzLqiuZcTP9E7Cj054sy

[3] A. A. Zafany, "Analisis Kualitas Udara Untuk Parameter NH3," no. November, pp. 4–6, 2021, [Online]. Available: http://repository.unhas.ac.id/id/eprint/8916/2/D131171015_skripsi_19-10-2021 Bab 1-2.pdf

[4] Menteri Negara Lingkungan Hidup,

"Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No . 15 Tahun 1996 Tentang : Baku Tingkat Getaran," *Program*, no. 49, p. 15, 1996, [Online]. Available: https://baristandsamarinda.kemenperin.go.id/download/KepMenLH49(1996)-Baku_Tingkat_Getaran.pdf

[5] A. P. Eskawiyanti, "Paparan Particulate Matter 1 (PM1) dan Particulate Matter 2,5 (PM2,5) Pada Trotoar," vol. 1, pp. 1–227, 2018.

[6] BMKG, "Konsentrasi Partikulat (PM2.5)," BMKG. [Online]. Available: https://www.bmkg.go.id/kualitas-udara/pm25

[7] M. Kesehatan and R. Indonesia, "Peraturan Mentri Kesehatan Indonesia No 1077/Menkes/PER/2011," 2011.

[8] A. Arisudin, M. Yahya, and D. Erwanto, "Klasifikasi Aroma Teh Dengan Menggunakan Sensor Gas Berbasis Arduino Uno," *JASEE J. Appl. Sci. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 02, pp. 115–127, 2021, doi: 10.31328/jasee.v2i02.198.

[9] T. Liu, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)," *Aosong Electron. Co.,Ltd*, vol. 22, pp. 1–10, 2015, [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf

[10] S. S&C, "Dust Sensor Module," pp. 6–7, 2014.

[11] ANANDA MUHAMAD TRI UTAMA, *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title*, vol. 9. 2022.

[12] "Data Sheet P10 Single Color LED Display," pp. 1–5.

[13] G. Description, O. Information, and T. O. Circuit, "Extremely Accurate I 2 C-Integrated RTC / TCXO / Crystal RTC / TCXO / Crystal CONDITIONS," pp. 1–20.