

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai dasar dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis melakukan studi literatur terhadap berbagai penelitian yang berkaitan dengan sensor-sensor kualitas udara. Beberapa penelitian yang relevan dijadikan sebagai bahan referensi dan pertimbangan dalam pengembangan sistem.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ega Julia Mentari dengan judul “Prototype Alat Pembersih Udara Dari Debu dan Asap Rokok di Ruangan Berbasis Logika Fuzzy Dengan Sistem Notifikasi Alarm”, sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 dengan dukungan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas, sensor debu GP2Y1010AU0F untuk mendeteksi partikulat, serta sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, di mana sistem ini dirancang untuk mendeteksi keberadaan asap rokok dan debu di dalam ruangan dan secara otomatis mengaktifkan proses penyaringan udara menggunakan exhaust fan berdasarkan aturan kontrol logika fuzzy, serta dilengkapi buzzer sebagai notifikasi alarm dan pengharum ruangan untuk meningkatkan kenyamanan setelah proses penyaringan selesai; hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi kondisi udara berdasarkan ambang batas tertentu seperti gas >150 ppm dan debu >200 ppm, serta memberikan respon otomatis berupa aktivasi kipas, buzzer, dan sistem penyaring udara, sekaligus menampilkan informasi kondisi udara melalui LCD secara real-time sesuai dengan rule logika fuzzy, sehingga alat ini berpotensi digunakan sebagai solusi efektif dalam menjaga kualitas udara di dalam ruangan [3].
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Rizky Faradi dkk. dengan judul “Pengukuran Kualitas Udara Menggunakan Sensor MQ-135 dan DHT11”, sistem yang dikembangkan berupa alat pengukuran kualitas udara dengan memanfaatkan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas polutan

seperti CO dan CO₂ serta sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembapan udara, di mana data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler Arduino dan ditampilkan melalui LCD secara langsung sebagai informasi kondisi udara di lingkungan sekitar. Sistem ini dirancang untuk memantau kualitas udara berdasarkan parameter konsentrasi gas (PPM), suhu, dan kelembapan, serta mengklasifikasikan kondisi udara ke dalam kategori tertentu seperti “Aman” dan “Berbahaya” untuk CO₂ serta beberapa kategori ISPU untuk CO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi tingkat pencemaran udara dan menampilkan data secara real time, sehingga dapat membantu masyarakat dalam mengetahui kondisi kualitas udara dan meningkatkan kesadaran terhadap dampak polusi terhadap Kesehatan. [4]

3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Veronika Asri T., Khoirul Warits, dan Muh. Nur Irfan dengan judul “Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT dengan Sensor MQ-135 dan DHT22”, sistem yang dikembangkan bertujuan untuk memantau kualitas udara secara real time menggunakan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas berbahaya dan DHT22 untuk mengukur suhu serta kelembapan. Data hasil pengukuran diproses dan dikirimkan melalui sistem IoT serta ditampilkan kepada pengguna melalui platform Telegram sebagai media notifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan informasi kondisi udara secara akurat serta notifikasi status kualitas udara (baik atau buruk), sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan lingkungan secara praktis dan efisien [5].

Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian-penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22 dengan mikrokontroler ESP32 belum banyak dikembangkan secara terintegrasi dalam satu perangkat portabel yang dilengkapi sistem peringatan dini secara lokal. Oleh karena itu, penelitian ini hadir sebagai pengembangan yang menggabungkan ketiga sensor tersebut dalam satu sistem portabel berbasis baterai

dengan indikator peringatan berupa buzzer dan LED WS2812, serta menampilkan data secara real-time melalui LCD 16×2.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kualitas Udara

Udara merupakan salah satu faktor penting dalam menunjang kehidupan. Namun, seiring dengan meningkatnya pembangunan perkotaan dan pertumbuhan sektor industri, kualitas udara mengalami penurunan. Aktivitas industri yang semakin berkembang serta meningkatnya jumlah kendaraan bermotor menjadi penyebab utama terjadinya pencemaran udara, sehingga kondisi udara menjadi kurang sehat bagi kehidupan. Pencemaran udara dapat diartikan sebagai menurunnya kualitas udara akibat masuknya zat pencemar, yang menyebabkan perubahan komposisi udara hingga tidak lagi sesuai dengan fungsinya sebagai udara yang layak untuk dihirup. [6]

Seiring dengan perkembangan zaman dan meningkatnya kebutuhan manusia, kualitas udara mengalami penurunan yang signifikan sehingga memicu terjadinya pencemaran udara. Sumber pencemaran umumnya berasal dari berbagai aktivitas manusia, seperti emisi hasil pembakaran sampah, transportasi, serta kegiatan industri yang menghasilkan zat berbahaya ke atmosfer. Udara tercemar didefinisikan sebagai udara yang mengandung zat, energi, atau komponen lain yang tidak diinginkan dan dapat mengganggu keseimbangan lingkungan. Kandungan gas di udara sangat beragam, di antaranya terdapat gas-gas yang berpotensi membahayakan kesehatan. Salah satu dampak kesehatan yang sering terjadi akibat pencemaran udara adalah gangguan pada sistem pernapasan, seperti infeksi saluran pernapasan. Apabila kualitas udara di suatu lingkungan berada dalam kondisi buruk, maka hal tersebut dapat menurunkan tingkat kesehatan dan kenyamanan lingkungan. Oleh karena itu, kualitas udara perlu memenuhi standar kesehatan tertentu, sehingga diperlukan upaya pengendalian dan penanggulangan untuk menjaga serta meningkatkan kualitas udara agar tetap stabil dan layak bagi kehidupan. [7]

2.2.2 Karbon Dioksida (CO₂)

Kualitas udara merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap kesehatan dan produktivitas manusia. Sebagian besar aktivitas manusia berlangsung di lingkungan tertutup sehingga paparan terhadap pencemar udara menjadi perhatian utama dalam kesehatan masyarakat. Tingkat pencemaran udara dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti sumber polutan, kondisi lingkungan, karakteristik bangunan, serta aktivitas manusia yang berlangsung di dalamnya. Dalam kondisi tertentu, konsentrasi polutan di lingkungan tertutup dapat lebih tinggi dibandingkan dengan udara luar.

Salah satu indikator utama dalam menilai kualitas udara adalah konsentrasi karbon dioksida (CO₂). Gas ini dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil dan aktivitas respirasi manusia. Peningkatan kadar CO₂ dapat menurunkan kualitas udara serta berkontribusi terhadap perubahan iklim dan efek rumah kaca. Selain CO₂, kualitas udara juga dipengaruhi oleh keberadaan polutan lain seperti Volatile Organic Compounds (VOCs), partikulat, aldehida, bakteri, dan jamur. Berbagai polutan tersebut umumnya berasal dari emisi kendaraan, penggunaan bahan kimia, material bangunan, serta aktivitas pembersihan.

Faktor lingkungan dan aktivitas manusia memiliki peranan besar dalam menentukan tingkat pencemaran udara. Lokasi yang berdekatan dengan sumber emisi, penggunaan material tertentu, serta kurangnya ventilasi dapat meningkatkan konsentrasi polutan di udara. Oleh karena itu, diperlukan upaya pemantauan dan pengelolaan kualitas udara secara berkelanjutan guna menciptakan lingkungan yang sehat, aman, dan nyaman bagi manusia.[8]

Dalam penelitian ini, sensor MQ-135 dimanfaatkan untuk mengestimasi konsentrasi CO₂ di udara berdasarkan kurva karakteristik sensor yang diperoleh dari datasheet. Proses konversi nilai resistansi sensor menjadi konsentrasi CO₂ dalam satuan PPM dilakukan menggunakan pendekatan regresi power dengan persamaan $PPM = a \times (Rs/Ro)^b$, di mana nilai koefisien a dan b diperoleh melalui digitisasi kurva karakteristik datasheet MQ-135 menggunakan aplikasi WebPlotDigitizer.

Berikut adalah klasifikasi konsentrasi CO₂ di udara beserta dampaknya

Tabel 2- 1 Keterangan Kategori Konsentrasi CO₂

Kategori (PPM)	Keterangan
0 – 50 PPM	Kadar normal di area terbuka
50 – 100 PPM	Umumnya ditemukan di ruangan dengan ventilasi yang baik
100 – 1000 PPM	Menunjukkan kualitas udara yang mulai menurun dan bisa menyebabkan rasa kantuk ringan.
1.000 – 2.000 PPM	Kualitas udara yang cukup buruk, memicu sakit kepala, rasa kantuk berat, serta suasana udara terasa pengap dan tidak nyaman; dapat juga menurunkan konsentrasi, meningkatnya detak jantung, serta menyebabkan mual ringan,
>3.000 PPM	Mencerminkan kondisi udara yang sangat buruk dan tidak normal. Paparan dalam kadar ini bisa menimbulkan efek toksik atau 14
>5.000 PPM	Kadar yang sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kekurangan oksigen secara serius.

2.2.3 Particulate Matter 2.5 (PM2.5)

Particulate Matter 2.5 (PM2.5) merupakan partikel halus yang tersuspensi di udara dengan diameter aerodinamis kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer (µm). Partikel ini berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun antropogenik, seperti proses pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor, kegiatan industri, pembakaran biomassa, serta reaksi kimia di atmosfer yang menghasilkan senyawa seperti sulfat, nitrat, amonia, logam berat, karbon, dan aerosol organik. Ukurannya yang sangat kecil menjadikan PM2.5 sebagai salah satu parameter kualitas udara yang paling berbahaya, karena partikel ini dapat menembus sistem pernapasan bagian atas dan masuk langsung ke dalam alveoli paru-paru[9].

Paparan PM2.5 secara terus-menerus dapat menyebabkan inflamasi, kerusakan jaringan paru, serta penurunan sistem imun sehingga meningkatkan risiko terjadinya berbagai penyakit pernapasan seperti pneumonia, asma, dan bronkitis

kronis [9]. Selain dampak pada sistem pernapasan, PM2.5 juga berpotensi masuk ke dalam aliran darah dan memicu gangguan kardiovaskular [10]. Oleh karena itu, pemantauan konsentrasi PM2.5 secara real-time menjadi langkah penting dalam upaya perlindungan kesehatan masyarakat dari dampak polusi udara.

Salah satu faktor risiko yang berkontribusi terhadap peningkatan kasus pneumonia adalah paparan polusi udara, terutama Particulate Matter (PM2.5). PM2.5 merupakan partikel halus yang berasal dari proses pembakaran dan campuran berbagai senyawa kimia seperti sulfat, nitrat, amonia, logam berat, karbon, serta aerosol organik. Ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel ini masuk hingga ke alveoli paru-paru dan memicu gangguan pada sistem pernapasan. Paparan PM2.5 secara terus-menerus dapat menyebabkan inflamasi, kerusakan jaringan paru, serta penurunan sistem imun sehingga meningkatkan risiko terjadinya infeksi pneumonia. [11]

Tabel 2- 2 Keterangan Konsentrasi PM 2.5 di udara

Konsentrasi PM2.5	Keterangan
0 – 15.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Baik
15.6 – 55.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sedang
55.5 – 150.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tidak sehat
150.5 – 250.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sangat Tidak Sehat
>250.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Berbahaya

2.2.4 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika, dan makhluk hidup lainnya [12]. ISPU ditetapkan melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 sebagai pengganti Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 45 Tahun 1997, dengan penambahan dua parameter baru yaitu PM2.5 dan Hidrokarbon (HC) [12]. Saat ini, perhitungan ISPU mencakup tujuh parameter pencemar udara, yaitu PM10, PM2.5, NO₂, SO₂, CO, O₃, dan HC [12].

Konversi konsentrasi PM2.5 (dalam $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ke nilai ISPU dilakukan menggunakan persamaan interpolasi linear sebagai berikut [12]:

$$I = ((I_a - I_b) / (X_a - X_b)) \times (X_x - X_b) + I_b$$

$$I = \frac{(I_a - I_b)}{(X_a - X_b)} (X_x - X_b) + I_b$$

- **I** = ISPU terhitung
- **I_a** = ISPU batas atas
- **I_b** = ISPU batas bawah
- **X_a** = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **X_b** = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **X_x** = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

di mana I adalah ISPU terhitung, I_a adalah ISPU batas atas, I_b adalah ISPU batas bawah, X_a adalah konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), X_b adalah konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dan X_x adalah konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [12].

Tabel 2- 3 Nilai ISPU

Nilai ISPU	Kategori	Rentang PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0 – 50	Baik	0 – 15,5
51 – 100	Sedang	15,6 – 55,4
101 – 200	Tidak Sehat	55,5 – 150,4
201 – 300	Sangat Tidak Sehat	150,5 – 250,4
301 – 500	Berbahaya	> 250,4

Dalam penelitian ini, nilai ISPU PM2.5 dihitung secara real-time oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan data konsentrasi PM2.5 yang diperoleh dari sensor PMS5003, kemudian ditampilkan pada LCD 16×2 sebagai informasi kualitas udara yang mudah dipahami oleh pengguna,

2.2.5 Suhu dan Kelembapan

Temperatur suhu yang terlalu rendah dapat merugikan manusia, sehingga manusia mengalami gangguan kesehatan seperti hypotermia, dan sebaliknya apa bila cuaca 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. [13]

Kelembapan udara adalah banyaknya kandungan uap air di udara (atmosfer). Udara atmosfer adalah campuran dari udara kering dan uap air. Kelembapan udara ditentukan oleh banyaknya uap air dalam udara. Kalau tekanan uap air dalam udara mencapai maksimum . maka mulailah terjadi pengembunan. Temperature dimana terjadi pengembunan disebut titik embun. Tingkat kelembapan bervariasi menurut suhu. Semakin hangat suhu udara, semakin banyak uap air yang dapat ditampung. Semakin rendah suhu udara, semakin sedikit jumlah uap air yang dapat ditampung. Jadi pada siang hari yang panas dapat menjadi lebih lembab dibandingkan dengan hari yang dingin. Kemampuan udara untuk menampung uap air dipengaruhi oleh suhu. Jika udara jenuh uap air dinaikkan suhunya, maka udara tersebut menjadi tidak jenuh uap air. Sebaliknya, jika udara tidak jenuh uap air suhunya diturunkan dan kerapatan airnya dijaga konstan, maka udara tersebut akan mendekati kondisi jenuh uap air. Jadi ketika udara hangat naik dan mulai mendingin, lama kelamaan akan kehilangan kemampuan untuk menahan /menampung uap air. [6]

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%, Sebaliknya, apabila konsentrasi kelembapan melebihi 60%, kondisi tersebut dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri yang berpotensi membahayakan kesehatan penghuni ruangan. Dalam penelitian ini, sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara real-time sebagai data pendukung dalam proses koreksi pembacaan sensor MQ-135 terhadap pengaruh suhu dan kelembapan lingkungan.

2.2.6 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis System on Chip (SoC) yang mengintegrasikan kemampuan komunikasi nirkabel berupa Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth versi 4.2 dalam satu chip. Perangkat ini dilengkapi dengan prosesor berperforma tinggi, memori internal, serta antarmuka General Purpose Input Output (GPIO) yang mendukung berbagai kebutuhan pengembangan sistem tertanam (embedded system). Integrasi fitur komunikasi dan pemrosesan data tersebut menjadikan ESP32 banyak digunakan pada implementasi sistem Internet of Things (IoT), khususnya pada aplikasi pemantauan dan pengendalian secara real-time. Selain itu, ESP32 mampu mendukung konektivitas jaringan Wi-Fi secara langsung tanpa memerlukan modul tambahan, sehingga desain perangkat menjadi lebih ringkas, efisien, dan hemat daya. [14]

Board ESP32 tersedia dalam beberapa varian konfigurasi GPIO, di antaranya versi 30 GPIO dan 36 GPIO yang memiliki fungsi operasional serupa. Pada penelitian ini digunakan varian 30 GPIO karena memiliki tambahan dua pin Ground (GND) yang mempermudah proses integrasi perangkat keras. Seluruh pin pada board telah dilengkapi label identifikasi sehingga memudahkan proses perancangan dan pengkabelan sistem. Selain itu, board ESP32 telah dilengkapi antarmuka USB to UART yang mendukung proses pemrograman menggunakan perangkat lunak pengembangan seperti Arduino IDE. Sumber daya pada board dapat diberikan melalui konektor USB Type-C yang mendukung kemudahan penggunaan serta kompatibilitas dengan berbagai perangkat catu daya modern.[14]

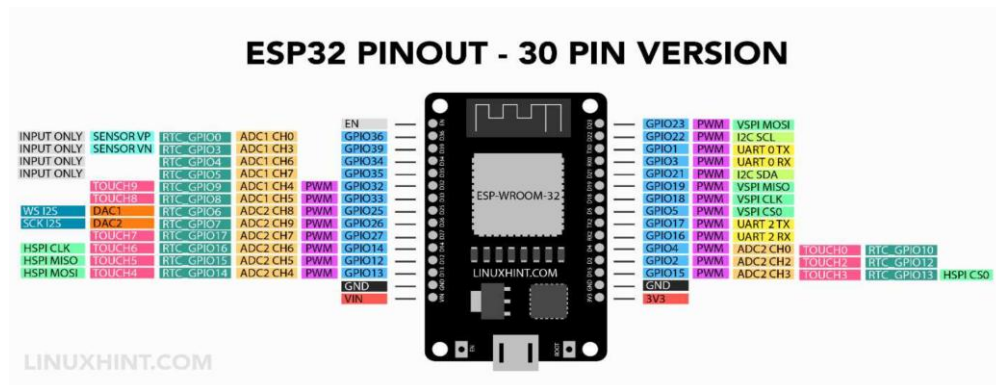
Dalam implementasinya, ESP32 sering digunakan sebagai pusat kendali dalam sistem berbasis sensor. Pada sistem pemantauan kualitas udara, ESP32 dapat mengolah data dari sensor gas seperti MQ-135, sensor partikulat seperti PMS5003, serta sensor suhu dan kelembapan seperti DHT22. Data yang diperoleh kemudian diproses untuk menentukan kondisi lingkungan dan dapat digunakan untuk memberikan peringatan dini kepada pengguna melalui indikator visual maupun audio. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali yang membaca data dari sensor MQ-135 melalui pin ADC (GPIO 32), sensor PMS5003 melalui komunikasi UART (GPIO 16 dan 17), sensor DHT22 melalui pin digital (GPIO 4),

serta mengendalikan LCD 16×2 I2C (GPIO 21 dan 22), LED WS2812 (GPIO 25), dan buzzer (GPIO 19) sebagai output sistem peringatan dini. Sebagai mikrokontroler yang memiliki fitur lengkap dan performa tinggi, ESP32 menjadi salah satu pilihan utama di kalangan pengembang Internet of Things (IoT). Popularitasnya didukung oleh berbagai keunggulan yang mampu memenuhi kebutuhan sistem modern yang efisien dan fleksibel. Beberapa kelebihan utama dari ESP32 antara lain sebagai berikut:

1. ESP32 menggunakan prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz, sehingga mampu memberikan kinerja yang optimal untuk menjalankan berbagai aplikasi secara simultan.
2. Perangkat ini dilengkapi dengan memori RAM sebesar 520 KB serta memori flash hingga 4 MB, yang memungkinkan pengolahan program dengan tingkat kompleksitas yang cukup tinggi.
3. ESP32 mendukung konektivitas nirkabel berupa Wi-Fi standar 802.11 b/g/n dan Bluetooth Low Energy (BLE), sehingga memungkinkan komunikasi data yang stabil, cepat, dan efisien.
4. Modul ini telah dilengkapi dengan antena Wi-Fi internal, serta mendukung penggunaan antena eksternal untuk meningkatkan kualitas sinyal, khususnya pada komunikasi Bluetooth.
5. Dari sisi pemrograman, ESP32 dapat dikembangkan menggunakan Arduino IDE maupun ESP-IDF yang merupakan framework resmi dari Espressif Systems, sehingga memberikan fleksibilitas bagi pengembang.
6. ESP32 menyediakan banyak pin General Purpose Input Output (GPIO) yang mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, dan UART, sehingga memudahkan integrasi dengan berbagai perangkat elektronik.
7. Selain itu, ESP32 juga memiliki fitur hemat energi berupa mode deep sleep yang sangat berguna untuk aplikasi yang membutuhkan konsumsi daya rendah, terutama pada perangkat berbasis baterai.

Dengan berbagai keunggulan yang dimilikinya, ESP32 sangat tepat dimanfaatkan sebagai pusat pengendali dalam beragam sistem berbasis Internet of

Things (IoT). Kemampuannya dalam mengolah data, didukung dengan konektivitas nirkabel yang andal, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi seperti sistem otomasi rumah pintar, pemantauan lingkungan berbasis sensor, hingga pengembangan teknologi di bidang robotika.



Gambar 2. 1 Board ESP32

ESP32 memiliki beragam pin yang dirancang untuk mendukung berbagai kebutuhan dalam sistem elektronika maupun aplikasi Internet of Things (IoT). Setiap pin memiliki fungsi tertentu yang memungkinkan integrasi dengan berbagai perangkat seperti sensor, aktuator, dan modul komunikasi. Berikut ini adalah penjelasan mengenai susunan pin pada ESP32 :

1. Pin 3V3 – Menyediakan tegangan sebesar 3.3V yang dapat digunakan untuk memberi daya pada sensor atau perangkat eksternal yang membutuhkan tegangan rendah.
2. Pin GND – Berfungsi sebagai ground atau titik referensi tegangan dalam suatu rangkaian elektronika.
3. Pin EN (Enable) – Digunakan untuk mengaktifkan modul ESP32. Jika pin ini diberi logika LOW, maka sistem akan melakukan reset.
4. Pin BOOT – Digunakan untuk menentukan mode booting. Biasanya dihubungkan ke GND saat proses upload program berlangsung.
5. Pin GPIO0 – Merupakan pin input/output digital yang juga berperan dalam pemilihan mode boot.

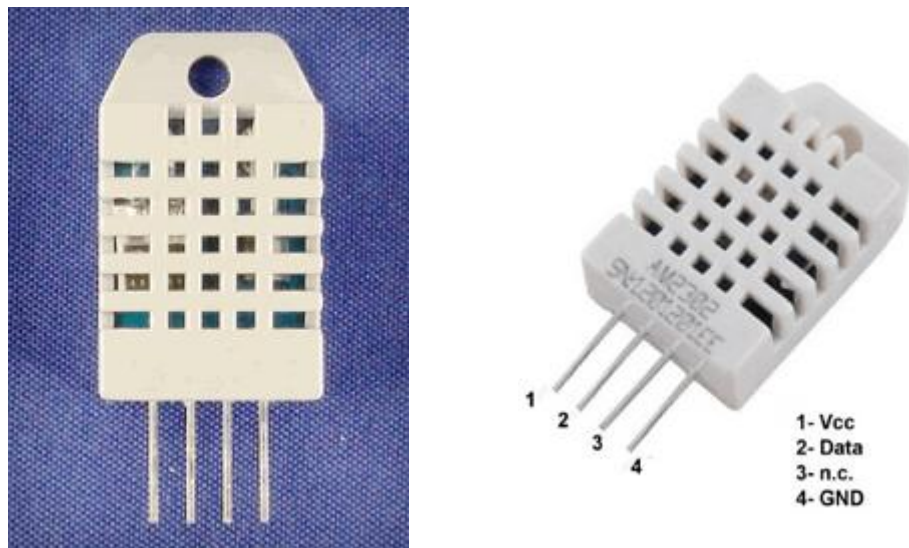
6. Pin GPIO1 hingga GPIO39 – Merupakan pin digital multifungsi yang dapat digunakan sebagai input maupun output untuk berbagai keperluan seperti membaca sensor, mengontrol perangkat, dan komunikasi antar modul.
7. Pin ADC – Digunakan sebagai input analog untuk membaca sinyal analog dari sensor seperti suhu, gas, atau potensiometer.
8. Pin AREF – Berfungsi sebagai referensi tegangan eksternal untuk meningkatkan akurasi pembacaan sinyal analog.
9. Pin TX0 dan RX0 – Digunakan sebagai jalur komunikasi serial UART utama untuk proses pengiriman (TX) dan penerimaan (RX) data, umumnya terhubung ke komputer.
10. Pin TX2 dan RX2 – Merupakan jalur komunikasi UART tambahan yang digunakan jika dibutuhkan lebih dari satu komunikasi serial.
11. Pin SDA dan SCL – Digunakan untuk komunikasi I2C, biasanya untuk menghubungkan sensor digital atau modul display seperti OLED.
12. Pin SCK, MISO, dan MOSI – Digunakan dalam komunikasi SPI untuk menghubungkan ESP32 dengan perangkat eksternal seperti modul SD card atau sensor berbasis SPI.
13. Pin SCK, SD0, CMD, dan D0–D4 – Merupakan pin khusus untuk komunikasi SDIO yang digunakan pada perangkat penyimpanan seperti kartu SD.
14. Pin DAC1 dan DAC2 – Digunakan sebagai output analog yang mampu mengubah sinyal digital menjadi sinyal analog.
15. Pin VP dan VN – Digunakan sebagai input analog tambahan untuk keperluan pengukuran tegangan.
16. Pin GPIO34 hingga GPIO39 – Merupakan pin input-only (hanya sebagai input) yang dilengkapi dengan fitur internal seperti pull-up dan pull-down untuk menjaga kestabilan sinyal.

2.2.7 DHT 22

DHT22 merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara pada suatu lingkungan, seperti ruangan tertutup atau kubikel. Sensor ini sering dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang lebih baik

dibandingkan dengan DHT11, sehingga mampu memberikan hasil pengukuran yang lebih stabil dan presisi. DHT22 memiliki tingkat kesalahan (error) pengukuran suhu sekitar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dengan kelembapan relatif sekitar $\pm 2-5\%$, sehingga lebih andal dalam aplikasi monitoring lingkungan.

DHT22, yang juga dikenal dengan nama AM2302, mampu mengukur suhu dan kelembapan secara digital dengan resolusi yang lebih tinggi dibandingkan pendahulunya. Sensor ini bekerja dengan prinsip penginderaan kapasitif untuk kelembapan dan termistor untuk suhu, kemudian mengirimkan data dalam bentuk sinyal digital ke mikrokontroler seperti ESP32. Keunggulan utama DHT22 dibandingkan DHT11 terletak pada rentang pengukuran yang lebih luas serta tingkat akurasi yang lebih tinggi, sehingga sangat cocok digunakan pada aplikasi yang membutuhkan data lingkungan yang lebih akurat, seperti sistem pemantauan kualitas udara di dalam ruangan.[5]



Gambar 2. 2 Sensor DHT22

Tabel 2- 4 Keterangan Pin DHT22

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Vcc	Pin ini berfungsi sebagai sumber tegangan untuk mengoperasikan sensor.

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
2	Data	Pin DATA digunakan sebagai jalur komunikasi digital antara sensor dan mikrokontroler. Melalui pin ini, data hasil pengukuran suhu dan kelembapan dikirimkan dalam bentuk sinyal digital yang telah diproses oleh sensor.
3	NULL	pin ini tidak digunakan dan tidak perlu dihubungkan ke rangkaian apa pun.
4	GND	Keberadaan pin ini sangat penting untuk menjaga kestabilan sistem serta memastikan sensor dapat bekerja secara optimal dan aman.

Tabel 2- 5 Spesifikasi DHT22

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Sumber Tegangan	Sumber Tegangan 3,3 – 6 Volt DC
2	Konsumsi Arus	Konsumsi Arus 1 – 1,5 mA
3	Rentang operasi kelembapan dan suhu	0 – 100% RH dan -40°C ~ +80°C
4	Sinyal keluaran	Digital
5	Sensing period	2 detik
6	Akurasi	H= +-2% RH(Max +-5%RH); T = <+-0,5°C

DHT22 bekerja dengan cara mengukur suhu dan kelembapan udara di lingkungan sekitarnya, kemudian mengolah hasil pengukuran tersebut menjadi data digital. Sensor ini menggunakan elemen kapasitif untuk mendeteksi kelembapan dan thermistor untuk mengukur suhu. Data yang diperoleh selanjutnya dikirimkan ke mikrokontroler seperti ESP32 melalui satu pin digital menggunakan protocol komunikasi single-wire.

Pada implementasinya dalam pemrograman, pembacaan data dari DHT22 dilakukan dengan memanfaatkan library khusus DHT. Baris program yang digunakan umumnya berfungsi untuk memanggil library tersebut, sehingga

mikrokontroler dapat membaca nilai suhu dan kelembapan secara digital tanpa harus mengatur timing komunikasi secara manual. Dengan penggunaan library ini, proses akuisisi data menjadi lebih sederhana, akurat, dan efisien dalam sistem berbasis IoT.

2.2.8 PMS5003

Sensor PMS5003 merupakan sensor partikulat (*Particulate Matter Sensor*) berbasis teknologi hamburan cahaya laser (*laser scattering*) yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi partikel debu di udara secara real-time. Prinsip kerjanya dilakukan dengan memancarkan sinar laser ke dalam ruang deteksi, kemudian partikel yang melewati jalur cahaya akan menghamburkan sinar tersebut dan diterima oleh fotodioda. Sinyal hasil hamburan selanjutnya diproses oleh sistem internal sensor untuk menghitung konsentrasi partikel berdasarkan ukuran tertentu. Sensor PMS5003 mampu mengukur konsentrasi partikel PM1.0, PM2.5, dan PM10 dalam satuan mikrogram per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), sehingga banyak digunakan pada sistem pemantauan kualitas udara dan aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan pengukuran partikel secara kontinu dan akurat.[15].

PMS5003 mengintegrasikan sumber cahaya laser, ruang pengukuran optik, kipas internal, serta rangkaian pemrosesan sinyal dalam satu modul yang ringkas. Kipas internal berfungsi mengalirkan udara ke dalam ruang deteksi sehingga partikel yang terdapat di lingkungan sekitar dapat diukur secara berkelanjutan. Sensor ini bekerja menggunakan metode hamburan cahaya (*light scattering*) dengan laser berpanjang gelombang sekitar 680 nm dan menyediakan keluaran data digital melalui antarmuka komunikasi UART. Dengan keluaran digital tersebut, PMS5003 dapat dihubungkan secara langsung dengan mikrokontroler seperti ESP32 tanpa memerlukan rangkaian pengolah sinyal tambahan sehingga memudahkan implementasi pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT [16].

Selain memiliki ukuran yang relatif kecil dan konsumsi daya yang rendah, PMS5003 termasuk dalam kategori sensor partikulat berbiaya rendah (*low-cost particulate matter sensor*) yang memiliki performa pengukuran cukup baik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sensor ini memiliki korelasi yang tinggi

terhadap instrumen referensi dalam pengukuran konsentrasi PM_{2.5} sehingga banyak dimanfaatkan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor cerdas. Meskipun demikian, hasil pengukuran PMS5003 dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembapan udara, ukuran partikel, dan karakteristik aerosol yang terukur sehingga kalibrasi diperlukan untuk meningkatkan akurasi pengukuran [17].



Gambar 2. 3 PMS5003

Tabel 2- 6 Keterangan Pin PMS5003

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	VCC	Sebagai sumber tegangan untuk mengoperasikan sensor PMS5003 dengan tegangan kerja 5 V DC.
2	GND	Sebagai referensi tegangan dan jalur pengembalian arus pada sistem.
3	SET	Digunakan untuk mengatur mode kerja sensor. Logika HIGH membuat sensor aktif, sedangkan logika LOW mengaktifkan mode tidur (<i>sleep mode</i>).
4	RX	Menerima data atau perintah dari mikrokontroler melalui komunikasi UART
5	TX	Mengirimkan data hasil pengukuran PM _{1.0} , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ ke mikrokontroler melalui komunikasi UART.

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
6	RESET	Digunakan untuk melakukan reset atau menginisialisasi ulang sensor.

Tabel 2- 7 Spesifikasi PMS5003

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tipe Sensor	Laser Scattering Particulate Matter Sensor
2	Tegangan Operasi	5 V DC
3	Arus Operasi	≤ 100 mA
4	Parameter Terukur	PM1.0 dan PM2.5
5	Ukuran Partikel Minimum	0,3 μm
6	Rentang Pengukuran	0 – 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
7	Resolusi Pengukuran	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
8	Antarmuka Komunikasi	UART (TTL Serial)
9	Baud Rate	9600 bps
10	Dimensi	50 × 38 × 21 mm

2.2.9 MQ-135

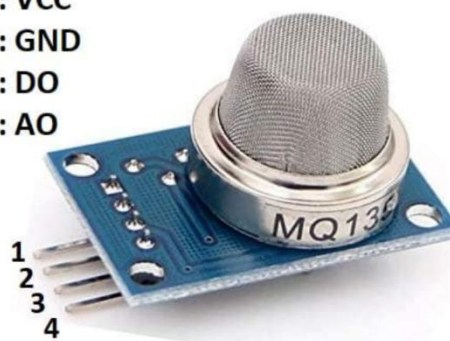
Sensor MQ-135 merupakan sensor kualitas udara yang digunakan untuk mendeteksi berbagai jenis gas dan senyawa kimia di atmosfer, seperti Oksigen (O_2), Amonia (NH_3), Nitrogen Oksida (Nox), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), Benzena (C_6H_6), Karbon Dioksida (CO_2), serta Hidrogen Sulfida (H_2S). Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan nilai resistansi internal ketika terpapar konsentrasi gas tertentu di lingkungan sekitar. Perubahan resistansi tersebut menghasilkan keluaran berupa sinyal analog yang merepresentasikan tingkat kualitas udara dan dapat diproses lebih lanjut oleh mikrokontroler melalui pin input analog atau menggunakan *analog-to-digital converter* (ADC). MQ-135 memiliki sensitivitas yang cukup baik terhadap berbagai polutan udara sehingga banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara, pendeteksi pencemaran lingkungan, serta perangkat peringatan dini berbasis mikrokontroler.[18]

Sensor MQ-135 memiliki rentang pengukuran sekitar 10–1000 ppm, meskipun nilai pastinya dapat berbeda tergantung jenis gas yang dideteksi. Agar dapat bekerja secara optimal, sensor ini membutuhkan suplai tegangan sebesar 5V DC serta menggunakan resistor beban (load resistance) sekitar 1 k Ω . Waktu respons sensor berada pada kisaran 10–30 detik, namun untuk memperoleh hasil pengukuran yang stabil diperlukan proses pemanasan awal (preheat) selama 24–48 jam. Selain itu, sensor ini mampu beroperasi pada rentang suhu antara –10°C hingga 50°C dengan tingkat kelembapan mencapai 95% RH.[19]

Keluaran dari sensor MQ-135 berupa sinyal analog yang dapat langsung dihubungkan ke pin ADC pada mikrokontroler, misalnya GPIO 34 pada ESP32, untuk kemudian dikonversi menjadi data digital. Sensor ini mampu memberikan tingkat akurasi pengukuran kurang dari 12% digunakan pada kondisi lingkungan dalam ruangan yang standar.

MQ-135 Pinout

Pin1: VCC
Pin2: GND
Pin3: DO
Pin4: AO



Gambar 2. 4 Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 memiliki 4 pin, namun hanya 3 pin utama yang umum digunakan dalam sistem mikrokontroler, yaitu:

Tabel 2- 8 Keterangan Pin MQ-135

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	VCC	Digunakan untuk memberi daya pada sensor, Secara umum, tegangan operasi adalah +5V.

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
2	GND	Digunakan untuk menghubungkan modul ke ground sistem.
3	AO (Analog Output)	output analog yang dikirim ke ADC mikrokontroler

Tabel 2- 9 Spesifikasi MQ-135

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tegangan Operasi	5 Volt AC/DC
2	Heating voltage	5 Volt AC/DC
3	Target Gas Karbon	Karbon Dioksida (CO ₂), Amonia (NH ₃), Nitrogen Oksida (Nox), Alkohol, Benzene, Smoke
4	Sinyal keluaran	Analog
5	Heater resistance	33Ω ±5%
6	Standard Detecting	Temp: 20°C ± 2°C Vc: 5V ± 0.1 Humidity: 65 % ± 5% Vh: Condition 5V ± 0.1

Dalam proses kalibrasi sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas karbon dioksida (CO₂), kurva karakteristik sensor yang tercantum dalam datasheet memainkan peran yang sangat krusial. Kurva ini menunjukkan hubungan antara rasio resistansi sensor (R_s/R_o) dan konsentrasi gas dalam satuan PPM (parts per million) yang disajikan dalam skala logaritmik. Rasio R_s/R_o diperoleh dari perbandingan resistansi sensor saat terpapar gas (R_s) dengan resistansi referensi pada udara bersih (R_o). Nilai R_o merupakan resistansi sensor pada kondisi udara bersih yang diperoleh melalui proses pemanasan sensor selama 24–48 jam di lingkungan udara bersih hingga nilai R_s stabil. Setelah nilai R_s stabil, R_o dihitung menggunakan persamaan:

$$R_o = R_s \div 3,6$$

di mana angka 3,6 merupakan nilai R_s/R_o di udara bersih berdasarkan datasheet MQ-135. Nilai R_o ini bersifat spesifik untuk setiap unit sensor sehingga wajib dikalibrasi ulang pada masing-masing unit yang digunakan.

Untuk mengonversi nilai R_s/R_o menjadi estimasi konsentrasi CO_2 dalam PPM, digunakan pendekatan regresi power (power regression) dengan persamaan:

$$PPM = a \times (R_s/R_o)^b$$

di mana a adalah konstanta regresi (faktor skala) dan b adalah eksponen yang menunjukkan sensitivitas perubahan konsentrasi gas terhadap perubahan rasio resistansi sensor. Nilai a dan b diperoleh melalui digitisasi titik-titik koordinat pada kurva CO_2 di datasheet MQ-135 menggunakan aplikasi WebPlotDigitizer, kemudian diolah menggunakan kalkulator regresi power. Hasil digitisasi kurva CO_2 ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2- 10 Titik potong Karbon Dioksida berdasarkan Datasheet MQ135

x (PPM CO_2)	y (R_s/R_o)
10	2.2801
20.1356	1.7926
30.2117	1.5664
39.7300	1.4177
49.9157	1.3136
59.9146	1.2460
69.7609	1.1889
79.9988	1.1211
90.3539	1.0760
101.5331	1.0511
199.3239	0.8025

Berdasarkan seluruh titik potong pada tabel di atas, nilai koefisien regresi yang diperoleh adalah $a = 116,6020682$ dan $b = -2,769034857$. Nilai ini digunakan dalam program kalibrasi sensor MQ-135 untuk mengestimasi konsentrasi karbon dioksida (CO_2) secara real-time.

Selain kurva CO₂, datasheet MQ-135 juga menyertakan grafik Fig. 4 yang menunjukkan pengaruh suhu dan kelembapan terhadap rasio resistansi sensor (R_s/R_o). Mengingat kondisi suhu dan kelembapan di Indonesia berbeda dari kondisi referensi datasheet (20°C, 33%RH), maka diperlukan koreksi terhadap nilai R_s sebelum dikonversi ke PPM. Koreksi dilakukan menggunakan faktor koreksi yang diperoleh melalui digitisasi kurva Fig. 4 pada dua kondisi kelembapan, yaitu 33%RH dan 85%RH, sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2- 11 Titik potong pada Kelembapan 33%RH

x (Suhu °C)	y (R_s/R_o)
-10.04	1.7042
-6.61	1.6028
-0.56	1.3944
0.03	1.3775
4.89	1.2479
7.26	1.1915
10.10	1.1296
20.06	0.9944
30.01	0.9493
39.97	0.9324
50.04	0.9099

Tabel 2- 12 Titik potong pada Kelembapan 85%RH

x (Suhu °C)	y (R_s/R_o)
-10.04	1.5408
-5.30	1.4000
0.03	1.2479

2.16	1.1972
4.89	1.1296
9.99	1.0282
12.00	0.9944
20.18	0.9155
30.13	0.8704
39.97	0.8366
50.04	0.8141

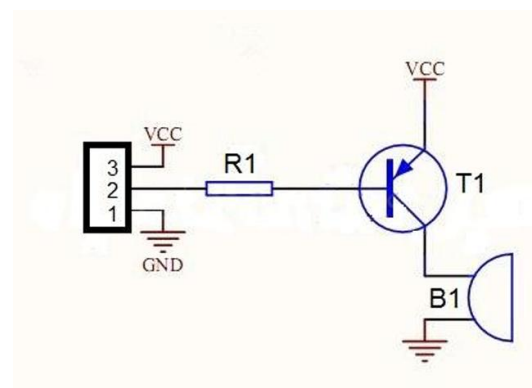
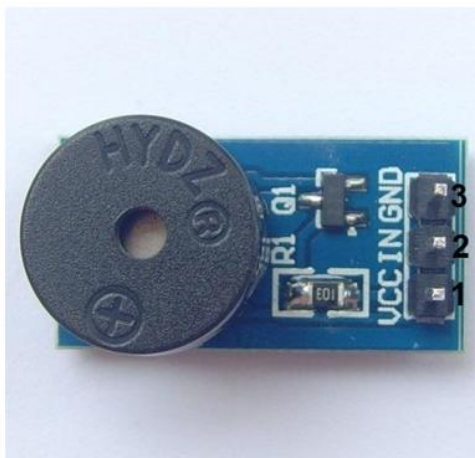
Faktor koreksi dihitung sebagai perbandingan nilai R_s/R_o pada kondisi suhu dan kelembapan aktual terhadap nilai R_s/R_o pada kondisi referensi datasheet (20°C, 33%RH). Nilai R_s yang telah dikoreksi selanjutnya digunakan untuk menghitung estimasi konsentrasi CO₂ menggunakan persamaan regresi power di atas, sehingga hasil pengukuran lebih representatif terhadap kondisi lingkungan pengujian yang sesungguhnya.

2.2.10 BUZZER

Buzzer merupakan komponen elektronika yang berfungsi sebagai perangkat keluaran audio untuk menghasilkan getaran suara berupa gelombang bunyi. Buzzer bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi suara ketika diberikan tegangan sesuai dengan spesifikasi kerja komponen tersebut. Setiap buzzer memerlukan masukan berupa tegangan listrik yang kemudian dikonversi menjadi getaran mekanik sehingga menghasilkan frekuensi suara tertentu, umumnya berada pada kisaran 1–5 kHz. Komponen ini banyak digunakan sebagai indikator peringatan, alarm, maupun notifikasi pada sistem elektronika karena memiliki respons yang cepat, konsumsi daya yang relatif rendah, serta mampu menghasilkan sinyal suara yang mudah dikenali oleh pengguna.[20]

Buzzer bekerja berdasarkan prinsip osilasi atau getaran yang terjadi akibat pemberian sinyal listrik pada komponen. Pada buzzer jenis piezoelektrik, suara dihasilkan melalui perubahan bentuk material piezoelektrik ketika dialiri tegangan listrik, sedangkan pada buzzer elektromagnetik getaran dihasilkan oleh gaya tarik medan magnet dari kumparan terhadap membran. Getaran tersebut kemudian

menghasilkan gelombang suara yang dapat digunakan sebagai indikator, alarm, maupun notifikasi terhadap kondisi tertentu pada suatu sistem elektronika. Buzzer umumnya menghasilkan frekuensi suara pada kisaran 1–5 kHz sehingga suara yang dihasilkan cukup jelas dan mudah dikenali oleh pengguna. Selain memiliki respons yang cepat, komponen ini juga banyak digunakan pada sistem monitoring dan peringatan dini karena konsumsi dayanya relatif rendah serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler.



Gambar 2. 5 Buzzer

Tabel 2- 13 Keterangan Pin Buzzer

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	VCC	Digunakan untuk memberi daya pada sensor, Secara umum, tegangan operasi adalah 5V.
2	Input	Pin ini merupakan pin kontrol yang digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan buzzer.
3	GND	Pin ini dihubungkan ke ground sistem sebagai referensi tegangan agar rangkaian dapat bekerja dengan baik dan stabil.

Tabel 2- 14 Spesifikasi Buzzer

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Jenis	Active Buzzer

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
2	Tegangan kerja	3,3 V – 5 V DC
3	Arus operasi	$\pm 20\text{--}30\text{ mA}$
4	Frekuensi suara	$\pm 2\text{ kHz} - 4\text{ kHz}$
5	Intesitas suara	$\pm 85\text{ dB}$
6	Jumlah	2 atau 3 pin
7	Fungsi	Sebagai indikator alarm suara

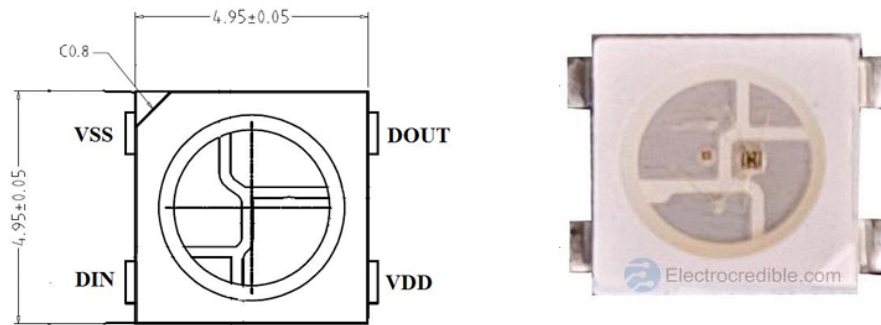
2.2.11 LED WS2812

WS2812B merupakan jenis LED pintar (smart LED) yang telah mengintegrasikan rangkaian kontrol dan chip RGB dalam satu kemasan berukuran 5050, sehingga lebih praktis dalam implementasi sistem pencahayaan digital. Di dalam komponen ini terdapat fitur pengunci data digital serta rangkaian penguat sinyal yang berfungsi untuk menjaga kestabilan dan keakuratan transmisi data antar piksel. Selain itu, WS2812B dilengkapi dengan osilator internal berpresisi tinggi dan sistem pengaturan arus konstan berbasis tegangan, yang memungkinkan setiap LED menghasilkan warna dengan tingkat konsistensi yang baik.

Proses komunikasi data pada WS2812B menggunakan metode single-wire dengan protokol Non-Return-to-Zero (NZR). Data dikirimkan melalui pin DIN dari mikrokontroler, kemudian piksel pertama akan membaca 24-bit data dan menyimpannya sebelum meneruskan sisa data ke piksel berikutnya melalui pin DO. Setiap piksel memiliki kemampuan untuk melakukan pembentukan ulang sinyal secara otomatis, sehingga kualitas data tetap terjaga meskipun digunakan dalam konfigurasi kaskade yang panjang. Dengan mekanisme ini, jumlah LED yang dapat dirangkai tidak dibatasi secara langsung, melainkan bergantung pada kemampuan kecepatan transmisi data dari sistem pengendali.

Dari sisi performa, WS2812B memiliki keunggulan berupa konsumsi daya yang relatif rendah, tingkat kecerahan yang tinggi, serta sudut pancaran cahaya yang luas. Selain itu, komponen ini juga ramah lingkungan, memiliki umur pakai yang panjang, dan memberikan keseragaman warna yang baik pada setiap piksel. Integrasi sistem kontrol dalam satu modul menjadikan WS2812B lebih sederhana

dalam perancangan, berukuran kompak, serta mudah dalam proses instalasi, sehingga sangat sesuai digunakan pada berbagai aplikasi berbasis mikrokontroler. [21].



Gambar 2. 6 LED WS2812B

Tabel 2- 15 Keterangan Pin LED WS281

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	VDD	Pin ini berfungsi sebagai sumber tegangan untuk mengoperasikan LED agar dapat menyala dan bekerja sesuai dengan fungsinya.
2	DOUT	Pin ini berfungsi untuk mengirimkan data kontrol yang telah diproses ke LED.
3	VSS	Pin ini berfungsi sebagai ground atau titik referensi nol volt yang digunakan untuk melengkapi rangkaian listrik dan menjaga kestabilan sistem.
4	DIN	Pin ini berfungsi sebagai jalur masuk data kontrol dari mikrokontroler yang digunakan untuk mengatur warna dan kecerahan LED.

Tabel 2- 16 Spesifikasi LED WS2812

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tipe	RGB Addressable LED
2	IC Driver	Terintegrasi pada LED
3	Tegangan Kerja	5 V DC

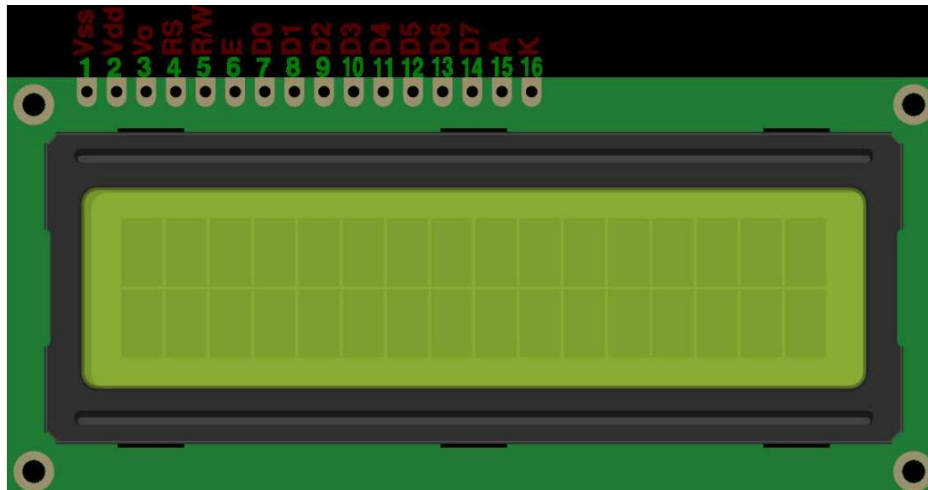
PIN	KETERANGAN	FUNGSI
4	Arus Maksimum	60 mA per LED (RGB penuh)
5	Warna	Merah, Hijau, Biru (RGB
6	Jumlah Data Pin	1 pin data
7	Protokol Komunikasi	Single-wire serial
8	Fungsi	Indikator visual status sistem

2.2.12 LCD 16X2 I2C

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat elektronik yang berfungsi sebagai media antarmuka visual untuk menampilkan informasi keluaran (*output*) suatu sistem dalam bentuk karakter, angka, simbol, maupun grafik. Teknologi LCD bekerja berdasarkan prinsip pengaturan orientasi kristal cair (*liquid crystal*) yang ditempatkan di antara dua lapisan elektroda transparan dan dua filter polarisasi, sehingga mampu menghasilkan tampilan visual pada layar. Karena memiliki kebutuhan daya yang relatif rendah dan konsumsi arus yang kecil, LCD banyak diaplikasikan pada berbagai perangkat elektronik, seperti kalkulator, jam digital, instrumen pengukuran digital, serta sistem berbasis mikrokontroler.

Dalam penelitian ini digunakan LCD 16×2, yaitu modul tampilan berbasis sistem *dot matrix* yang mampu menampilkan hingga 32 karakter yang tersusun dalam 2 baris, dengan masing-masing baris terdiri atas 16 karakter. LCD 16×2 berperan sebagai media penyampaian informasi kepada pengguna secara langsung (*real-time*), sehingga memudahkan proses pemantauan parameter yang diukur oleh sistem. Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pin mikrokontroler, modul LCD dilengkapi dengan antarmuka Inter-Integrated Circuit (I²C) yang memungkinkan komunikasi data melalui dua jalur utama, yaitu *Serial Data Line* (SDA) dan *Serial Clock Line* (SCL). Penggunaan modul I²C pada LCD 16×2 tidak hanya menyederhanakan proses integrasi perangkat keras, tetapi juga mengurangi jumlah pin yang digunakan pada mikrokontroler, sehingga memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam perancangan sistem elektronika berbasis mikrokontroler. Selain itu, LCD 16×2 menawarkan keunggulan berupa konsumsi daya yang rendah, kemudahan implementasi, serta kemampuan menampilkan informasi secara jelas

dan mudah dibaca oleh pengguna. Karakteristik tersebut menjadikan LCD 16×2 sebagai salah satu komponen yang banyak digunakan dalam aplikasi sistem monitoring, instrumentasi, dan otomasi berbasis mikrokontroler[22].



Gambar 2. 7 LCD I2C

Tabel 2- 17 Keterangan Pin LCD I2C

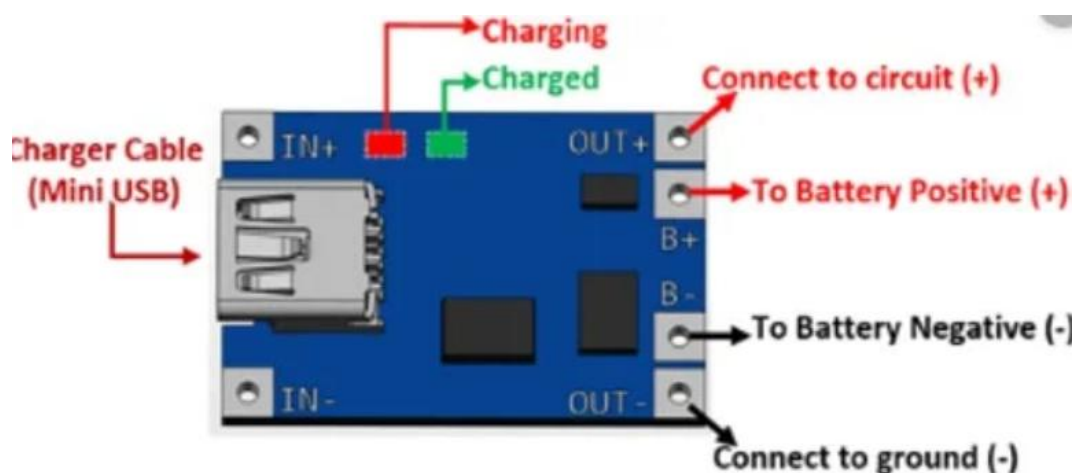
PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	GND	Pin ini berfungsi sebagai ground atau titik referensi nol volt yang digunakan untuk melengkapi rangkaian listrik dan menjaga kestabilan sistem.
2	VCC	Pin ini berfungsi sebagai sumber tegangan untuk menyuplai daya ke LCD 16x2 I2C sehingga seluruh rangkaian internal dapat beroperasi
3	SCL	Pin ini berfungsi sebagai sinyal clock yang mengatur sinkronisasi komunikasi antara mikrokontroler dan modul LCD 16x2 I2C selama proses pengiriman data
4	SDA	Pin ini berfungsi sebagai jalur penerima data dari mikrokontroler yang digunakan untuk mengirimkan informasi tampilan ke layar LCD 16x2 I2C.

Tabel 2- 18 Spesifikasi LCD I2C

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tipe Display	LCD Karakter
2	Jumlah karakter	16 karakter × 2 baris
3	Tegangan Kerja	5 V DC
4	Antarmuka	I2C
5	Alamat I2C	0x27 atau 0x3F
6	Konsumsi Arus	± 1–3 mA (tanpa backlight)
7	Jumlah Pin I2C	SDA dan SCL
8	Fungsi	Menampilkan data hasil pembacaan sensor dan status sistem

2.2.13 TP 4056

TP4056 merupakan modul pengisi daya (charging module) yang digunakan untuk melakukan pengisian ulang baterai lithium polymer (Li-Po), khususnya baterai tipe LP403040 yang digunakan sebagai sumber daya pada penelitian ini, dengan arus pengisian hingga 1 A. Modul ini dilengkapi dengan dua indikator LED sebagai penanda status pengisian, yaitu LED merah yang menunjukkan proses charging sedang berlangsung dan LED biru yang menandakan baterai telah terisi penuh. TP4056 menggunakan IC TP4056 sebagai pengendali utama proses

**Gambar 2. 8** TP4056

pengisian daya dengan metode arus konstan dan tegangan konstan (constant current–constant voltage). Modul ini memiliki tegangan keluaran pengisian sebesar 4,2 V sehingga sesuai digunakan untuk baterai lithium dengan rentang tegangan 3–3,7 V. Selain itu, IC TP4056 telah dilengkapi dengan sistem pengaturan suhu dan pemantauan arus yang berfungsi menjaga kestabilan proses pengisian serta meningkatkan keamanan baterai selama digunakan.[23]

Tabel 2- 19 Keterangan Pin TP 4056

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	OUT+	Pin ini berfungsi sebagai keluaran tegangan positif dari baterai yang digunakan untuk menyuplai daya ke rangkaian beban..
2	OUT-	Pin ini berfungsi sebagai keluaran tegangan negatif (ground) dari baterai yang terhubung ke rangkaian beban.
3	BATTERY+	Pin ini berfungsi sebagai terminal penghubung ke kutub positif baterai lithium-ion.
4	BATTERY-	Pin ini berfungsi sebagai terminal penghubung ke kutub negatif baterai lithium-ion.
5	INPUT+	Pin ini berfungsi sebagai masukan tegangan positif sebesar 5V dari sumber catu daya eksternal untuk proses pengisian baterai.
6	INPUT-	Pin ini berfungsi sebagai masukan tegangan negative (ground) dari sumber catu daya eksternal sebagai jalur referensi pada proses pengisian baterai.

Tabel 2- 20 Spesifikasi TP4056

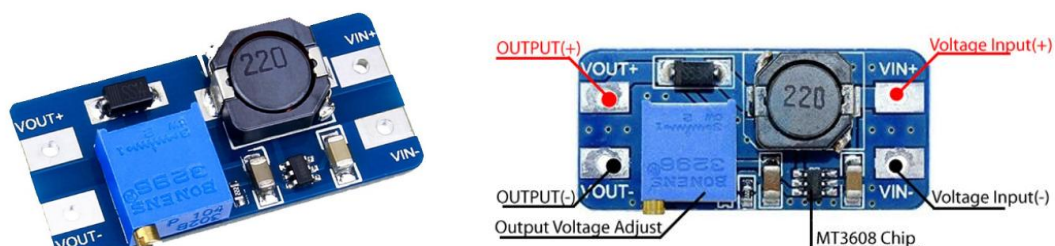
PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	IC Utama	TP4056
2	Tegangan Input	4,5 – 5,5 V DC
3	Tegangan Pengisian	4,2 V DC

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
4	Arus Pengisian Maksimum	1 A
5	Jenis Baterai	Lithium-Ion / Lithium Polymer 3,7 V
6	Proteksi	Overcharge, Overdischarge, Short Circuit (versi proteksi)
7	Indikator	LED Charging dan Full Charge
8	Fungsi	Pengisian ulang baterai Li-Po

2.2.14 MT3608

MT3608 merupakan modul konverter DC-DC tipe *boost* (step-up) yang berfungsi untuk meningkatkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi. IC ini dikemas dalam bentuk SOT23 dengan 6 pin, sehingga sesuai digunakan pada aplikasi berukuran kecil dan berdaya rendah. MT3608 bekerja dengan frekuensi switching tetap sebesar 1,2 MHz, yang memungkinkan penggunaan komponen eksternal seperti induktor dan kapasitor berukuran kecil dengan profil rendah.

Modul ini dilengkapi dengan fitur soft-start internal yang berfungsi untuk mengurangi arus lonjakan saat awal pengoperasian, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem dan memperpanjang usia baterai. Selain itu, MT3608 mampu beralih secara otomatis ke mode pulse frequency modulation (PFM) ketika berada pada kondisi beban ringan, sehingga efisiensi daya tetap terjaga.



Gambar 2. 9 MT3608

Dari sisi proteksi, MT3608 memiliki beberapa mekanisme pengaman seperti undervoltage lockout (UVLO), pembatas arus (current limiting), serta proteksi suhu berlebih (thermal protection). Fitur-fitur tersebut berfungsi untuk melindungi

rangkaian dari kondisi kerja yang tidak normal seperti tegangan input rendah, arus berlebih, maupun kenaikan suhu yang dapat menyebabkan kerusakan. Dengan karakteristik tersebut, MT3608 banyak digunakan pada sistem elektronika portabel yang membutuhkan peningkatan tegangan secara efisien dan stabil. [24]

Tabel 2- 21 Keterangan Pin MT3608

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	VIN+	Pin ini berfungsi sebagai jalur masuk tegangan positif dari sumber daya yang akan dinaikkan nilainya oleh modul konverter.
2	VIN-	Pin ini berfungsi sebagai jalur referensi negatif (ground) dari sumber tegangan input untuk melengkapi rangkaian.
3	VOUT+	Pin ini berfungsi sebagai keluaran tegangan positif hasil peningkatan dari proses konversi tegangan yang dilakukan oleh modul.
4	VOUT-	Pin ini berfungsi sebagai jalur referensi negatif (ground) pada sisi keluaran yang terhubung dengan beban atau rangkaian yang disuplai.

Tabel 2- 22 Spesifikasi MT3608

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tipe	DC-DC Step-Up Converter
2	IC Utama	MT3608
3	Tegangan Input	2 V – 24 V DC
4	Tegangan Output	5 V – 28 V DC (dapat diatur)
5	Arus Output Maksimum	2 A
6	Efisiensi	Hingga 93%
7	Frekuensi Switching	1,2 MHz
8	Fungsi	Menaikkan tegangan baterai ke tegangan yang dibutuhkan sistem

2.2.15 BATERAI LP403040

Baterai LP403040 merupakan salah satu jenis baterai Lithium Polymer (Li-Po) yang banyak digunakan pada perangkat elektronik portabel karena memiliki bentuk yang tipis, ringan, serta mampu menyimpan energi dengan kepadatan yang tinggi. Baterai ini bekerja berdasarkan perpindahan ion lithium antara anoda dan katoda melalui elektrolit berbasis polimer, sehingga mampu menghasilkan tegangan yang stabil selama proses pengosongan dan pengisian. Selain itu, penggunaan elektrolit polimer memungkinkan baterai memiliki bentuk yang fleksibel dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan desain perangkat elektronik .

Secara karakteristik, baterai LP403040 memiliki tegangan nominal sebesar 3,7 volt dan tegangan maksimum pengisian mencapai 4,2 volt. Tegangan nominal tersebut merupakan nilai rata-rata selama proses penggunaan, sedangkan batas 4,2 volt merupakan tegangan maksimum yang aman saat proses pengisian berlangsung. Baterai lithium polymer juga memiliki keunggulan berupa efisiensi energi yang tinggi, laju self-discharge yang rendah, serta kemampuan siklus pengisian ulang yang cukup baik, sehingga cocok digunakan sebagai sumber daya pada sistem embedded dan perangkat IoT .[25]



Gambar 2. 10 Baterai LP 403040

Tabel 2- 23 Keterangan Pin LP 403040

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Kabel Merah (+)	Menyalurkan tegangan positif baterai sebesar 3,7 V ke rangkaian.
2	Kabel Hitam (-)	Ground atau kutub negatif baterai yang terhubung ke rangkaian.

Tabel 2- 24 Spesifikasi LP 403040

PIN	KETERANGAN	FUNGSI
1	Tipe Baterai	Lithium Polymer (Li-Po)
2	Model	403040
3	Tegangan Nominal	3,7 V DC
4	Tegangan Pengisian Maksimum	4,2 V DC
5	Kapasitas	1500 mAh
6	Energi Tersimpan	$\pm 5,55$ Wh
7	Jenis Konektor	JST 2 Pin
8	Dimensi	10 × 30 × 40 mm

2.2.16 Arduino Uno

Arduino IDE (Integrated Development Environment) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler Arduino maupun mikrokontroler lain yang didukung, seperti ESP32 dan ESP8266. Arduino IDE dikembangkan dengan tujuan mempermudah proses pengembangan sistem tertanam (embedded system), sehingga dapat digunakan oleh pemula maupun pengembang profesional.

Arduino IDE menyediakan editor kode yang mendukung bahasa pemrograman Arduino, yang merupakan turunan dari bahasa C/C++. Selain itu, Arduino IDE dilengkapi dengan fitur verifikasi (compile) untuk memeriksa kesalahan sintaks program, serta fitur upload yang memungkinkan program dikirim langsung ke mikrokontroler melalui koneksi USB. Perangkat lunak ini juga menyediakan Serial Monitor dan Serial Plotter yang berguna untuk memantau data yang dikirim oleh

mikrokontroler secara real-time, sehingga memudahkan proses pengujian dan debugging sistem.

Dalam proses pengembangan perangkat berbasis ESP32, Arduino IDE mendukung penambahan paket board (Board Manager) sehingga ESP32 dapat diprogram menggunakan lingkungan yang sama seperti Arduino. Dukungan terhadap berbagai pustaka (library) juga menjadi salah satu keunggulan Arduino IDE, karena memungkinkan integrasi dengan berbagai sensor, modul komunikasi, layar LCD, maupun aktuator hanya dengan menambahkan library yang sesuai.

Pada penelitian ini, Arduino IDE digunakan sebagai perangkat lunak utama untuk mengembangkan program pada mikrokontroler ESP32. Seluruh algoritma yang mengatur pembacaan sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22, pemrosesan data, pengendalian buzzer, LED WS2812, serta penampilan informasi pada LCD diimplementasikan menggunakan Arduino IDE. Program yang telah dibuat kemudian dikompilasi untuk memastikan tidak terdapat kesalahan sintaks, selanjutnya diunggah ke ESP32 agar sistem dapat bekerja sesuai dengan rancangan yang telah ditentukan.

Dengan kemudahan penggunaan, kompatibilitas yang luas, serta dukungan komunitas yang besar, Arduino IDE menjadi salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT), otomasi, robotika, dan berbagai aplikasi berbasis mikrokontroler.



Gambar 2. 11 Software Arduino Ide