

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai bahan pertimbangan dalam penulisan penyusunan tugas akhir ini berdasarkan beberapa referensi yang sudah ada. Dalam hal ini penulis menggunakan beberapa referensi yang berkaitan dengan tugas akhir yang akan penyusun buat, berikut beberapa penelitian yang terkait:

1. Sistem Monitoring Lingkungan Berbasis Mikrokontroler

Sistem monitoring merupakan suatu mekanisme teknologi yang dirancang untuk mengamati, mengukur, dan menganalisa parameter tertentu dari lingkungan, seperti kualitas udara, kelembapan, suhu, dan tingkat kebisingan, dengan tujuan menjaga kualitas hidup manusia serta kelestarian ekosistem. Salah satu teknologi yang sering digunakan dalam pengembangan sistem monitoring adalah mikrokontroler. Mikrokontroler merupakan perangkat elektronik yang memiliki kemampuan pemrosesan data dan pengendalian berbagai sensor. Dengan dukungan fitur komunikasi data, mikrokontroler mampu menjadi pusat pengendali sistem monitoring yang dapat mengirimkan informasi secara real-time kepada pengguna. Penerapan mikrokontroler telah menunjukkan hasil yang signifikan terhadap efektifitas pemantauan lingkungan. Sebagai contoh, penggunaan Arduino, ESP32, atau STM32 banyak diimplementasikan pada sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT karena kemampuannya untuk membaca data sensor, mengolah informasi, dan mengirimkan data melalui jaringan komunikasi seperti wi-fi, GSM, maupun LoRa [5].

2. Penggunaan Internet of Things (IoT) dan PLTS untuk sistem monitoring lingkungan

Teknologi IoT ini telah mengubah cara kerja banyak sektor, termasuk monitoring lingkungan, di mana informasi yang diperoleh dari sensor dapat dikirimkan ke cloud untuk diproses dan dianalisis lebih lanjut. Dalam implementasi IoT untuk monitoring kualitas udara, data dari sensor-sensor seperti CO₂, PM2.5, Kelembapan, dan kebisingan dikirim secara real-time melalui protokol komunikasi seperti Thingspeak ke server atau dashboard visualisasi. Selain itu, PLTS dapat dipadukan dengan teknologi penyimpan daya pintar (*smart energy storage*) dan mode hemat energi pada mikrokontroler, untuk memastikan daya yang dihasilkan cukup untuk kebutuhan sensor, modul komunikasi, dan tampilan LCD [6].

3. Teknologi Transmisi Data Menggunakan LoRa

LoRa (Long Range) merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang dirancang untuk mengirimkan data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah. Dalam sistem ini, Modul LoRa digunakan untuk mengirimkan data hasil pengukuran dari node ke gateway. LoRa sangat cocok digunakan di daerah yang tidak memiliki jaringan WiFi atau GSM, sehingga sangat cocok diaplikasikan di daerah dengan infrastruktur komunikasi terbatas tanpa memerlukan koneksi internet langsung. Menunjukkan bahwa sistem berbasis ESP32 atau Arduino, dapat beroperasi stabil dengan dukungan LoRa sebagai media transmisi dan PLTS sebagai sumber energi utama [7].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Udara

Udara merupakan faktor terpenting dalam kehidupan, namun dengan meningkatnya pembangunan kota dan pusat-pusat industri, kualitas udara telah mengalami perubahan. Dikarenaakan banyaknya pembangunan pusat industri dan banyaknya kendaraan bermotor yang membuat udara menjadi tercemar dan kurang sehat untuk kehidupan. Pencemaran udara dapat diartikan dengan menurunnya kualitas udara, sehingga udara mengalami penurunan mutu dalam penggunaannya dan akhirnya tidak dapat dipergunakan lagi sebagai mana mestinya sesuai dengan fungsinya [8].

Dewasa ini, 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 antara lain emisi dari pembakaran sampah, transportasi, 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, beberapa jenis gas yang terkandung di udara sebagai berikut. Dampak kesehatan yang sering terjadi oleh pencemaran udara adalah infeksi pada saluran pernapasan. Jika kualitas udara yang berada di sekitar buruk, maka akan mengganggu kesehatan dan kenyamanan lingkungan. Kualitas udara perlu memenuhi standar kesehatan. Dengan upaya penanggulangan kualitas udara yang buruk untuk menaikkan dan menstabilkan kualitas udara tersebut [9].

2.2.2 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon Dioksida (CO₂) adalah gas tak berwarna dan tak berbau, sejenis senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Gas ini 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. Meningkatnya konsentrasi CO₂ berimplikasi luas bagi lingkungan luar ruangan dan kualitas udara dalam ruangan. Umumnya di lingkungan ruangan dengan ventilasi buruk, kadar CO₂ dapat meningkat dengan cepat. Ketika seseorang terpapar konsentrasi CO₂ yang tinggi, mereka dapat mengalami sejumlah gejala kesehatan [10].

Paparan CO₂ yang tinggi bisa menyebabkan berbagai efek pada tubuh manusia. Hal itu mungkin termasuk sakit kepala, pusing, gelisah, kesemutan, kesulitan bernapas, berkeringat, kelelahan, peningkatan denyut jantung, tekanan darah tinggi, koma, asfiksia, dan kejang-kejang. Berikut tingkat CO₂ di udara dan potensi masalah kesehatan yang bisa ditimbulkannya [10].

Menurut +iQAir sebuah platform untuk pemantauan kualitas udara, berikut penjelasan terkait besar konsentrasi gas CO₂ pada udara dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Keterangan Kategori Konsentrasi CO₂ [11]

Kategori (PPM)	Keterangan
400 – 1.000	Tingkat CO ₂ memiliki pertukaran yang baik
1.000 – 2.000	Tingkat CO ₂ ini bisa menyebabkan keluhan kantuk dan udara yang buruk
2.000 – 5.000	Tingkat CO ₂ ini bisa menyebabkan sakit kepala, kantuk, dan udara yang stagnan, pengap, dan sesak. Konsentrasi yang buruk, kehilangan perhatian, peningkatan denyut jantung dan sedikit mual juga bisa terjadi.
5.000 – 40.000	Tingkat CO ₂ ini sangat berbahaya karena bisa menyebabkan kekurangan oksigen dan kehilangan kesadaran.

Part per million (PPM): satuan konsentrasi yang digunakan untuk menunjukkan kandungan suatu senyawa dalam larutan. Ini menunjukkan kondisi udara yang tidak biasa di mana tingkat tinggi gas lain juga bisa hadir. Toksisitas atau kekurangan oksigen bisa terjadi. Ini adalah batas paparan yang diizinkan untuk paparan di tempat kerja sehari-hari [8].

2.2.3 Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5})

Particulate matter (PM) adalah campuran kompleks partikel padat dan cair yang tersuspensi di udara. Sumber utama debu di atmosfer berasal dari tanah, kebakaran semak belukar, pembakaran sampah rumah tangga, kendaraan bermotor. PM memiliki ukuran besar yang beragam, faktor ukuran dari partikulat ini dianggap sangat penting dalam aspek kesehatan, sebab partikulat yang memiliki ukuran kecil yang kurang dari 10µm cenderung dapat merugikan manusia apabila terhirup. Partikulat berukuran kecil tidak dapat terlihat oleh mata dan apabila terhirup rambut

– rambut di dalam hidung tidak dapat menyaring debu tersebut dan akan terjebak di sistem pernafasan manusia [12].

PM 2.5 adalah partikel udara yang berukuran lebih kecil atau sama dengan $2,5 \mu\text{m}$ (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 $10 \mu\text{m}$, sehingga dapat merugikan manusia khususnya bagi masalah kesehatan manusia. Tabel 2.2 menjelaskan keterangan dari besar konsentrasi PM 2.5 di udara, standar ini didapatkan berdasarkan 13 penjelasan tingkat konsentrasi PM 2.5 di udara oleh BMKG [13].

Tabel 2. 2 Keterangan Konsentrasi PM 2.5 di udara [13]

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 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 $18 - 30^\circ\text{C}$ [14].

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 [8].

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 $<60\%$, maka kelembapan tersebut tidak baik [14].

2.2.5 Kebisingan

Kebisingan adalah suara yang tidak diinginkan dan cenderung mengganggu kenyamanan, konsentrasi, bahkan kesehatan manusia. Sumber kebisingan dapat berasal dari berbagai aktivitas, seperti lalu lintas kendaraan bermotor, kegiatan industri, peralatan elektronik, serta aktivitas manusia sehari-hari. Kebisingan memiliki sifat dinamis dan bervariasi tergantung kondisi lingkungan. Misalnya, kawasan perkotaan dengan tingkat mobilitas tinggi cenderung memiliki tingkat kebisingan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan pedesaan [15].

Paparan kebisingan secara terus-menerus pada tingkat yang melebihi ambang batas aman dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, baik fisiologis maupun psikologis. Dampak fisiologis mencakup gangguan pendengaran permanen, peningkatan tekanan darah, gangguan kardiovaskular, sedangkan dampak psikologis meliputi stres, gangguan tidur, hingga menurunnya produktivitas kerja. Menurut World Health Organization (WHO), ambang batas

aman kebisingan untuk paparan jangka panjang adalah 85 dB selama 8 jam. Paparan di atas ambang batas tersebut secara terus-menerus dapat mempercepat kerusakan indera pendengaran [16].

2.2.6 Module ESP 32 WROOM



Gambar 2. 1 Module ESP 32 WROOM

Gambar 2.1 menunjukkan modul ESP32 yang digunakan sebagai inti sistem Espressif Systems memperkenalkan mikrokontroler ESP32 pada September 2016. ESP32 cepat menjadi favorit di kalangan pengembang Internet of Things (IoT) karena mengintegrasikan Wi-Fi dan Bluetooth (Classic + BLE), serta dapat diprogram menggunakan Arduino IDE yang populer di komunitas maker. Kombinasi fitur ini kemampuan wireless ganda, pemrosesan dual-core, dan 35 ekosistem pengembang yang luas menjadikannya pilihan utama untuk aplikasi IoT modern.

ESP32-WROOM adalah modul yang mengemas chip ESP32 bersama dengan memori Flash dan komponen lain yang diperlukan untuk membuat modul siap digunakan. Modul ini dirancang untuk memudahkan integrasi ESP32 ke dalam berbagai aplikasi IoT. ESP32-WROOM mendukung berbagai protokol komunikasi dan dapat diprogram menggunakan berbagai bahasa pemrograman seperti C, C++, dan MicroPython. Dukungan luas terhadap berbagai IDE (Integrated Development Environment) seperti Arduino IDE dan PlatformIO juga menambah kemudahan pengembangan [17].

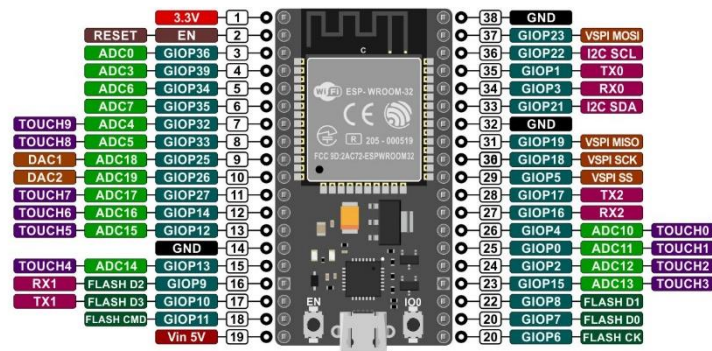
ESP32 menawarkan performa yang sangat tinggi. Mikrokontroler ini dibekali prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz, RAM sebesar 520 KB, dan memori flash sebesar 4 MB. Selain itu, ESP32 juga memiliki

berbagai fitur penting lainnya seperti ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, dan masih banyak lagi, yang membuatnya sangat fleksibel untuk berbagai kebutuhan elektronika. Dalam konteks Internet of Things, ESP32 berperan sebagai pusat kendali menghubungkan berbagai perangkat elektronik ke internet sehingga bisa diakses dan dikendalikan dari jarak jauh melalui aplikasi web maupun smartphone. Berkat harganya yang terjangkau dan dukungan komunitas yang aktif dan ramah pengguna, ESP32 menjadi pilihan utama bagi siapa saja yang ingin mulai membangun sistem IoT [18].

Sebagai mikrokontroler dengan fitur dan kemampuan yang istimewa, ESP32 menjadi favorit di kalangan tim pengembang Internet of Things (IoT). Berikut ini beberapa keunggulan utama yang membuat ESP32 begitu diminati:

1. Ditenagai oleh prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz, ESP32 mampu memberikan performa tinggi untuk beragam aplikasi.
2. Dilengkapi dengan RAM sebesar 520 KB dan memori flash 4 MB, kapasitas ini cukup untuk menjalankan program-program kompleks.
3. Mendukung standar konektivitas WiFi 802.11 b/g/n serta Bluetooth Low Energy (BLE), yang memungkinkan komunikasi nirkabel yang efisien dan andal.
4. Memiliki antena WiFi bawaan dan juga mendukung koneksi antena eksternal untuk memperkuat sinyal Bluetooth jika diperlukan.
5. Bisa diprogram menggunakan Arduino IDE yang populer maupun menggunakan ESP-IDF, framework resmi dari Espressif.
6. Menyediakan banyak pin input/output (GPIO) dengan berbagai antarmuka seperti ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, dan UART memudahkan pengelolaan sistem elektronik yang kompleks.
7. Mendukung fitur deep sleep atau mode hemat daya, sangat cocok untuk perangkat yang membutuhkan efisiensi energi tinggi.

Dengan segala keunggulan tersebut, ESP32 sangat cocok digunakan sebagai pusat kendali dalam berbagai sistem berbasis IoT, seperti otomasi rumah pintar, pemantauan lingkungan berbasis sensor, hingga aplikasi dalam dunia robotika.



Gambar 2. 2 Konfigurasi Pin Out ESP 32 WROOM [19]

ESP 32 WROOM memiliki beragam pin yang berfungsi untuk mendukung berbagai kebutuhan dalam proyek elektronika maupun Internet of Things (IoT). Berikut ini adalah penjelasan mengenai susunan pin yang tersedia:

1. Pin 3V3 – Menyediakan tegangan 3.3V yang bisa digunakan untuk memberi daya pada sensor atau perangkat eksternal lainnya yang membutuhkan tegangan tersebut.
2. Pin GND – Merupakan pin ground (tanah), digunakan sebagai referensi tegangan dalam rangkaian.
3. Pin EN (Enable) – Digunakan untuk menghidupkan atau mematikan modul ESP32. Saat pin ini ditarik rendah, ESP32 akan melakukan reset.
4. Pin BOOT – Digunakan untuk memilih mode boot. Biasanya dihubungkan ke GND saat ingin meng-upload program ke ESP32.
5. Pin GPIO0 – Merupakan pin input/output digital yang juga berperan dalam proses pemilihan mode boot.
6. Pin GPIO1 sampai GPIO39 – Merupakan pin I/O digital multifungsi yang bisa dipakai untuk berbagai keperluan seperti mengendalikan perangkat, membaca data sensor, atau berkomunikasi dengan modul lain.
7. Pin ADC – Pin input analog untuk membaca sinyal analog, misalnya dari sensor suhu atau potensiometer.

8. Pin AREF – Digunakan sebagai referensi tegangan eksternal untuk pengukuran analog.
9. Pin TX0 dan RX0 – Pin komunikasi serial UART utama untuk mengirim (TX) dan menerima (RX) data. Biasanya digunakan untuk komunikasi dengan komputer.
10. Pin TX2 dan RX2 – Merupakan pin UART tambahan, berguna saat membutuhkan port serial lebih dari satu.
11. Pin SDA dan SCL – Digunakan untuk komunikasi I2C, biasanya untuk sensor sensor digital seperti sensor suhu, OLED display, dll.
12. Pin SCK, MISO, MOSI – Pin komunikasi SPI yang digunakan untuk menghubungkan ESP32 dengan perangkat SPI seperti modul SD card atau sensor jarak.
13. Pin SCK, SD0, CMD, D0–D4 – Merupakan pin khusus untuk komunikasi SDIO, umumnya dipakai saat menghubungkan kartu SD atau perangkat lain yang mendukung protokol ini.
14. Pin DAC1 dan DAC2 – Pin output analog (DAC) yang mampu menghasilkan sinyal analog dari data digital.
15. Pin VP dan VN – Input analog yang digunakan untuk pengukuran tegangan, berguna untuk berbagai pengaplikasian sensor.
16. Pin GPIO34–GPIO39 – Pin input/output digital tambahan yang sudah dilengkapi fitur pullup dan pulldown internal, cocok untuk mendeteksi sinyal logika tertentu.

Tabel 2. 3 Datasheet ESP 32 WROOM [19]

Parameter	Nilai/Fitur
CPU	Xtensa LX6, dual-core @ 240 MHz
Memori	SRAM 520 KB, ROM 448 KB, RTC 16 KB RAM
Wi-Fi & BT	802.11 b/g/n (150 Mbps), BT 4.2 BR/EDR/BLE
Tegangan	3.0–3.6 V (umumnya 3.3 V)
Power idle/active	~80 mA (aktif), puncak 150–240 mA, deep-sleep 5 μ A
I/O & Peripheral	ADC, DAC, SPI, I ² C, UART, SDIO, Ethernet, CAN, PWM, Hall, touch, dll.
Security	HW crypto, secure boot, flash encryption
Dimensi modul (WROOM)	18 × 25.5 × 3.1 mm

Tabel 2.3 menunjukkan spesifikasi utama ESP32 yang digunakan dalam sistem. Spesifikasi di atas menunjukkan bahwa ESP32 memiliki kemampuan yang cukup lengkap dan efisien untuk mendukung berbagai aplikasi berbasis IoT dan sistem tertanam.

2.2.7 Sensor MHZ19 (CO₂)



Gambar 2. 3 Sensor MHZ19

Gambar 2.3 menunjukkan bentuk fisik sensor MH-Z19 yang digunakan. Sensor MH-Z19 merupakan sensor gas digital buatan Winsen yang dirancang khusus untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) dengan tingkat akurasi tinggi. Dengan dimensi kecil, konsumsi daya rendah (sekitar 150 mA saat pengukuran), dan antarmuka komunikasi UART serta PWM, MH-Z19 sangat populer digunakan pada berbagai aplikasi seperti sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), pemantauan kualitas udara dalam ruangan, green house monitoring, serta sistem IoT [20].

Prinsip kerja sensor MH-Z19 berbasis metode NDIR, di mana di dalam sensor terdapat sumber cahaya inframerah dan detektor. Gas CO₂ memiliki sifat menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang tertentu. Ketika udara mengalir melalui ruang pengukuran, molekul CO₂ akan menyerap sebagian cahaya inframerah yang dipancarkan oleh sumber cahaya. Penurunan intensitas cahaya ini kemudian diukur oleh detektor dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut selanjutnya diproses oleh rangkaian penguat internal, kemudian dikonversi menjadi data digital oleh ADC (Analog-to-Digital Converter), sehingga dapat dibaca oleh mikrokontroler melalui antarmuka UART. Sensor ini memiliki rentang pengukuran 0–5000 ppm dengan akurasi $\pm(50 \text{ ppm} + 5\% \text{ dari nilai bacaan})$, resolusi pengukuran 1 ppm, serta mendukung kalibrasi otomatis (ABC - Automatic Baseline Calibration) untuk menjaga kestabilan pengukuran jangka panjang [21].

Tabel 2. 4 Datasheet Sensor MHZ19 [22]

Spesifikasi	Nilai/Fitur
Gas target	CO ₂
Tegangan kerja	3.6 ~ 5.5 V DC
Arus rata-rata	< 18 mA
Rentang pengukuran	0–5000 ppm
Output signal	UART
	PWM
Reponse Time	< 60–120 detik
Working temperature	0 ~ 50 °C
Dimensi	33 mm×20 mm×9 mm (L×W×H)
Umur Pakai	> 5 tahun

Dengan spesifikasi tersebut, MH-Z19 banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT, terutama karena mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat, memiliki daya tahan tinggi, dan kompatibel dengan berbagai jenis perangkat pemroses data.

2.2.8 Sensor ZH03B (PM2.5)



Gambar 2. 4 Sensor ZH03B

Gambar 2.4 menunjukkan bentuk fisik sensor ZH03B yang digunakan. Sensor ZH03B adalah sensor partikulat udara berbasis teknologi laser scattering yang dirancang untuk mendeteksi konsentrasi partikel debu halus seperti PM1.0, PM2.5, dan PM10 di udara. Sensor ini diproduksi oleh Winsen Electronics dan banyak digunakan dalam aplikasi monitoring kualitas udara, perangkat IoT, serta sistem kesehatan lingkungan. ZH03B memiliki bentuk kompak dengan ukuran sekitar 50 mm × 36 mm × 21 mm dan bobot ringan sehingga mudah diintegrasikan ke berbagai perangkat monitoring. Sensor ini mendukung antarmuka komunikasi UART dan PWM untuk pengiriman data secara digital ke mikrokontroler seperti ESP32 [23].

Prinsip kerja ZH03B menggunakan metode hamburan cahaya laser (laser scattering method). Di dalam sensor terdapat diode laser yang memancarkan sinar ke ruang deteksi. Ketika partikel debu melintas di dalam ruang tersebut, cahaya laser akan dihamburkan (scattered) oleh partikel. Hamburan cahaya ini kemudian dideteksi oleh fotodioda, yang mengubah intensitas hamburan menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut diperkuat melalui rangkaian penguat internal dan dikonversi menjadi data digital melalui ADC (Analog-to-Digital Converter). Proses ini memungkinkan sensor menghitung konsentrasi partikel berdasarkan jumlah dan intensitas hamburan cahaya yang diterima. Data digital yang dihasilkan kemudian dikirim ke mikrokontroler untuk divisualisasikan atau dianalisis lebih lanjut. Sensor ini memiliki spesifikasi teknis yang meliputi rentang pengukuran 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan akurasi tinggi dan kemampuan deteksi partikel hingga ukuran 0,3 mikron. Keunggulan lain adalah konsumsi daya rendah (sekitar 100 mA saat beroperasi),

sehingga sangat sesuai digunakan pada perangkat berbasis baterai atau energi terbarukan. Karena keandalan dan sensitivitasnya, ZH03B banyak diaplikasikan dalam sistem pemantauan kualitas udara di ruang publik, rumah sakit, gedung perkantoran, hingga smart city [23].

Tabel 2. 5 Datasheet Sensor ZH03B [24]

Spesifikasi	Nilai/Fitur
Deteksi partikel	PM1.0, PM2.5, PM10
Tegangan kerja	5 V $\pm$ 0,1 V DC
Konsumsi Arus	<120 mA (operasi), <20 mA (sleep)
Rentang pengukuran	0–5000 ppm
Output signal	UART OUTPUT (3V TTL)
	PWM
Reponse Time	$\leq$ 45 detik
Working temperature	0 ~ 50 °C
Dimensi	50 $\times$ 32,4 $\times$ 21 mm (L $\times$ W $\times$ H)
Umur Pakai	> 3 tahun

Dengan spesifikasi ini, sensor ZH03B menjadi salah satu sensor PM2.5 yang sangat populer untuk aplikasi monitoring kualitas udara berbasis IoT karena memiliki akurasi tinggi, ukuran kompak, konsumsi daya rendah, dan komunikasi digital yang mudah diintegrasikan.

Contoh perhitungan PWM:

$$\text{PM2.5 } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 1000 \times \frac{T_H}{T_H + T_L}$$

Keterangan:

- T_H = durasi sinyal HIGH dalam satu periode (~1 detik)
- T_L = durasi sinyal LOW dalam satu periode (~1 detik)

2.2.9 Sensor DHT22



Gambar 2. 5 Sensor DHT22

Gambar 2.6 menunjukkan bentuk fisik sensor DHT22 yang digunakan. Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang dirancang untuk mengukur suhu dan kelembapan udara dengan akurasi yang tinggi. Sensor ini banyak digunakan dalam aplikasi pemantauan lingkungan, stasiun cuaca, sistem pengendalian suhu, serta proyek berbasis IoT. DHT22 memiliki casing plastik dengan kisi-kisi untuk memungkinkan aliran udara mencapai elemen pengukuran [25].

Prinsip kerja sensor DHT22 adalah berbasis resistive humidity measurement dan thermistor untuk suhu. Elemen pengukuran kelembapan menggunakan polimer kapasitif yang nilai kapasitansinya berubah ketika kelembapan udara meningkat atau menurun. Perubahan kapasitansi ini dikonversi menjadi sinyal digital oleh modul internal sensor. Untuk pengukuran suhu, DHT22 menggunakan NTC thermistor, yang resistansinya akan menurun seiring kenaikan suhu. Kedua data (suhu dan kelembapan) diproses oleh chip internal, dikalibrasi, dan dikirim ke mikrokontroler melalui protokol single-wire. Sensor ini memiliki kemampuan mengukur suhu dalam rentang -40°C hingga $+80^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, serta kelembapan relatif (RH) dari 0% hingga 100% dengan akurasi $\pm 2\%$ RH. Resolusi pengukuran suhu adalah $0,1^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan 0,1% RH. DHT22 menggunakan antarmuka single-wire digital, sehingga memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32. Konsumsi daya sensor ini relatif rendah, sekitar 1,5 mA saat pengukuran, sehingga sesuai untuk perangkat monitoring bertenaga baterai [25].

Tabel 2. 6 Sensor DHT22 [26]

Spesifikasi	Nilai/Fitur
Parameter	Suhu & kelembapan relatif
Rentang pengukuran suhu	-40°C hingga +80°C
Akurasi suhu	±0,5°C
Rentang pengukuran kelembapan	0–100% RH
Akurasi kelembapan	±2% RH
Tegangan suplai	3,3–6 VDC
Arus konsumsi	1,5 mA saat pengukuran
Dimensi	±15,1 × 25 × 7,7 mm
Interval pembacaan	Minimum 2 detik (0,5 Hz)

Dengan karakteristik ini, DHT22 banyak digunakan dalam sistem monitoring berbasis IoT karena memiliki akurasi tinggi, daya rendah, dan kemudahan integrasi dengan berbagai platform mikrokontroler.

2.2.10 Sensor LM2904



Gambar 2. 6 Sensor LM2904

Gambar 2.5 menunjukkan bentuk fisik sensor kebisingan berbasis LM2904 yang digunakan. Komponen utama sensor ini adalah mikrofon elektret yang berfungsi menangkap gelombang suara dan penguat operasional (op-amp) LM2904 untuk memperkuat sinyal analog dari mikrofon. Dengan penguatan yang memadai, sinyal keluaran dapat dikonversi oleh ADC (Analog-to-Digital Converter) pada mikrokontroler seperti ESP32, sehingga data kebisingan dapat ditampilkan dalam satuan desibel (dB). LM2904 merupakan IC penguat operasional (op-amp) dengan

konsumsi daya rendah, bekerja pada tegangan suplai 3V hingga 32V (single supply), dan mendukung arus bias input yang rendah. Komponen ini umumnya digunakan dalam rangkaian sensor analog untuk penguatan sinyal kecil, seperti dari mikrofon. Dengan desain ini, sensor kebisingan berbasis LM2904 dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti monitoring lingkungan, sistem pengendalian suara, dan penelitian akustik [27].

Prinsip kerja sensor kebisingan berbasis LM2904 yaitu Ketika suara di sekitar sensor menghasilkan getaran udara, mikrofon mengubah getaran tersebut menjadi sinyal listrik dengan amplitudo yang sangat kecil (mV level). Sinyal ini kemudian diperkuat oleh rangkaian penguat berbasis LM2904 agar dapat dibaca oleh ADC pada mikrokontroler. Besarnya tegangan keluaran sebanding dengan intensitas suara yang diterima. Setelah itu, data analog dikonversi menjadi nilai digital melalui ADC dan diproses untuk menampilkan level kebisingan dalam format numerik atau grafik.

Tabel 2. 7 Datasheet Sensor LM2904 [28]

Spesifikasi	Nilai/Fitur
Tipe IC	LM2904 – Low Power Dual Operational Amplifier
Tegangan Suplai	3V hingga 32V (Single Supply)
Konsumsi Arus	$\pm 0,7$ mA per amplifier
Gain Bandwidth Product	1,1 MHz
Temperatur Operasional	-40 °C hingga $+125$ °C
Output Voltage Swing	0 hingga $V_{CC} - 1,5$ V
Package	SOIC-8, DIP-8

Dengan konfigurasi ini, sensor kebisingan berbasis LM2904 memiliki konsumsi daya rendah, penguatan stabil, dan kemampuan integrasi yang baik dengan sistem berbasis IoT, sehingga sesuai digunakan untuk pemantauan polusi suara secara real-time.

2.2.11 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)



Gambar 2. 7 Solar Panel (PLTS)

Gambar 2.7 menunjukkan bentuk fisik panel surya (solar panel) yang digunakan. Panel surya adalah perangkat elektronik yang dirancang untuk mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaiik. Panel ini terdiri dari lapisan sel surya berbahan semikonduktor, seperti silikon monokristalin atau polikristalin, yang dapat menghasilkan tegangan ketika terkena cahaya. Karena memiliki efisiensi konversi yang cukup baik, konsumsi daya rendah (tidak memerlukan energi tambahan untuk beroperasi), dan ramah lingkungan, panel surya banyak digunakan pada berbagai perangkat modern, termasuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), perangkat monitoring IoT di lokasi terpencil, sistem pencahayaan, serta backup daya [29].

Panel surya bekerja dengan memanfaatkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu ketika foton cahaya matahari mengenai permukaan sel semikonduktor, energi foton akan melepaskan elektron dari atom semikonduktor sehingga tercipta aliran listrik. Sinyal listrik ini kemudian dialirkan ke rangkaian pengatur daya (solar charge controller) untuk distabilkan dan disimpan ke baterai. Dalam implementasinya, panel surya menghasilkan tegangan DC, sehingga sering dipadukan dengan regulator tegangan atau buck converter agar sesuai dengan kebutuhan perangkat elektronik seperti mikrokontroler ESP32 dan sensor. Setelah energi listrik tersimpan dalam baterai, daya tersebut digunakan untuk mengoperasikan perangkat monitoring secara mandiri [30].

Tabel 2. 8 Spesifikasi Umum Solar Panel [31]

Parameter	Spesifikasi Umum
Jenis sel	Monocrystalline / Polycrystalline
Daya Puncak (Pmax)	30 Wp – 550 Wp
Tegangan Maksimum (Vmp)	17 – 40 V
Arus Maksimum (Imp)	1 – 13 A
Tegangan Tanpa Beban (Voc)	21 – 50
Dimensi	30 × 30 cm (30 Wp) sampai 110 × 180 cm (550 Wp)
Efisiensi	15 – 22%

Langkah awal adalah menghitung total konsumsi energi dari seluruh perangkat sistem dalam satu hari. Energi ini dihitung berdasarkan daya masing-masing perangkat dikalikan dengan lama waktu operasionalnya dalam satu hari, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan: [32]

1. Estimasi Energi Harian Sistem

Digunakan untuk menghitung total konsumsi energi perangkat setiap harinya:

$$E_L = \sum (P_i \times t_i)$$

Keterangan:

E_L : Energi harian total (Wh/hari)

P_i : Daya perangkat ke-i (Watt)

t_i : Lama nyala perangkat per hari (jam)

Setelah mengetahui kebutuhan energi sistem, langkah selanjutnya adalah menghitung estimasi energi harian yang dapat dihasilkan oleh panel surya. Energi ini diperoleh dari hasil perkalian daya panel dengan rata-rata durasi penyinaran efektif matahari per hari. Persamaan ditunjukkan sebagai berikut:

2. Energi yang Dihasilkan Panel

$$E_{panel} = P_{panel} \times H_t$$

Keterangan:

E_{panel} : Energi yang dihasilkan panel per hari (Wh/hari)

P_{panel} : Daya panel surya (Wp)

H_t : Rata-rata jam penyinaran efektif per hari (jam)

Dengan perhitungan kebutuhan energi harian dan estimasi energi dari panel surya, pemilihan kapasitas panel dan baterai dapat dilakukan secara tepat agar sistem Monitoring Lingkungan dapat beroperasi mandiri dan berkelanjutan.

2.2.12 Solar Charge Controller (SCC) Tipe PWM



Gambar 2. 8 Solar Charge Controller (SCC)

Gambar 2.8 menunjukkan bentuk fisik sensor pengatur pengisian daya berupa Solar Charge Controller (SCC) berbasis PWM yang digunakan dalam sistem. SCC PWM adalah perangkat elektronik yang mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai dengan menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) untuk memaksimalkan efisiensi pengisian sambil melindungi baterai dari over-charging. Prinsip kerjanya mirip dengan saklar elektronik yang menyalakan dan mematikan daya secara cepat, sehingga tegangan rata-rata yang diterima baterai dapat dikontrol dengan akurat. SCC jenis ini umum digunakan dalam sistem tenaga surya skala kecil hingga menengah, seperti sistem off-grid rumah tangga, IoT berbasis energi mandiri, serta aplikasi penyimpanan energi terbarukan karena desainnya sederhana, andal, dan hemat biaya.

Prinsip kerja dari SCC PWM yaitu saat baterai membutuhkan pengisian (misalnya saat tegangan berada di bawah ambang batas penyimpanan tertentu), SCC akan mengizinkan arus dari panel surya mengalir secara penuh (fase bulk). Ketika baterai mencapai tegangan tertentu, SCC mulai mengurangi rasio on-time PWM (mengurangi duty cycle) untuk mencegah overcharging (fase absorption), hingga akhirnya masuk ke phase float — hanya memberikan arus kecil yang cukup untuk menjaga baterai dalam kondisi penuh tanpa overcharge [33].

Tabel 2. 9 Spesifikasi Umum SCC [34]

Parameter	Spesifikasi Umum
Jenis	PWM/MPPT
Tegangan Kerja Panel	12 / 24 / 48 V
Arus Output (charging)	10 – 60 A
Tegangan Input (Voc Panel Maks)	25 – 150 V tergantung model
Efisiensi MPPT (jika MPPT)	> 98%
Fitur	Proteksi overcharge, reverse polarity, short circuit
Efisiensi	15 – 22%

Dengan konfigurasi tersebut, SCC PWM menghadirkan kontrol pengisian baterai yang efisien tanpa kompleksitas tinggi seperti MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pada sistem monitoring IoT berbasis energi surya, SCC jenis ini memungkinkan pasokan daya stabil dari panel surya ke baterai penyimpanan—mengoptimalkan kontinuitas operasional sensor dan mikrokontroler tanpa menguras biaya atau daya berlebih.

2.2.13 Baterai Aki 12 Volt



Gambar 2. 9 Baterai Aki 12 Volt

Gambar 2.9 menunjukkan bentuk fisik baterai aki 12 volt yang digunakan dalam sistem. Baterai aki merupakan perangkat penyimpan energi listrik berbasis reaksi kimia yang dapat diisi ulang (rechargeable). Jenis yang digunakan pada penelitian ini adalah baterai aki tertutup (sealed lead-acid battery / SLA) dengan tegangan nominal 12 V. Baterai ini memanfaatkan pasangan elektroda timbal (Pb) dan timbal dioksida (PbO_2) dengan elektrolit asam sulfat (H_2SO_4). Kelebihan utama aki SLA adalah kemampuannya menyediakan arus awal besar (high starting current), umur pakai yang relatif panjang, dan biaya yang ekonomis dibanding teknologi baterai lainnya. Dalam konteks sistem monitoring lingkungan berbasis IoT, baterai aki 12 V berfungsi sebagai sumber energi cadangan untuk memastikan kontinuitas operasi perangkat, terutama ketika suplai listrik utama atau pasokan dari panel surya terganggu. Tegangan nominal 12 V pada aki SLA umumnya memiliki rentang tegangan pengoperasian 10,5 V (saat hampir habis) hingga 14,4 V (saat penuh terisi) [35].

Prinsip kerja baterai aki adalah konversi energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia. Saat aki digunakan (discharge), timbal dioksida (PbO_2) di pelat positif dan timbal (Pb) di pelat negatif bereaksi dengan ion sulfat dari elektrolit membentuk timbal sulfat (PbSO_4) dan air (H_2O). Proses pengisian ulang (charging) membalikkan reaksi ini sehingga aki dapat digunakan kembali.

Tabel 2. 10 Spesifikasi Baterai Aki [36]

Parameter	Nilai / Fitur
Tipe Baterai	Sealed Lead-Acid (SLA)
Tegangan Nominal	12 V
Kapasitas	7,2 Ah (pada suhu 25 °C, laju 20 jam)
Tegangan Pengisian Float	13,5 – 13,8 V
Tegangan Pengisian Siklus	14,4 – 14,7 V
Suhu Operasional	–15 °C hingga +50 °C
Dimensi	±151 × 65 × 94 mm

Dengan konfigurasi ini, baterai aki SLA 12 V memberikan suplai daya yang stabil, aman, dan dapat diandalkan, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem monitoring lingkungan berbasis ESP32 dan LoRa yang memerlukan sumber daya berkelanjutan untuk pengoperasian sensor, modul komunikasi, dan unit kontrol secara real-time.

Kapasitas Energi Baterai:

$$\text{Kapasitas baterai (Ah)} = \frac{\text{Tegangan baterai (V)}}{\text{Energi harian (Wh)}}$$

Keterangan:

Ah : Kapasitas baterai (Ampere-hour)

V : Tegangan Baterai (Volt)

Wh : Energi Harian (Watt-hour)

2.2.14 LM 2596 Step Down



Gambar 2. 10 Lm 2595 Step Down

Gambar 2.10 menunjukkan bentuk fisik modul step-down DC-DC berbasis IC LM2596 yang digunakan. Komponen utama pada modul ini adalah regulator switching tipe buck converter LM2596 yang berfungsi menurunkan tegangan DC input menjadi tegangan DC output yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Modul ini banyak digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler seperti ESP32, Arduino, maupun perangkat IoT, untuk menyediakan tegangan suplai stabil bagi sensor dan komponen elektronik lainnya. LM2596 mampu bekerja pada rentang tegangan input yang luas, yaitu 4,5V hingga 40V, dengan kemampuan arus keluaran hingga 3A, sehingga sangat sesuai digunakan dalam aplikasi monitoring lingkungan yang membutuhkan suplai daya dari baterai atau sumber tegangan bervariasi [37].

Prinsip kerja LM2596 step-down yaitu memanfaatkan metode *pulse-width modulation* (PWM) pada frekuensi tetap untuk mengatur besar tegangan output. Ketika modul menerima tegangan input yang lebih tinggi dari kebutuhan beban, LM2596 akan melakukan proses *switching* yang dikombinasikan dengan induktor, dioda, dan kapasitor filter untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil pada output. Efisiensi konversi dapat mencapai 80–90%, sehingga mengurangi panas berlebih dan memperpanjang umur pakai sumber daya seperti baterai. Output tegangan dapat diatur melalui potensiometer pada modul, sehingga memudahkan integrasi dengan berbagai perangkat elektronik.

termasuk pengaturan daya pancar, kecepatan baud, dan mode kerja, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Dengan efisiensi energi serta ketahanan terhadap interferensi, LoRa E220-400T22D menjadi pilihan tepat untuk sistem monitoring lingkungan berbasis ESP32, terutama di lokasi terpencil yang tidak terjangkau jaringan Wi-Fi maupun seluler [38].

Penggunaan frekuensi pada jaringan LoRaWAN disesuaikan secara khusus dengan peraturan spektrum radio di setiap negara atau kawasan. Hal ini dikarenakan setiap wilayah memiliki alokasi frekuensi dan kebijakan yang berbeda, sehingga parameter teknis seperti frekuensi kerja, daya pancar maksimum, dan duty cycle dapat bervariasi tergantung pada aturan lokal.

Secara global, LoRaWAN umumnya menggunakan frekuensi tanpa lisensi yang berada di dalam pita ISM (Industrial, Scientific, and Medical).

Berikut adalah contoh alokasi frekuensi LoRaWAN di beberapa wilayah:

- 868 MHz → digunakan di kawasan Eropa (mengacu pada standar ETSI)
- 915 MHz → digunakan di Amerika Utara
- 433 MHz dan 920–923 MHz → digunakan di beberapa negara Asia, termasuk Indonesia
- 865–867 MHz → digunakan di kawasan Asia Selatan, seperti India

Pemilihan frekuensi tersebut diatur agar tidak mengganggu layanan radio lain, serta tetap sesuai dengan batasan waktu transmisi dan daya pancar yang diizinkan, guna menjaga efisiensi energi dan keandalan komunikasi. Dengan mengikuti alokasi frekuensi yang sesuai, sistem LoRaWAN dapat beroperasi secara legal, efisien, dan minim interferensi terhadap perangkat atau sistem lain yang bekerja di frekuensi serupa.

Secara khusus, LoRa E220-400T22D bekerja pada rentang frekuensi 410–441 MHz yang termasuk dalam jalur ISM band, sehingga dapat digunakan secara bebas tanpa memerlukan izin frekuensi tambahan. Modul ini memanfaatkan keunggulan frekuensi menengah yang mampu memberikan jangkauan komunikasi luas sekaligus konsumsi daya yang rendah. Dengan dukungan konfigurasi daya

pancar hingga 22 dBm, E220-400T22D mampu menjaga kestabilan sinyal meskipun digunakan di area terbuka yang luas maupun di lokasi dengan hambatan tertentu. Kemampuan ini menjadikannya sangat praktis dan ekonomis untuk sistem monitoring berbasis IoT, terutama di daerah yang belum terlayani infrastruktur jaringan konvensional seperti Wi-Fi atau seluler.

Dalam arsitekturnya, modul LoRa E220-400T22D hanya memanfaatkan lapisan LoRa PHY untuk melakukan proses modulasi serta demodulasi sinyal menggunakan teknik Chirp Spread Spectrum (CSS), sehingga komunikasi dapat berlangsung secara point-to-point tanpa perlu melibatkan protokol LoRaWAN. Modul ini merupakan perangkat transceiver keluaran EBYTE yang dibangun dengan chip Semtech LLCC68, serta menggunakan antarmuka serial UART (TX, RX) sehingga mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler, termasuk ESP32 yang digunakan dalam penelitian ini. Secara teknis, LoRa E220-400T22D beroperasi pada frekuensi 410–441 MHz dengan daya pancar maksimum mencapai 22 dBm (160 mW), sensitivitas penerimaan hingga -129 dBm, dan mampu menjangkau komunikasi sejauh ± 5 km dalam kondisi line of sight. Selain itu, modul ini mendukung beberapa mode kerja seperti normal mode, WOR (wake on radio), mode konfigurasi, serta sleep mode untuk efisiensi energi. Pemilihan modul ini didasarkan pada keunggulannya dalam menyediakan jangkauan komunikasi yang luas, fleksibilitas dalam pengaturan parameter, serta konsumsi daya yang rendah sehingga ideal untuk sistem monitoring lingkungan berbasis IoT.

Kelebihan penggunaan LoRa adalah jangkauan komunikasinya yang sangat jauh dibandingkan teknologi nirkabel lain seperti Wi-Fi atau Bluetooth, konsumsi daya yang rendah, serta ketahanannya terhadap interferensi. LoRa juga memiliki skalabilitas yang baik, sehingga dapat digunakan untuk menghubungkan banyak node sensor sekaligus. Meskipun demikian, LoRa juga memiliki keterbatasan, yaitu kecepatan data yang rendah (sekitar 0,3 kbps hingga 50 kbps) sehingga tidak cocok untuk mengirimkan data berukuran besar, serta latensi yang relatif tinggi sehingga tidak sesuai untuk aplikasi yang memerlukan respons real-time sangat cepat. Namun, untuk aplikasi monitoring lingkungan yang hanya mengirimkan data sensor berupa angka sederhana, keterbatasan tersebut tidak menjadi kendala.

Dalam implementasi pada penelitian ini, modul LoRa E220 dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 melalui pin UART, di mana pin TX modul dihubungkan ke pin RX ESP32 dan sebaliknya pin RX modul ke pin TX ESP32. Sementara itu, pin M0 dan M1 pada modul digunakan untuk mengatur mode kerja. Misalnya, pengaturan logika menandakan mode normal, untuk mode WOR, untuk mode konfigurasi, dan untuk mode tidur. Selain itu, modul E220 juga dilengkapi konektor antena eksternal jenis IPEX yang berfungsi meningkatkan jangkauan komunikasi. Data dari sensor lingkungan berupa konsentrasi CO₂, PM2.5, kelembapan, serta kebisingan diproses oleh ESP32 kemudian dikirimkan melalui LoRa menuju gateway penerima. Selanjutnya, data dari gateway diteruskan ke platform IoT untuk ditampilkan secara real-time melalui dashboard monitoring.

Tabel 2. 12 Datasheet Modul LoRa E220-400T22D [38].

Parameter	Nilai
Frekuensi	410 – 493 MHz
Data Rate	2.4 – 62 Kbps
Sensitivitas	-148 dBm
Tx Power	22 dBm
Tegangan	5.5 V
Arus Rx	168 mA
Arus Tx	110 mA
Suhu	-40 °C +85 °C

2.2.16 Antena



Gambar 2. 12 Antena 433 MHz

Antena merupakan komponen vital dalam sistem komunikasi nirkabel yang berperan dalam mengubah sinyal listrik menjadi gelombang elektromagnetik saat pemancaran, dan sebaliknya mengubah gelombang elektromagnetik kembali menjadi sinyal listrik saat penerimaan. Pada sistem monitoring lingkungan berbasis LoRa dengan frekuensi kerja 433 MHz, antena menjadi faktor utama yang menentukan jangkauan serta stabilitas transmisi data antara perangkat sensor dan pusat penerima. Kinerja antena 433 MHz sangat ditentukan oleh parameter-parameter penting seperti frekuensi kerja, gain, polaritas, serta nilai VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Penyesuaian frekuensi antena dengan modul komunikasi yang bekerja pada 433 MHz wajib dilakukan agar sinyal dapat dipancarkan dan diterima secara maksimal tanpa kehilangan daya yang signifikan.

Selain itu, penyesuaian impedansi antena dengan perangkat pemancar maupun penerima yang umumnya bernilai 50 ohm juga sangat penting. Kesesuaian impedansi akan mengurangi pantulan sinyal dan meningkatkan efisiensi transmisi. Faktor eksternal seperti posisi dan ketinggian antena turut memengaruhi performa, di mana pemasangan antena 433 MHz pada titik yang lebih tinggi serta bebas dari penghalang fisik seperti bangunan atau pepohonan akan mengurangi redaman sinyal sekaligus memperluas jangkauan komunikasi. Dengan karakteristik tersebut, antena 433 MHz terbukti mampu mendukung kebutuhan komunikasi jarak jauh berdaya rendah yang dibutuhkan dalam aplikasi IoT maupun sistem monitoring di lapangan [39].

2.2.17 Adaptor 5V 3A



Gambar 2. 13 Adaptor 5V 3A

Adaptor merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengubah sumber listrik utama, seperti tegangan 220V AC dari PLN, menjadi tegangan DC yang lebih rendah, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan perangkat. Dalam sistem monitoring lingkungan berbasis LoRa, adaptor memiliki peranan penting sebagai pemasok daya untuk mikrokontroler, modul komunikasi, dan sensor-sensor yang terhubung. Salah satu tipe adaptor yang umum digunakan adalah adaptor dengan keluaran 5V 3A. Spesifikasi ini berarti adaptor mampu memberikan tegangan tetap sebesar 5 volt DC dengan arus maksimum hingga 3 ampere. Tegangan 5V sendiri merupakan standar yang banyak digunakan oleh berbagai perangkat berbasis mikrokontroler, seperti ESP32, Arduino, dan Raspberry Pi. Dengan kapasitas arus sebesar 3A, adaptor ini sanggup menyediakan daya total hingga 15 watt, sehingga cukup untuk menopang beberapa modul sekaligus tanpa mengurangi stabilitas kinerja sistem.

Secara prinsip, adaptor 5V 3A umumnya menggunakan teknologi switching power supply. Teknologi ini memanfaatkan rangkaian konversi elektronik berfrekuensi tinggi yang mampu mengubah tegangan AC menjadi DC secara lebih efisien dibandingkan adaptor konvensional. Kelebihan sistem switching ini antara lain ukuran yang lebih ringkas, efisiensi energi yang tinggi, serta kemampuan menjaga kestabilan tegangan dengan panas yang minim. Kestabilan keluaran adaptor menjadi aspek yang sangat penting, sebab tegangan yang turun dapat menyebabkan perangkat gagal bekerja atau mati mendadak, sedangkan tegangan yang naik melebihi batas justru berpotensi merusak komponen elektronik.

Untuk meningkatkan keamanan dan keandalan, adaptor berkualitas biasanya telah dilengkapi dengan fitur perlindungan internal seperti over-voltage protection (OVP) untuk mencegah lonjakan tegangan, over-current protection (OCP) untuk mengantisipasi arus berlebih, serta short-circuit protection (SCP) yang melindungi perangkat dari risiko hubung singkat. Dengan adanya fitur-fitur tersebut, adaptor 5V 3A tidak hanya berfungsi sebagai sumber daya, tetapi juga berperan dalam menjaga keselamatan dan keandalan sistem monitoring lingkungan berbasis IoT [40].

2.2.18 LCD 16x2 I2C



Gambar 2. 14 LCD 16x2 I2C

LCD 16x2 berbasis antarmuka I²C merupakan salah satu modul tampilan yang banyak digunakan dalam sistem elektronik karena kesederhanaan integrasinya dengan mikrokontroler. Berbeda dengan mode paralel yang membutuhkan banyak pin data dan kontrol, antarmuka I²C hanya memerlukan dua jalur komunikasi, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial Clock), sehingga penggunaan pin mikrokontroler menjadi lebih efisien. Modul ini tetap memiliki kemampuan menampilkan hingga 32 karakter (16 karakter per baris dalam 2 baris), dengan dukungan karakter ASCII, simbol khusus, maupun karakter kustom melalui CGRAM (Character Generator RAM).

Secara teknis, LCD 16x2 I²C dilengkapi dengan IC ekspander I/O seperti PCF8574 yang berfungsi menghubungkan jalur paralel LCD dengan komunikasi serial I²C. Fitur ini membuat proses pemrograman lebih sederhana serta kompatibel dengan berbagai platform mikrokontroler, termasuk Arduino dan ESP32. Modul juga dilengkapi backlight untuk meningkatkan keterbacaan dalam kondisi

pencahayaannya rendah. Tegangan kerja yang umum digunakan adalah 5V DC dengan konsumsi arus yang relatif kecil, sehingga sangat sesuai untuk perangkat portabel maupun aplikasi hemat energi.

Keunggulan utama LCD 16x2 dengan antarmuka I²C adalah efisiensi penggunaan pin, konsumsi daya rendah, biaya yang ekonomis, dan kemudahan implementasi. Oleh karena itu, modul ini sering dipilih dalam sistem monitoring, prototipe berbasis IoT, maupun perangkat tertanam yang membutuhkan tampilan sederhana tetapi informatif [41].

2.2.19 Volt Meter



Gambar 2. 15 Volt Meter

Voltmeter merupakan instrumen pengukuran listrik yang digunakan untuk mengetahui besar tegangan pada suatu sumber daya maupun rangkaian. Dalam aplikasi pada aki (accumulator), voltmeter berfungsi memantau tegangan terminal aki yang menjadi indikator utama kondisi kapasitas serta kesehatannya. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada pengukuran beda potensial listrik antara kutub positif dan negatif. Aki umumnya memiliki tegangan nominal 12 volt DC, dengan nilai aktual yang dapat bervariasi tergantung tingkat pengisian, kondisi pemakaian, maupun adanya kerusakan. Sebagai contoh, aki yang dalam kondisi penuh biasanya menunjukkan tegangan sekitar 12,6 – 12,8 volt, sedangkan jika tegangannya turun di bawah 11,8 volt, hal ini mengindikasikan aki dalam keadaan lemah dan membutuhkan pengisian ulang.

Dalam pengukurannya, voltmeter selalu dipasang secara paralel dengan terminal aki agar dapat membaca beda potensial tanpa mengganggu aliran arus utama ke beban. Agar hasil pengukuran akurat, voltmeter didesain dengan resistansi

internal tinggi, sehingga arus yang ditarik ke alat ukur sangat kecil dan tidak memengaruhi tegangan aki itu sendiri.

Terdapat dua jenis voltmeter yang umum digunakan, yaitu analog dan digital. Voltmeter analog menggunakan jarum penunjuk pada skala, sedangkan voltmeter digital menampilkan angka secara langsung melalui layar LCD atau LED. Saat ini, voltmeter digital lebih banyak dipilih karena memberikan hasil pengukuran yang cepat, akurat, dan mudah dibaca. Pemantauan tegangan aki dengan voltmeter sangat penting, baik di bidang otomotif maupun sistem tenaga cadangan (backup power), karena membantu mendeteksi lebih awal kebutuhan perawatan atau penggantian aki sehingga keandalan sistem tetap terjaga [42].

2.2.20 Arduino IDE



Gambar 2. 16 Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) merupakan perangkat lunak open-source yang dirancang sebagai sarana pemrograman untuk berbagai jenis mikrokontroler Arduino. Lingkungan pengembangan ini memiliki antarmuka yang sederhana serta ramah pengguna, sehingga memudahkan proses menulis, mengedit, menyusun, hingga mengunggah program (sketch) langsung ke papan mikrokontroler melalui koneksi USB.

Arduino IDE dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Java dengan dukungan pustaka C/C++ (wiring), yang berfungsi untuk menyederhanakan interaksi dengan perangkat keras. Melalui library tersebut, pengguna dapat dengan mudah membaca data sensor, mengontrol aktuator seperti motor, relay, maupun LED, serta mengatur komunikasi serial antar perangkat.

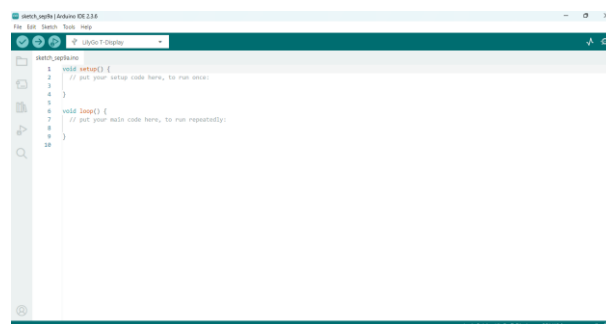
Beberapa fungsi utama Arduino IDE antara lain:

- Menyusun dan menuliskan kode program sesuai logika yang diinginkan.

- Mengompilasi kode menjadi instruksi biner yang dapat dieksekusi oleh mikrokontroler.
- Mengunggah program ke papan mikrokontroler seperti Arduino Uno, Mega, Nano, hingga ESP32.
- Mendukung penambahan board lain melalui fitur Board Manager, sehingga fleksibel untuk berbagai platform.

Struktur dasar pemrograman Arduino terdiri dari dua bagian utama, yaitu `setup()` dan `loop()`. Fungsi `setup()` dijalankan sekali saat papan pertama kali menyala atau setelah reset, umumnya digunakan untuk inisialisasi seperti mengatur pin input/output atau memulai komunikasi serial. Sementara itu, fungsi `loop()` berjalan berulang-ulang selama perangkat menyala, sehingga memungkinkan sistem untuk membaca sensor, memberikan output, serta menjalankan logika kontrol secara terus-menerus.

Selain struktur program, Arduino IDE mendukung penggunaan variabel dengan berbagai tipe data seperti `int`, `long`, `boolean`, `float`, maupun `char`, sesuai kebutuhan penyimpanan nilai. IDE ini juga dilengkapi berbagai fungsi bawaan, misalnya fungsi analog I/O (`analogRead()`, `analogWrite()`), fungsi waktu (`millis()`, `delay()`), serta fungsi matematika (`min()`, `max()`, `abs()`, `sqrt()`, `pow()`) yang memudahkan pengembangan aplikasi. Dengan kemudahan antarmuka, ketersediaan pustaka, dan fleksibilitas integrasi perangkat keras, Arduino IDE menjadi salah satu platform yang sangat populer dalam pengembangan sistem tertanam (embedded system) dan aplikasi IoT [43].



Gambar 2. 17 Struktur Tampilan Arduino IDE

2.2.21 ThingSpeak

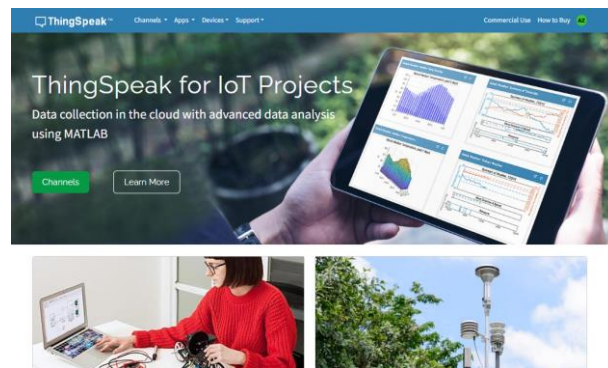


Gambar 2. 18 ThingSpeak

ThingSpeak merupakan sebuah platform IoT (Internet of Things) berbasis cloud yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, serta memvisualisasikan data sensor secara real-time. Dalam sistem monitoring lingkungan, ThingSpeak berfungsi sebagai media penghubung antara perangkat keras (seperti ESP32 dan sensor) dengan server penyimpanan data, sehingga informasi yang diperoleh dapat ditampilkan dalam bentuk grafik maupun angka secara langsung melalui antarmuka web.

Prinsip kerja ThingSpeak didasarkan pada komunikasi data menggunakan protokol HTTP atau MQTT, di mana perangkat mikrokontroler mengirimkan data ke server ThingSpeak melalui internet. Setiap pengguna memiliki Channel yang terdiri dari beberapa Field sebagai tempat penyimpanan data sensor yang berbeda. Data yang masuk kemudian dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik interaktif, dibandingkan antar parameter, atau dianalisis lebih lanjut menggunakan integrasi MATLAB Analytics yang sudah tertanam di dalamnya. ThingSpeak sangat fleksibel karena mendukung berbagai jenis perangkat IoT seperti Arduino, ESP8266, ESP32, dan Raspberry Pi. Keunggulannya terletak pada kemudahan konfigurasi, kemampuan pemantauan data secara real-time, serta adanya fitur notifikasi yang dapat dihubungkan dengan layanan pihak ketiga. Platform ini juga mendukung aplikasi monitoring jangka panjang karena data yang tersimpan di server dapat diakses kapan saja, baik untuk analisis maupun prediksi.

Dalam implementasi praktis, ThingSpeak sering digunakan untuk monitoring lingkungan, smart agriculture, energi terbarukan, hingga smart home system. Dengan kemampuan penyimpanan berbasis cloud, pengguna dapat melakukan pemantauan data dari lokasi yang jauh tanpa perlu membangun server pribadi, sehingga lebih efisien dan ekonomis. Oleh karena itu, ThingSpeak menjadi salah satu solusi yang populer dalam pengembangan sistem berbasis IoT modern.



Gambar 2. 19 Tampilan ThingSpeak