

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality/IAQ*) berbasis mikrokontroler telah banyak dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. [6] dalam tinjauan komprehensif yang mereka susun menyatakan bahwa perkembangan sistem pemantauan IAQ secara umum bergerak ke arah penggunaan sensor berbiaya rendah yang terintegrasi dengan platform Internet of Things (IoT) untuk pencatatan data secara otomatis dan berkelanjutan. Kecenderungan ini muncul karena metode pemantauan secara manual dinilai kurang mampu merekam perubahan kondisi udara secara terus-menerus.

Beberapa pendekatan telah dikembangkan dengan parameter dan komponen yang bervariasi. Sebagian penelitian berfokus pada pemantauan satu atau dua parameter, sedangkan penelitian lain mengintegrasikan lebih banyak parameter dalam satu sistem. Penggunaan mikrokontroler seperti ESP8266, Arduino, dan ESP32 menjadi pilihan umum karena kemampuannya mendukung konektivitas nirkabel dan integrasi sensor yang fleksibel.

Perbedaan utama penelitian ini dibandingkan penelitian terdahulu terletak pada kombinasi empat parameter sekaligus CO₂, suhu, kelembapan, dan PM2.5 dalam satu perangkat berbasis ESP32 dengan penyimpanan data otomatis ke Google Spreadsheet melalui Google Apps Script. Penggunaan sensor MH-Z16 berbasis *NDIR* untuk CO₂ dan sensor partikulat ZH03B berbasis hamburan cahaya laser memberikan kemampuan deteksi yang lebih spesifik dibandingkan sistem dengan sensor gas umum. Selain itu, mekanisme pencatatan data berkala ke platform cloud memungkinkan pemantauan historis yang tidak selalu tersedia pada sistem monitoring lokal berbasis LCD saja.

Dengan demikian, penelitian ini mengisi celah pada aspek integrasi multi-parameter IAQ berbasis ESP32 dengan penyimpanan data cloud yang dapat diakses secara daring, sekaligus memberikan indikator kategorisasi kualitas udara secara otomatis berdasarkan acuan [7].

[8] merancang sistem pemantauan dan pengendalian kadar CO₂ dalam ruangan berbasis sistem penciuman elektronik (electronic nose). Penelitian tersebut berfokus pada satu parameter, yaitu konsentrasi CO₂, dan belum mencakup parameter suhu, kelembapan, maupun partikulat PM2.5. Sistem tersebut juga belum menyediakan mekanisme pencatatan data otomatis ke media penyimpanan berbasis cloud. Penelitian ini melengkapi keterbatasan tersebut dengan mengukur empat parameter sekaligus dan menyimpannya secara berkala ke Google Spreadsheet.

[9] mengembangkan prototipe pengukuran suhu dan kelembapan ruangan menggunakan sensor DHT22 berbasis Arduino Uno. Penelitian tersebut hanya mengukur dua parameter lingkungan dan belum melibatkan pengukuran CO₂ maupun PM2.5. Penggunaan Arduino Uno juga membatasi konektivitas nirkabel karena papan tersebut tidak dilengkapi modul WiFi terintegrasi. Penelitian ini menggantikan peran mikrokontroler dengan ESP32 yang memiliki WiFi bawaan, sekaligus menambahkan sensor CO₂ MH-Z16 dan sensor PM2.5 ZH03B.

[6] menyusun tinjauan komprehensif terhadap sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT. Tinjauan tersebut menyimpulkan bahwa banyak sistem yang dikembangkan masih memerlukan validasi sensor dan kejelasan metode pengujian. Penelitian ini menindaklanjuti temuan tersebut dengan menyertakan pengujian fungsional sensor, pengujian pengiriman data, serta kategorisasi kualitas udara berdasarkan acuan baku mutu.

[10] membangun sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT. Penelitian tersebut memaparkan arsitektur sistem secara umum, tetapi belum menetapkan kombinasi komponen yang spesifik sebagaimana kebutuhan pada tugas akhir ini. Penelitian ini menggunakan konfigurasi komponen yang spesifik, yaitu ESP32, MH-Z16, DHT22, ZH03B, LCD I2C, dan Google Spreadsheet.

Berdasarkan keempat penelitian tersebut, celah utama yang diisi penelitian ini terletak pada integrasi empat parameter kualitas udara dalam satu perangkat berbasis ESP32 yang disertai pencatatan data otomatis ke Google Spreadsheet dan kategorisasi kualitas udara.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas tidak berwarna dan tidak berbau yang dihasilkan dari proses respirasi manusia serta pembakaran. Di dalam ruangan tertutup, konsentrasi CO₂ dapat meningkat seiring bertambahnya jumlah penghuni dan berkurangnya pertukaran udara. [2] menjelaskan bahwa konsentrasi CO₂ dalam ruangan dapat digunakan sebagai metrik untuk menilai kecukupan laju ventilasi udara luar, karena CO₂ yang dihirup penghuni berperan sebagai gas penanda (tracer gas) yang mencerminkan tingkat pertukaran udara pada ruangan berpenghuni. Oleh karena itu, konsentrasi CO₂ yang tinggi menjadi indikator ventilasi yang kurang memadai.

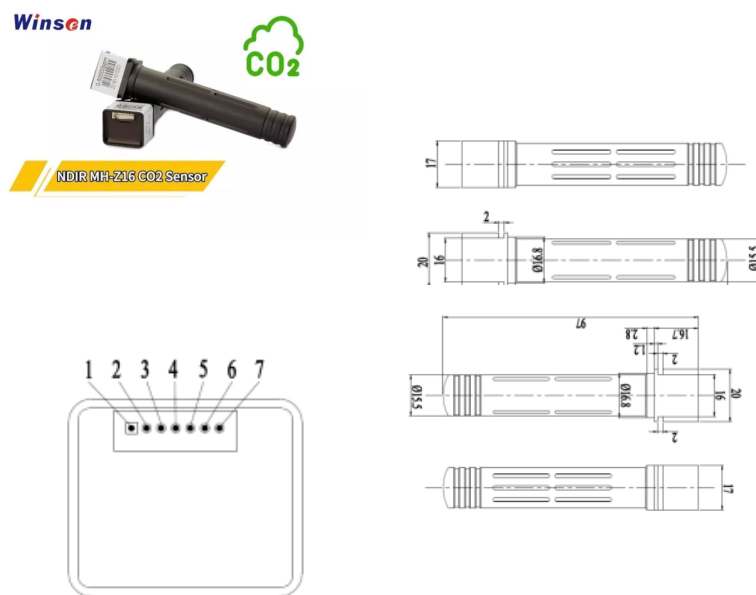
Selain berfungsi sebagai indikator ventilasi, paparan CO₂ pada konsentrasi tinggi juga memengaruhi kondisi penghuni. [3] dalam tinjauan mengenai efek paparan CO₂ tingkat rendah menyimpulkan bahwa kinerja kognitif manusia, termasuk kemampuan pengambilan keputusan, mulai menurun pada konsentrasi CO₂ di atas 1.000 ppm untuk paparan jangka pendek, dan peningkatan konsentrasi CO₂ turut berpengaruh dengan gejala seperti sakit kepala dan pusing. Temuan ini memperkuat pentingnya pemantauan CO₂ sebagai salah satu parameter utama kualitas udara dalam ruangan.

2.2.2 Partikulat PM_{2.5}

PM_{2.5} adalah partikel udara dengan diameter aerodinamis 2,5 mikrometer atau lebih kecil. Partikel ini dapat berasal dari debu halus, asap pembakaran, aktivitas manusia, dan masuknya polutan dari luar ruangan. [4] menjelaskan bahwa ukuran PM_{2.5} yang sangat kecil memungkinkan partikel terhirup hingga mencapai saluran pernapasan bagian bawah, bahkan berpotensi masuk ke sistem peredaran darah, sehingga memberikan dampak yang lebih besar terhadap kesehatan dibandingkan partikel berukuran lebih besar. [7] juga telah memperketat ambang batas konsentrasi PM_{2.5} dalam pedoman kualitas udara globalnya sebagai respons atas semakin kuatnya bukti dampak kesehatan tersebut. Oleh karena itu, PM_{2.5} menjadi salah satu parameter penting dalam monitoring kualitas udara dalam ruangan.

2.2.3 Sensor CO₂ Winsen MH-Z16

Sensor CO₂ Winsen MH-Z16 merupakan sensor karbon dioksida yang bekerja dengan prinsip *Non-Dispersive Infrared (NDIR)*. Prinsip *NDIR* memanfaatkan penyerapan cahaya inframerah oleh molekul CO₂ pada panjang gelombang tertentu, di mana semakin tinggi konsentrasi CO₂, semakin besar penyerapan inframerah yang terjadi. [11] menjelaskan bahwa metode *NDIR* merupakan teknik yang paling umum digunakan untuk pengukuran CO₂ berbiaya rendah karena kestabilan dan selektivitasnya yang baik. Pada penelitian ini, sensor MH-Z16 digunakan untuk membaca kadar CO₂ dan mengirimkan data ke ESP32 melalui komunikasi serial. Konfigurasi pin dan spesifikasi teknis sensor MH-Z16 berdasarkan datasheet disajikan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2



Gambar 2. 1 Sensor CO₂ MH Z-16 Winsen

Tabel 2- 1 Deskripsi Pin Sensor CO₂

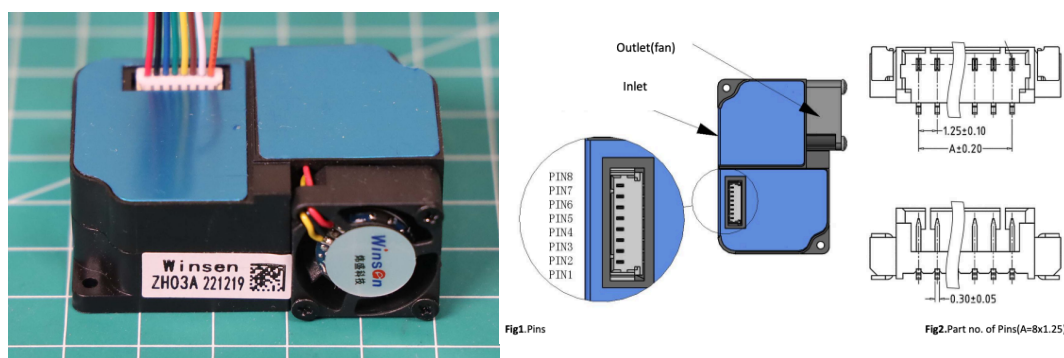
Pin	Deskripsi
PIN 4	Vin (Tegangan Masukan)
PIN 3	GND
PIN 2	Vout (0.4~2V)
PIN 7	PWM
PIN 1	HD (Kalibrasi nol, pertahankan level listrik rendah selama lebih dari 7 detik)
PIN 5	UART (RXD) TTL Input data level Listrik
PIN 6	UART (TXD) TTL Output data level listrik

Tabel 2- 2 Spesifikasi Sensor CO₂ MH-Z16

Kategori	Spesifikasi
No Model	MH-Z16
Deteksi Gas	CO ₂
Tegangan Kerja	4.5 V ~ 5.5 DC
Arus Rata rata	<85mA
Level Antarmuka	3.3 V
Rentang pengukuran	Rentang 0 ~ 5%Vol
Sinyal Keluaran	UART PWM
Keluaran Analog	DAC (0.4 ~ 2V)
Waktu Pemanasan Awal	3 Menit
Waktu Respons	T90 < 30 detik
Suhu Kerja	-10°C ~ 50°C
Kelembapan Kerja	0 ~ 95%RH (Tanpa Kondensasi)
Ukuran	97.20.17mm (P.L.T)
Berat	21 g
Masa Pakai	>5tahun

2.2.4 Sensor Debu Laser ZH03B

Sensor debu laser ZH03B merupakan sensor partikulat yang menggunakan prinsip hamburan cahaya laser (laser light scattering) untuk mendeteksi partikel di udara. [12] menjelaskan bahwa sensor optik jenis ini bekerja dengan mengukur cahaya yang dihamburkan oleh partikel ketika melintasi berkas cahaya, di mana intensitas cahaya hamburan tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai konsentrasi partikel. Sensor ZH03B dapat membaca konsentrasi PM1.0, PM2.5, dan PM10. Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan adalah PM2.5 karena sesuai dengan judul dan batasan masalah. Data PM2.5 dari sensor ZH03B dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi *UART* untuk ditampilkan dan dicatat pada Google Spreadsheet. Konfigurasi pin dan spesifikasi sensor ZH03B berdasarkan datasheet disajikan pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.



Gambar 2. 2 Partikulat PM2.5 ZH03B Winsen

Tabel 2- 3 Deskripsi Pin Sensor PM2.5 ZH03B

Pin	Deskripsi
PIN 1	VDD DC +5V
PIN 2	GND
PIN 3	NC
PIN 4	RXD Port serial penerima TTL 3.3V
PIN 5	TXD Portserial pengirim TTL 3.3V
PIN 6	Menggantung di udara untuk pengguna
PIN 7	NC
PIN 8	Output PWM TTL 3.3V

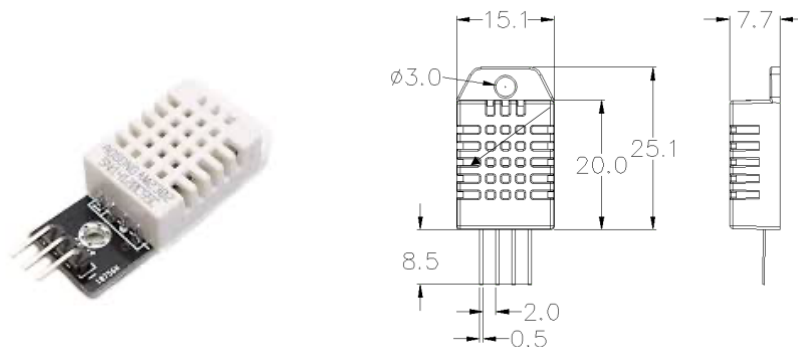
Tabel 2- 4 Spesifikasi Sensor PM2.5 ZH03B

Kategori	Spesifikasi
Model	ZH03B
Rentang Diameter deteksi	0,3 ~ 10 μm
Rentang valid	0 ~ 1000 $\mu\text{g} / \text{m}^3$
Interval deteksi	1s
Akurasi deteksi	PM2.5 $\pm 15 \mu\text{g} / \text{m}^3$ 101 ~ 1000 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ $\pm 15\%$ Pembacaan (Kondisi pengujian : $25 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\% \text{RH}$, TSI8530, rokok, GBT18801-2015)
Waktu stabilisasi setelah dinyalakan	30s
Output	Output UART TTL (level 3,3V, default) Output PWM (level 3,3V, default)
Tegangan Kerja	4,9V ~ 5,5V DC
Arus Kerja	<120mA
Arus dormansi	<20mA
Waktu Respons	<45s
Kelembapan Kerja	0 ~ 80% RH (tanpa kondensasi)
Suhu Kerja	-10 ~ 50°C
Suhu Penyimpanan	-30 ~ 70°C
Dimensi	50x32.4x21mm (PxLxT)
Berat	<38g
MTTF (<i>Mean Time to Failure</i>)	Berkelanjutan tanpa gangguan >10000jam

2.2.5 Sensor DHT22 AM2302

Sensor DHT22 AM2302 adalah sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. [13] dalam evaluasi kinerja sensor DHT22 menyatakan bahwa sensor ini banyak dimanfaatkan pada sistem pemantauan berbasis IoT karena berbiaya rendah, memiliki keluaran digital yang mudah diintegrasikan dengan

mikrokontroler, dan sesuai untuk pemantauan lingkungan dengan perubahan suhu yang berlangsung bertahap. Pada penelitian ini, DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan yang kemudian diproses oleh ESP32. Spesifikasi dan konfigurasi pin sensor DHT22 berdasarkan datasheet disajikan pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.



Gambar 2. 3 Sensor DHT22

Tabel 2- 5 Spesifikasi DHT22

Kategori	Spesifikasi
Model	DHT22
Catu Daya	3.3-6V DC
Sinyal Output	Sinyal digital melalui bus tunggal
Elemen penginderaan	Kapasitor polimer
Rentang operasi	Kelembapan 0-100%RH Suhu -40 ~80°C
Akurasi	Kelembapan $\pm 2\%RH$ (Maks $\pm 5\%RH$) Suhu $< \pm 0.5^{\circ}C$
Resolusi atau sensitivitas	Kelembapan 0.1%RH Suhu 0.1°C
Pengulangan	Kelembapan $\pm 1\%RH$ Suhu $\pm 1^{\circ}C$
Histeresis	Kelembapan $\pm 0.3\%RH$
Stabilitas jangka panjang	$\pm 0.5\%RH/tahun$

Periode penginderaan	Ratarata 2detik
Kemampuan pertukaran	Sepenuhnya dapat dipertukarkan
Dimensi	Ukuran kecil 14x18x5.5mm Ukuran besar 22x28x5mm

Tabel 2- 6 Fungsi Pin DHT22

Pin	Fungsi
1	VDD Catu daya
2	DATA Sinyal
3	NULL
4	GND

2.2.6 Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan System-on-Chip (SoC) dual-core Xtensa® LX6 240 MHz yang mengintegrasikan modul WiFi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2 dalam satu chip. ESP32 mendukung beberapa antarmuka komunikasi, seperti UART, I2C, SPI, ADC, dan GPIO. Kemampuan konektivitas nirkabel serta biaya yang relatif rendah menjadikan ESP32 banyak dipilih sebagai pusat kendali pada sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT [6]. Dalam penelitian ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat pembacaan data dari sensor CO₂ MH-Z16, sensor DHT22 AM2302, dan sensor ZH03B, kemudian menampilkan data pada LCD serta mengirimkan data ke Google Spreadsheet melalui koneksi WiFi. Spesifikasi teknis dan mode kerja ESP32 berdasarkan datasheet disajikan pada Tabel 2.7 dan Tabel 2.8.



Gambar 2. 4 Mikrokontroler ESP32

Tabel 2- 7 Mode Operasi ESP32

Mode	Deskripsi
Active Mode	Proses berjalan pada kecepatan penuh dan semua fitur aktif
Modem Sleep	Wifi atau Bluetooth dinonaktifkan sementara prosesor tetap aktif untuk tugas-tugas tertentu
Light Sleep	Prosesor dimatikan sementara RAM tetap aktif
Deep Sleep	Hampir semua fungsi dimatikan kecuali RTC (<i>Real Time Clock</i>)

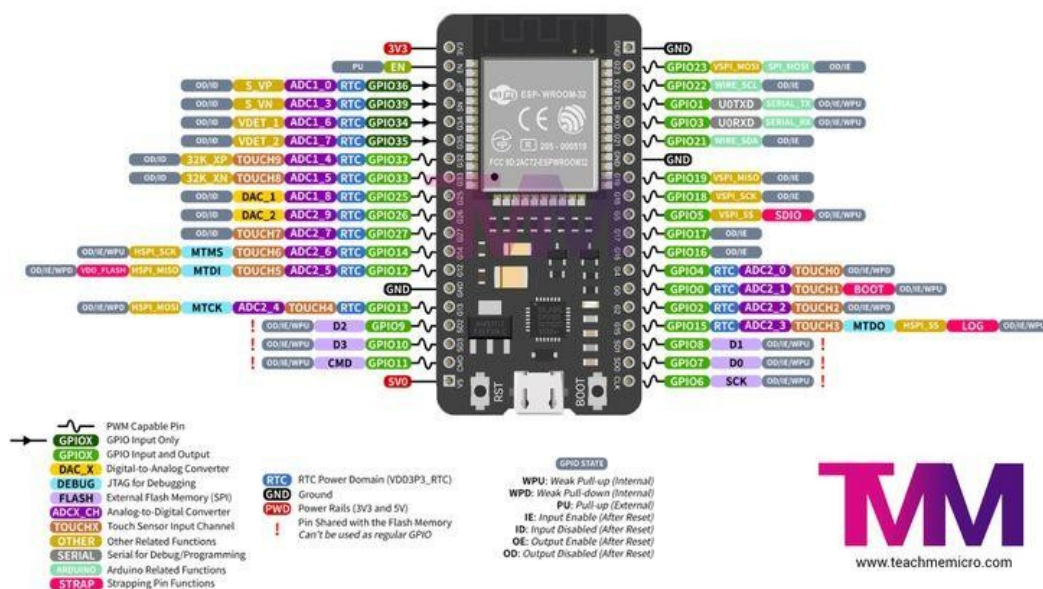
Tabel 2- 8 Spesifikasi ESP32 WROOM 32D

Kategori	Spesifikasi
Proses	Dual-core Xtensa® 32-bit LX6, hingga 240 MHz per core
Memori	520 KB SRAM, hingga 16 MB Flash
Konektivitas	Wifi: IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
	Bluetooth 4.2 (Classic & BLE)
GPIO	34 Pin
ADC	12-bit ADC, hingga 18 saluran
DAC	8-bit DAC (2 saluran)
PWM	Hingga 16 saluran PWM
I2C, SPI, UART	Yes
Tegangan Input	5V
Tegangan Kerja	3.3V (operasi stabil antara 2.2V hingga 3.6V)
Konsumsi Daya	Active mode: ~160 Ma, Modem Sleep: ~30 mA, Light Sleep: ~0,8 mA, Deep Sleep: <10 µA
Ukuran Modul	18 x 25.5 mm
Jumlah Pin	38 Pin
WiFi Range	Hingga 200 meter (tergantung kondisi lingkungan)
Bluetooth Range	Hingga 100 meter untuk BLE (tergantung daya transmisi)
Lingkungan Kerja	Suhu : -40°C hingga +125°C, Kelembapan: 5% hingga 95% (non-kondensasi)

Sistem Operasi	Mendukung FreeRTOS, Arduino IDE, Espressif IDF, PlatformIO
Platform Pengembangan	Arduino IDE, Espressif IoT Development Framework (IDF), PlatformIO

ESP32 PINOUT DIAGRAM

ESP32-WROOM-32



Gambar 2. 5 Pin Out ESP32 WROOM 32D

Untuk menjalankan proses pengolahan data sesuai dengan fungsi yang dirancang, mikrokontroler ESP32 harus diprogram menggunakan serangkaian instruksi logika yang disimpan dalam memori internal. Instruksi tersebut ditulis menggunakan bahasa pemrograman tertentu, kemudian dikompilasi dan diunggah ke dalam mikrokontroler agar dapat dieksekusi sesuai dengan kebutuhan sistem. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam proses pemrograman ESP32 adalah Arduino Integrated Development Environment (Arduino IDE), yang menyediakan antarmuka serta pustaka pendukung untuk mempermudah penulisan, pengujian, dan pengunggahan program ke mikrokontroler.

2.2.6.1 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan sebuah perangkat lunak pengembangan yang digunakan untuk memfasilitasi proses pemrograman pada mikrokontroler berbasis platform Arduino. Perangkat lunak ini dirancang dengan tampilan antarmuka yang sederhana dan mudah dipahami, sehingga cocok digunakan dalam kegiatan pembelajaran maupun pengembangan sistem tertanam oleh pengguna dari berbagai tingkat keahlian. Melalui Arduino IDE, pengguna dapat melakukan penulisan, pengeditan, kompilasi, serta pengunggahan program atau *sketch* ke papan mikrokontroler secara efektif.

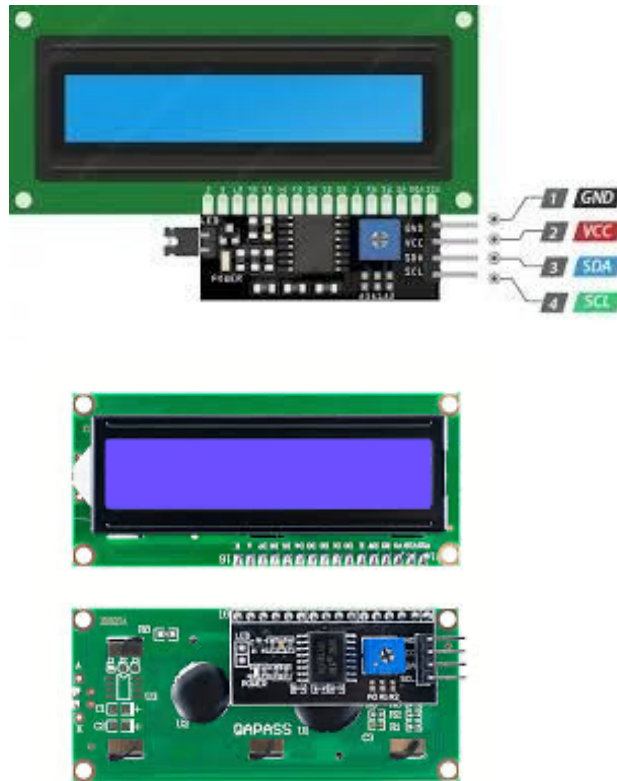
Bahasa pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE mengacu pada bahasa C++ yang telah disederhanakan, sehingga proses penulisan kode menjadi lebih mudah dan terstruktur. Selain mendukung berbagai jenis papan mikrokontroler Arduino seperti Arduino Uno, Arduino Mega, dan Arduino Nano, Arduino IDE juga menyediakan kompatibilitas dengan mikrokontroler lain, termasuk ESP32. Dengan melakukan penambahan konfigurasi papan (*board manager*) dan pustaka yang diperlukan, ESP32 dapat diprogram secara langsung menggunakan Arduino IDE. Oleh karena itu, Arduino IDE dapat dimanfaatkan sebagai salah satu perangkat utama dalam pengembangan aplikasi berbasis ESP32, khususnya pada sistem monitoring dan otomasi berbasis mikrokontroler.

2.2.7 LCD I2C 20x4

LCD digunakan sebagai media tampilan lokal agar pengguna dapat melihat hasil pembacaan sensor secara langsung pada alat. Pada penelitian ini, LCD menampilkan nilai CO₂, suhu, kelembapan, PM2.5, status koneksi, dan status pengiriman data. Penggunaan modul I2C pada LCD bertujuan untuk mengurangi jumlah pin yang digunakan pada ESP32. Penggunaan LCD I2C pada sistem berbasis ESP32 memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

- Menghemat jumlah pin GPIO
- Mempermudah proses wiring
- Mendukung komunikasi data yang stabil
- Memudahkan proses debugging tanpa memerlukan koneksi komputer

Modul LCD I2C umumnya menggunakan IC ekspander seperti PCF8574 yang mengubah komunikasi I2C menjadi sinyal paralel untuk LCD. Dengan demikian, ESP32 dapat mengontrol tampilan hanya melalui dua jalur komunikasi.



Gambar 2. 6 Gambar dan Pinout LCD I2C

Tabel 2- 9 Deskripsi Pin LCD I2C 20x4

Pin	Deskripsi
GND	Ground – dihubungkan ke GND pada mikrokontroler.
VCC	Tegangan input – dihubungkan ke 5V (beberapa modul kompatibel juga dengan 3.3V).
SDA	Jalur data I2C (terhubung ke GPIO ESP32)
SCL	Jalur data I2C (terhubung ke GPIO ESP32)

2.2.8 Catu Daya Adaptor 5V

Catu daya merupakan bagian penting dalam suatu sistem elektronika karena berfungsi sebagai sumber energi listrik yang dibutuhkan oleh seluruh komponen agar dapat beroperasi dengan baik. Pada penelitian ini, catu daya yang digunakan adalah adaptor DC 5V yang berfungsi untuk menyuplai tegangan ke mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, sensor CO₂ MH-Z16, sensor PM2.5 ZH03B, serta perangkat pendukung lainnya.

Adaptor 5V bekerja dengan mengubah tegangan listrik arus bolak-balik (AC) dari jaringan listrik menjadi tegangan arus searah (DC) sebesar 5 volt yang stabil. Tegangan keluaran yang stabil sangat penting untuk menjaga keakuratan pembacaan sensor dan kestabilan kerja mikrokontroler. Fluktuasi tegangan yang terlalu besar dapat menyebabkan kesalahan pembacaan sensor, gangguan komunikasi data, bahkan mengakibatkan sistem mengalami restart secara tiba-tiba.

Pemilihan adaptor 5V pada penelitian ini didasarkan pada kebutuhan tegangan kerja sebagian besar komponen yang digunakan. ESP32 dapat menerima suplai tegangan 5V melalui pin VIN atau konektor USB yang kemudian diturunkan menjadi 3,3V oleh regulator internal untuk kebutuhan inti mikrokontroler. Selain itu, sensor MH-Z16 dan sensor PM2.5 ZH03B juga memerlukan sumber tegangan 5V agar dapat bekerja secara optimal. Dengan menggunakan satu sumber catu daya yang sama, integrasi sistem menjadi lebih sederhana dan mudah dalam proses perancangan maupun pengoperasian.

Kualitas catu daya menjadi salah satu faktor yang memengaruhi performa sistem monitoring kualitas udara. Oleh karena itu, adaptor yang digunakan harus mampu menyediakan tegangan keluaran yang stabil serta arus yang cukup untuk memenuhi kebutuhan seluruh komponen yang terhubung. Pada penelitian ini digunakan adaptor DC 5V dengan kapasitas arus yang sesuai sehingga sistem dapat bekerja secara kontinu dalam melakukan pengukuran, pengolahan, penampilan, dan pengiriman data kualitas udara ke Google Spreadsheet secara berkala.

2.2.9 Google Spreadsheet sebagai Media Penyimpanan Data

Google Spreadsheet merupakan layanan pengolah data berbasis cloud yang disediakan oleh Google dan memungkinkan pengguna untuk menyimpan, mengelola, serta mengakses data secara daring (online). Google Spreadsheet memiliki fungsi yang serupa dengan aplikasi spreadsheet konvensional, namun data disimpan pada server cloud sehingga dapat diakses dari berbagai perangkat yang terhubung ke internet.

[14] menunjukkan bahwa Google Spreadsheet yang dipadukan dengan Google Apps Script dapat digunakan sebagai media penyimpanan data lapangan berbasis cloud untuk perangkat IoT dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan platform komersial, sekaligus menampilkan pembaruan data mendekati waktu nyata pada antarmuka spreadsheet yang familiar. Pada penelitian ini, Google Spreadsheet digunakan sebagai media penyimpanan data hasil monitoring kualitas udara yang diperoleh dari sensor CO₂ MH-Z16, sensor DHT22, dan sensor PM2.5 ZH03B. Data yang telah dibaca dan diolah oleh ESP32 dikirimkan melalui jaringan WiFi menggunakan protokol HTTP ke Google Apps Script, kemudian secara otomatis disimpan ke dalam Google Spreadsheet. Setiap data yang masuk disertai informasi waktu pengukuran sehingga memudahkan proses pemantauan dan analisis data secara berkala.

Penggunaan Google Spreadsheet dipilih karena memiliki beberapa kelebihan, antara lain kemudahan integrasi dengan mikrokontroler berbasis Internet of Things (IoT), kemampuan penyimpanan data secara real-time, akses data yang fleksibel melalui perangkat komputer maupun telepon pintar, serta tidak memerlukan server khusus untuk penyimpanan data. Selain itu, data yang tersimpan dapat diolah lebih lanjut dalam bentuk tabel, grafik, maupun analisis statistik untuk mendukung evaluasi kualitas udara dalam ruangan.

Dalam sistem yang dirancang, Google Spreadsheet berperan sebagai basis data sederhana yang menyimpan seluruh hasil pengukuran kualitas udara sehingga riwayat data dapat terdokumentasi dengan baik dan dapat digunakan untuk analisis kondisi lingkungan dalam ruangan pada periode tertentu.

2.2.10 Sistem Monitoring dan Pencatatan Data Berkala

Sistem monitoring merupakan suatu sistem yang dirancang untuk melakukan pengamatan, pengukuran, dan pengawasan terhadap suatu parameter secara terus-menerus atau dalam interval waktu tertentu. Tujuan utama sistem monitoring adalah memperoleh informasi kondisi suatu objek atau lingkungan secara aktual sehingga perubahan yang terjadi dapat diketahui dan dianalisis dengan cepat.

Pada penelitian ini, sistem monitoring digunakan untuk mengamati kualitas udara dalam ruangan berdasarkan parameter konsentrasi karbon dioksida (CO₂), suhu, kelembapan, dan partikulat PM2.5. Data dari sensor dibaca secara otomatis oleh ESP32, kemudian ditampilkan pada LCD sebagai informasi lokal dan dikirim melalui jaringan internet untuk disimpan pada media penyimpanan data.

Pencatatan data berkala (data logging) merupakan proses penyimpanan data hasil pengukuran secara otomatis dalam interval waktu tertentu. Metode ini memungkinkan seluruh data pengukuran terdokumentasi secara sistematis sehingga dapat digunakan untuk analisis historis, identifikasi pola perubahan, serta evaluasi kondisi lingkungan yang diamati. Dalam sistem yang dirancang, data hasil pengukuran dikirim dan disimpan ke Google Spreadsheet setiap 10 detik. Setiap data yang tersimpan dilengkapi dengan informasi tanggal dan waktu pengukuran sehingga memudahkan proses pelacakan dan analisis data.

Penerapan sistem monitoring dan pencatatan data berkala memberikan beberapa keuntungan. Di antaranya adalah kemampuan pemantauan secara berkala, penyimpanan data secara otomatis tanpa pencatatan manual, kemudahan akses terhadap data historis, serta peningkatan efisiensi dalam proses pengumpulan dan pengolahan data.

Secara sistematis, untuk menghitung data Rata-rata Suhu

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Contoh data suhu :

28,5 ; 29,0 ; 29,2 ; 28,8 ; 29,1

Rata-rata

$$\frac{(28,5+29,0+29,2+28,8+29,1)}{5} = 28,92^{\circ}\text{C}$$

Nilai standar deviasi kecil menunjukan pembacaan sensor lebih stabil.

2.2.11 Pengujian Fungsional Sensor

Pengujian fungsional merupakan metode evaluasi kinerja sensor tanpa menggunakan alat ukur referensi. Kinerja sensor dinilai berdasarkan tiga aspek. Pertama, validitas pembacaan, yaitu seluruh nilai yang dihasilkan berada dalam rentang pengukuran yang tercantum pada datasheet sensor. Kedua, kestabilan pembacaan, yaitu variasi nilai pada kondisi lingkungan yang relatif tetap berada dalam batas wajar yang ditunjukkan oleh nilai standar deviasi. Ketiga, respons terhadap perubahan kondisi, yaitu arah perubahan nilai sensor sesuai dengan perlakuan yang terjadi pada ruangan, misalnya konsentrasi CO₂ meningkat ketika jumlah penghuni bertambah pada ruangan tertutup.

Dengan pendekatan ini, hasil pembacaan sensor diperlakukan sebagai nilai indikatif sesuai spesifikasi akurasi pada datasheet, bukan sebagai nilai terkalibrasi. Pendekatan ini digunakan karena penelitian tidak melakukan perbandingan terhadap alat ukur referensi bersertifikasi.

2.2.12 Statistik Deskriptif

Statistik deskriptif merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengumpulkan, mengolah, menyajikan, dan menginterpretasikan data secara ringkas guna memberikan gambaran umum mengenai karakteristik suatu kumpulan data. Berbeda dengan statistik inferensial yang bertujuan untuk menarik kesimpulan terhadap populasi, statistik deskriptif hanya berfokus pada penggambaran data yang tersedia tanpa melakukan generalisasi lebih lanjut.

Beberapa ukuran yang umum digunakan dalam statistik deskriptif antara lain nilai minimum, nilai maksimum, rata-rata (*mean*), dan standar deviasi. Nilai minimum dan maksimum menggambarkan rentang sebaran data, sedangkan rata-rata menunjukkan nilai tengah dari keseluruhan data. Rata-rata dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n 1xi}{n}$$

Keterangan:

- $\bar{x}$ = Nilai rata-rata
- x_i = Nilai data ke- i
- n = Jumlah data

Standar deviasi merupakan ukuran yang menggambarkan seberapa besar variasi atau penyebaran data terhadap nilai rata-ratanya. Semakin besar nilai standar deviasi, semakin besar variasi data yang terjadi. Rumus standar deviasi adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (xi - \bar{x})^2}{n}}$$

Keterangan:

σ = Standar deviasi

x_i = Nilai data ke- i

$\bar{x}$ = Nilai rata-rata

n = Jumlah data

Selain itu, dalam analisis data juga dikenal konsep *outlier*, yaitu data yang nilainya jauh menyimpang dari sebagian besar data lainnya. Salah satu metode identifikasi *outlier* yang umum digunakan adalah dengan menetapkan batas atas menggunakan rumus:

$$x_{batas} = \mu + 2\sigma$$

Keterangan:

x_{batas} = Batas atas nilai normal

μ = Nilai rata-rata

σ = Standar deviasi

2.2.13 Kualitas Udara

Kualitas udara dalam ruangan dinilai dengan membandingkan konsentrasi parameter terukur terhadap ambang acuan standar. Pada penelitian ini digunakan empat parameter, yaitu karbon dioksida (CO_2), suhu, kelembapan relatif, dan partikulat $\text{PM}_{2.5}$. Ambang untuk suhu, kelembapan, dan $\text{PM}_{2.5}$ mengacu pada Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan (SBMKL) udara dalam ruang pada Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 [17], sedangkan CO_2 menggunakan acuan kecukupan ventilasi dari literatur karena Indonesia belum menetapkan baku mutu CO_2 udara dalam ruang. Subbab berikut menguraikan standar tiap parameter.

1. Karbon Dioksida (CO_2)

Indonesia belum memiliki baku mutu konsentrasi CO_2 untuk udara dalam ruang, termasuk pada Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 [17]. Oleh karena itu, penilaian CO_2 pada penelitian ini menggunakan konsentrasi CO_2 sebagai indikator kecukupan ventilasi. [2] menjelaskan bahwa CO_2 yang dihirup penghuni berperan sebagai gas penanda (tracer gas), sehingga konsentrasinya mencerminkan laju pertukaran udara luar terhadap jumlah penghuni. Konsentrasi 1.000 ppm banyak digunakan sebagai penanda praktis kecukupan ventilasi terhadap bioefluen penghuni. Batas ini sejalan dengan temuan [3], [15], dan [16] yang menunjukkan penurunan kinerja kognitif dan kemampuan pengambilan keputusan mulai teramati pada konsentrasi CO_2 di atas 1.000 ppm untuk paparan jangka pendek. Berdasarkan acuan tersebut, konsentrasi di bawah 800 ppm dinyatakan sebagai ventilasi memadai, 800 sampai 1.000 ppm sebagai kondisi peralihan, dan di atas 1.000 ppm sebagai indikasi ventilasi kurang memadai.

2. Suhu

Suhu udara dalam ruang memengaruhi kenyamanan termal penghuni dan laju pertumbuhan mikroorganisme. Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 [17] menetapkan Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan suhu udara dalam ruang pada rentang 18°C sampai 30°C . Suhu di bawah 18°C tergolong terlalu rendah, sedangkan suhu di atas 30°C tergolong terlalu tinggi. [5] menunjukkan bahwa suhu bekerja bersama kelembapan relatif dalam menentukan risiko pertumbuhan jamur pada

permukaan bangunan, sehingga suhu perlu dipantau berdampingan dengan kelembapan. Pada penelitian ini, rentang 18°C sampai 30°C digunakan sebagai kategori sesuai rentang.

3. Kelembapan

Kelembapan relatif (relative humidity, RH) menyatakan persentase kandungan uap air di udara terhadap kapasitas maksimum pada suhu tertentu. Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 [17] menetapkan Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan kelembapan udara dalam ruang pada rentang 40% sampai 60% RH. Kelembapan di bawah 40% RH menyebabkan udara terlalu kering, sedangkan kelembapan di atas 60% RH meningkatkan risiko pertumbuhan jamur dan tungau. [5] memodelkan pertumbuhan jamur pada lingkungan hunian dan menyimpulkan bahwa kelembapan relatif yang tinggi, dikombinasikan dengan suhu yang sesuai, mempercepat pertumbuhan jamur. Pada penelitian ini, rentang 40% sampai 60% RH digunakan sebagai kategori sesuai rentang.

4. Partikulat PM2.5

PM2.5 memiliki acuan baku mutu paling jelas di antara keempat parameter. [7] pada pedoman kualitas udara global menetapkan nilai rata-rata 24 jam sebesar 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan nilai rata-rata tahunan sebesar 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 [17] menetapkan Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan PM2.5 udara dalam ruang sebesar 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata 24 jam. Perbedaan nilai tersebut berasal dari dasar penetapan yang berbeda, yaitu WHO menetapkan nilai berbasis risiko kesehatan minimal, sedangkan Permenkes menetapkan nilai baku mutu nasional. Ambang acuan konsentrasi PM2.5 disajikan pada Tabel 2.10.

Tabel 2- 10 Standar Kesehatan Konsentrasi PM2.5

Acuan	Parameter	Periode Rata-rata	Nilai Direkomendasikan
WHO Global Air Quality Guidelines 2021	PM2.5	24 jam	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO Global Air Quality Guidelines 2021	PM2.5	Tahunan	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, Tabel 13	PM2.5	24 jam	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Nilai WHO maupun Permenkes ditetapkan sebagai rata-rata 24 jam, sedangkan sistem pada penelitian ini melakukan pembacaan sesaat dengan interval sekitar 10 detik. Oleh karena itu, perbandingan konsentrasi sesaat terhadap ambang rata-rata 24 jam bersifat indikatif dan tidak menyatakan pelanggaran baku mutu secara langsung.