

BAB II

LANDASANTEORI

2.1 IOT(InternetofThings)

Internet of Things (IoT), yang juga dikenal dengan istilah *Internet of Everything*, *Cloud Computing*, atau *Industrial Internet*, adalah paradigma teknologi baru yang mengubah cara perangkat fisik berinteraksi satu sama lain. *IoT* menciptakan jaringan global yang menghubungkan berbagai benda fisik seperti perangkat elektronik, sensor, dan mesin, memungkinkan mereka untuk berkomunikasi, bertukar data, dan bekerja secara otomatis. [5] Teknologi ini memungkinkan terciptanya sistem yang lebih cerdas, efisien, dan terintegrasi dalam berbagai bidang kehidupan. [6]

Dalam konsep *IoT*, perangkat-perangkat yang saling terhubung dapat mengumpulkan data dari lingkungan, mengirimkan informasi ke sistem pusat, dan menerima instruksi untuk melakukan tindakan tertentu. Misalnya, sensor suhu dapat mengirimkan informasi ke sistem pemanas untuk secara otomatis menyesuaikan suhu ruangan. [7] Interaksi semacam ini dimungkinkan melalui koneksi *internet*, protokol komunikasi standar, dan pemrosesan data berbasis *cloud*, sehingga memberikan efisiensi tinggi dan kemudahan dalam pengelolaan perangkat. [8]

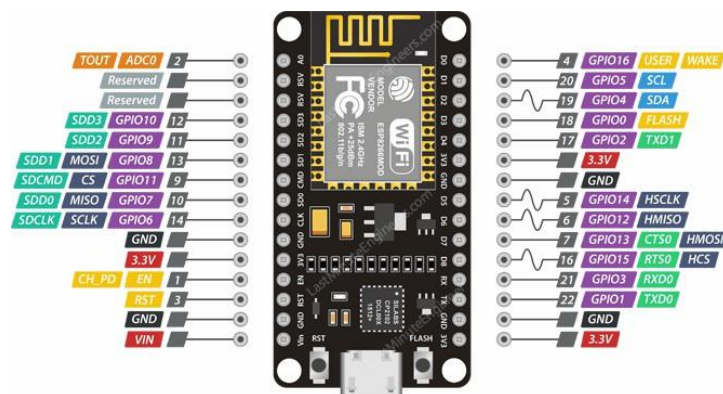
IoT telah menjadi landasan bagi banyak inovasi, seperti rumah pintar, kota pintar, *Industri 4.0*, dan transportasi cerdas. [9] Dalam industri, *IoT* dikenal sebagai *Industrial Internet*, yang digunakan untuk meningkatkan produktivitas melalui pemantauan *real-time* dan otomatisasi proses. Meskipun membawa banyak keuntungan, *IoT* juga menimbulkan tantangan, terutama dalam hal

keamanan data dan *interoperabilitas* antar perangkat. Namun, potensi *IoT* dalam menciptakan ekosistem yang terhubung menjadikannya teknologi masa depan yang sangat menjanjikan. [10]

2.2 ESP8266

ESP8266 adalah mikrokontroler berbasis *Wi-Fi* yang dirancang oleh *Espressif Systems*, dan sering digunakan dalam berbagai proyek *Internet of Things (IoT)*. Modul ini terkenal karena kemampuannya untuk terhubung ke jaringan *Wi-Fi* dengan biaya yang relatif terjangkau. [11]

Dengan ukuran yang kecil dan konsumsi daya yang rendah, *ESP8266* menjadi pilihan favorit bagi para pengembang yang ingin menciptakan perangkat pintar seperti sistem otomatisasi rumah, sensor lingkungan, hingga perangkat pemantauan jarak jauh. [12]



Gambar 2. 1 Gambar Microcontroller ESP8266

Secara teknis, *ESP8266* dilengkapi dengan prosesor *Tensilica L106* berkecepatan hingga 80 MHz, memori *flash*, dan *RAM* yang cukup untuk menjalankan tugas-tugas sederhana. Modul ini memiliki beberapa *GPIO (General*

Purpose Input/Output) untuk menghubungkan perangkat eksternal seperti sensor dan aktuator. [13]

ESP8266 dapat diprogram menggunakan berbagai platform, termasuk *Arduino IDE* dan *Lua*, sehingga memudahkan pengembang dari berbagai tingkat keahlian untuk mengintegrasikan modul ini ke dalam proyek mereka. [14]

ESP8266 sangat fleksibel dalam penggunaannya, baik untuk aplikasi sederhana maupun kompleks. Sebagai contoh, modul ini dapat digunakan untuk membuat sistem pemantauan suhu yang terhubung ke aplikasi *smartphone*, atau sebagai pengontrol lampu yang dapat dioperasikan melalui jaringan *Wi-Fi*. [15]

Meskipun fitur-fiturnya cukup mumpuni, *ESP8266* memiliki keterbatasan, terutama dalam hal jumlah *GPIO* yang relatif sedikit dan tidak adanya dukungan *Bluetooth*. Meski demikian, kemudahan penggunaan dan harganya yang ekonomis menjadikan *ESP8266* sebagai salah satu solusi populer untuk pengembangan perangkat *IoT*. [16]

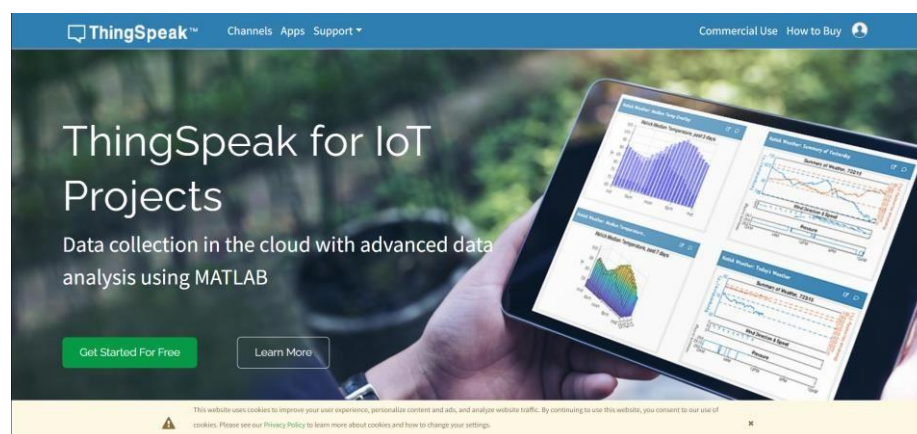
2.3 ThingSpeak

ThingSpeak adalah platform berbasis *cloud* yang dirancang khusus untuk mendukung pengembangan proyek *Internet of Things (IoT)*. Platform ini memungkinkan pengguna untuk mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, dan memvisualisasikan data dari berbagai perangkat *IoT* secara *real-time*. *ThingSpeak* menawarkan layanan gratis maupun berbayar yang dapat digunakan untuk memantau sensor, mengontrol perangkat, atau membuat model analisis data secara efisien. [17]

Salah satu fitur utama *ThingSpeak* adalah kemampuan untuk menerima data dari perangkat *IoT*, seperti *ESP8266* atau *ESP32*, melalui protokol *HTTP* atau *MQTT*. Data yang diterima dapat disimpan dalam *channel*, yang terdiri dari beberapa *field* untuk berbagai jenis data, seperti suhu, kelembapan, atau intensitas cahaya.

Selain itu, *ThingSpeak* menyediakan alat analitik seperti *MATLAB* untuk memproses data, sehingga pengguna dapat membuat keputusan yang lebih baik berdasarkan data yang dikumpulkan. Platform ini sangat cocok untuk proyek-proyek yang membutuhkan analisis data secara *real-time*, seperti pengelolaan energi, sistem pemantauan lingkungan, atau perangkat rumah pintar. [18]

Dengan antarmuka yang mudah digunakan dan kemampuan integrasi yang luas, *ThingSpeak* memberikan solusi praktis bagi pemula maupun pengembang profesional. [19]



Gambar 2. 2 PlatformThingSpeak

ThingSpeak banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari sistem pemantauan lingkungan hingga kontrol perangkat jarak jauh. Sebagai contoh, platform ini dapat membantu pengguna memantau suhu ruangan melalui sensor

yang terhubung dengan *ESP8266*, lalu menampilkan data tersebut dalam bentuk grafik secara *real-time*. Dengan antarmuka yang sederhana dan dukungan integrasi dengan platform seperti *IFTTT* dan *Twitter*, *ThingSpeak* menjadi pilihan populer bagi pengembang *IoT* yang ingin membuat proyek pintar tanpa harus mengelola *server* sendiri. [20]

Setiap *channel* memiliki beberapa *field* yang dapat digunakan untuk merekam data spesifik, seperti suhu, kelembapan, atau tekanan. *ThingSpeak* juga mendukung pengiriman data melalui protokol *HTTP*, *MQTT*, atau *REST API*, sehingga memudahkan perangkat *IoT* untuk mengirim data dari mana saja. [21]

2.4 Software Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) adalah perangkat lunak *open source* yang dirancang khusus untuk memprogram papan mikrokontroler *Arduino* dan berbagai perangkat berbasis mikrokontroler lainnya, seperti *ESP8266*, *ESP32*, dan papan lainnya yang mendukung *Arduino*.

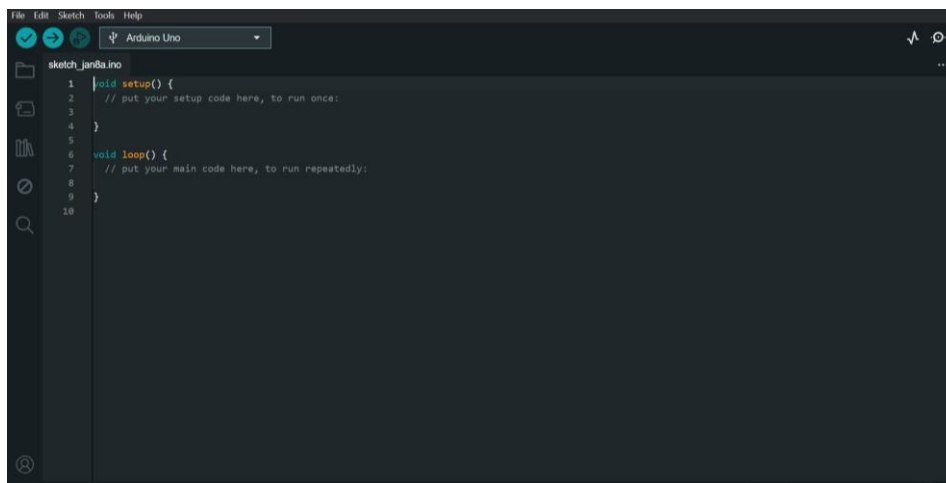
Arduino IDE memungkinkan pengguna untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program ke perangkat keras dengan cara yang sederhana dan mudah dipahami. Salah satu alasan mengapa *Arduino IDE* begitu populer adalah antarmuka yang ramah pengguna, sehingga dapat digunakan oleh pemula sekalipun tanpa perlu pengalaman mendalam dalam pemrograman. Platform ini menggunakan bahasa pemrograman berbasis *C/C++*, yang memberi pengembang fleksibilitas dalam menulis kode untuk berbagai aplikasi dan proyek. [22]

Arduino IDE hadir dengan berbagai fitur yang memudahkan pengguna dalam menulis dan mengelola kode program. Fitur utama yang disediakan adalah

code editor yang mendukung penyorotan sintaksis (*syntax highlighting*) untuk memudahkan pembacaan kode, pelengkapan otomatis (*auto-completion*), serta pengecekan kesalahan kompilasi yang membantu pengguna untuk menemukan dan memperbaiki kesalahan pada kode sebelum diunggah ke perangkat.

Arduino IDE juga menyediakan alat untuk memprogram perangkat dengan mudah, melalui tombol "Upload" yang langsung mengunggah program ke papan mikrokontroler melalui kabel *USB* atau koneksi nirkabel. Dengan antarmuka yang minimalis, pengguna tidak akan merasa kesulitan untuk memulai pemrograman.

[23]



Gambar 2. 3 Software Arduino IDE

Salah satu kekuatan utama *Arduino IDE* adalah pustaka (*library*) yang luas dan terus berkembang, yang memungkinkan pengguna untuk menambahkan fungsi tambahan ke dalam proyek mereka. Pustaka ini mencakup berbagai jenis modul perangkat keras seperti sensor suhu, sensor gerak, motor, layar *LCD*, serta modul komunikasi seperti *Wi-Fi* dan *Bluetooth*. Dengan menggunakan pustaka ini, pengguna tidak perlu menulis kode dari awal untuk menangani perangkat

keras tertentu, sehingga menghemat waktu dan mempermudah proses pengembangan. [24]

Selain itu, *Arduino IDE* juga menyediakan berbagai contoh program (*sketches*) yang dapat digunakan sebagai referensi atau titik awal dalam membuat aplikasi yang lebih kompleks. [25]

Arduino IDE juga mendukung berbagai perangkat keras lain yang kompatibel dengan *Arduino*, seperti *ESP8266*, *ESP32*, dan papan mikrokontroler lainnya. Untuk menggunakan perangkat keras selain *Arduino*, pengguna cukup instal pustaka dan *board manager* yang sesuai. Misalnya, untuk memprogram *ESP32*, pengguna dapat mengunduh *board manager* khusus yang memungkinkan *IDE* untuk mengenali dan mengunggah kode ke papan *ESP32*.

Hal ini memungkinkan pengembang untuk memanfaatkan potensi penuh dari berbagai mikrokontroler, seperti kemampuan *Wi-Fi* dan *Bluetooth* pada *ESP32*, atau komunikasi jarak jauh dengan *ESP8266*.

Arduino IDE menjadi platform pilihan utama bagi banyak pengembang hobi dan profesional dalam membangun berbagai jenis proyek elektronik dan *IoT*, mulai dari robotika, alat pemantauan lingkungan, hingga perangkat otomasi rumah pintar. Kemudahan penggunaan, fleksibilitas, dan ekosistem yang luas menjadikan *Arduino IDE* alat yang sangat efisien untuk *prototyping* cepat dan pengembangan perangkat keras.

Dengan terus berkembangnya teknologi dan dukungan dari komunitas yang kuat, *Arduino IDE* tetap menjadi pilihan utama dalam dunia pengembangan elektronik. [26]

2.5 Bahasa Pemrograman

Bahasa pemrograman adalah sekumpulan aturan dan *sintaksis* yang digunakan untuk menulis instruksi yang dapat dipahami dan dijalankan oleh komputer atau perangkat keras lainnya. Dalam dunia pengembangan perangkat lunak dan perangkat keras, bahasa pemrograman menjadi alat utama yang memungkinkan manusia untuk berkomunikasi dengan mesin.

Dengan menggunakan bahasa pemrograman, *programmer* dapat membuat aplikasi, sistem, dan perangkat yang dapat melaksanakan tugas tertentu secara otomatis. Bahasa pemrograman dapat berupa bahasa tingkat tinggi, yang lebih mudah dipahami manusia, atau bahasa tingkat rendah, yang lebih mendekati bahasa mesin. [27]

Bahasa pemrograman dibagi menjadi berbagai jenis tergantung pada tujuan dan fungsinya. Beberapa contoh bahasa pemrograman tingkat tinggi yang sering digunakan antara lain *Python*, *Java*, *C++*, dan *JavaScript*. Bahasa-bahasa ini lebih mudah dipelajari karena *sintaksis*-nya yang mirip dengan bahasa manusia dan dapat digunakan untuk berbagai jenis aplikasi, mulai dari aplikasi *desktop*, aplikasi *web*, hingga perangkat *IoT*. Selain itu, ada juga bahasa pemrograman yang lebih khusus, seperti bahasa pemrograman untuk mikrokontroler seperti *C/C++* yang digunakan pada platform *Arduino*, atau *Python* untuk pengembangan *AI* dan analisis data.

Bahasa pemrograman dapat digunakan untuk berbagai tujuan, mulai dari pengembangan perangkat lunak, aplikasi *mobile*, hingga pengendalian perangkat keras seperti robot atau sistem *IoT*. Beberapa bahasa pemrograman lebih cocok

untuk aplikasi tertentu. Misalnya, *Python* sering digunakan untuk pengembangan aplikasi berbasis *web* dan analisis data, sedangkan *C* dan *C++* banyak digunakan dalam pengembangan perangkat keras dan aplikasi yang membutuhkan pengolahan cepat. Selain itu, ada pula bahasa pemrograman yang lebih terfokus pada pengembangan sistem operasi atau aplikasi yang sangat efisien dalam pengelolaan sumber daya komputer, seperti *Assembly* dan *Rust*. [28]

Proses pemrograman melibatkan penulisan kode menggunakan bahasa pemrograman tertentu, yang kemudian diterjemahkan oleh *compiler* atau *interpreter* menjadi instruksi yang dapat dijalankan oleh komputer. Di setiap tingkat bahasa pemrograman, ada alat dan perangkat lunak yang membantu *programmer* menulis dan menguji kode mereka. Misalnya, *Integrated Development Environment (IDE)* seperti *Arduino IDE* atau *Visual Studio Code* menyediakan alat-alat yang mempermudah penulisan, *debugging*, dan pengujian kode. Meskipun ada banyak bahasa pemrograman yang tersedia, pilihan bahasa biasanya bergantung pada jenis aplikasi yang ingin dibuat, tingkat kesulitan, dan kebutuhan performa yang diinginkan. [29]

2.6 LCD16x2

LCD 16x2 adalah jenis layar kristal cair (*Liquid Crystal Display*) yang sangat populer dalam dunia elektronik, terutama pada proyek-proyek berbasis mikrokontroler seperti *Arduino*, *ESP32*, atau *ESP8266*. *LCD* ini memiliki kemampuan untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks dengan dua baris, masing-masing terdiri dari 16 karakter.

Ukuran layar yang kompak dan kemampuannya untuk menampilkan teks

membuatnya ideal untuk aplikasi yang memerlukan antarmuka pengguna sederhana, seperti menampilkan status sistem, pembacaan sensor, atau pesan informasi lainnya. [30]



Gambar 2. 4 LCD 16X2

LCD 16x2 umumnya menggunakan modul *HD44780* atau yang kompatibel, dengan *controller* yang mendukung pengoperasian teks dalam format 16 kolom dan 2 baris. Modul ini terhubung ke mikrokontroler melalui beberapa *pin kontrol*, termasuk *pin* untuk pengiriman data (*data pins*), serta *pin* untuk mengontrol pembacaan dan penulisan data (*control pins*). Salah satu keunggulan dari *LCD 16x2* adalah kemampuannya untuk dikendalikan menggunakan sedikit *pin*, dengan banyak mikrokontroler yang menawarkan mode pengoperasian *4-bit* atau *8-bit* untuk komunikasi data. [31]

Untuk mengontrol *LCD 16x2*, kita sering kali menggunakan pustaka (*library*) yang sudah disediakan oleh berbagai platform pengembangan seperti *Arduino*. Pustaka ini memungkinkan pengguna untuk menampilkan teks, menggulirkan pesan, atau mengubah posisi *cursor* di layar dengan mudah. *LCD 16x2* juga memiliki kemampuan untuk menampilkan karakter khusus atau simbol

yang dapat diprogram untuk menggantikan karakter standar. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menampilkan berbagai informasi atau indikator visual tambahan, seperti ikon atau grafik sederhana, yang sangat berguna dalam aplikasi seperti sistem *monitoring* atau *kontrol*.

Dalam penggunaannya, *LCD 16x2* dapat dikoneksikan dengan berbagai jenis mikrokontroler melalui koneksi paralel menggunakan beberapa *pin GPIO*. *Pin* yang biasa digunakan meliputi *pin VCC* dan *GND* untuk daya, serta *pin RS* (*Register Select*), *E* (*Enable*), dan *data pins* (*D4–D7*) yang digunakan untuk komunikasi antara mikrokontroler dan *LCD*. Dengan menggunakan resistor atau potensiometer, kecerahan layar dapat disesuaikan sesuai kebutuhan pengguna. *LCD 16x2* sering digunakan dalam berbagai aplikasi praktis, mulai dari sistem pemantauan suhu dan kelembapan hingga antarmuka perangkat *IoT* yang menampilkan status operasi perangkat. [32]

2.7 Sensor Gas MQ-2

Sensor gas *MQ-2* adalah sensor yang dirancang untuk mendeteksi berbagai jenis gas, termasuk metana (CH_4), propana (C_3H_8), asap, dan karbon monoksida (CO). Sensor ini banyak digunakan dalam proyek-proyek keamanan dan pemantauan lingkungan, seperti sistem deteksi kebocoran gas atau pemantauan kualitas udara.

MQ-2 dapat memberikan *output* analog yang dapat dihubungkan ke mikrokontroler, seperti *Arduino*, *ESP8266*, atau *ESP32*, untuk membaca konsentrasi gas yang ada di sekitarnya. Dengan sensitivitas yang dapat disesuaikan menggunakan resistor, sensor ini mampu mendeteksi keberadaan gas

pada tingkat konsentrasi yang rendah hingga tinggi.

Sensor *MQ-2* menggunakan elemen sensor berbasis *metal-oxide semiconductor (MOS)* yang akan mengubah resistansi listriknya saat terpapar gas tertentu. Ketika gas seperti metana atau karbon monoksida terdeteksi, resistansi sensor akan berubah, yang kemudian diubah menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Sebagai hasilnya, sensor ini sangat ideal digunakan untuk aplikasi yang memerlukan deteksi dini terhadap kebocoran gas berbahaya atau perubahan kualitas udara yang signifikan. Untuk memperoleh pembacaan yang lebih akurat, sensor *MQ-2* sering memerlukan waktu pemanasan selama beberapa detik hingga menit setelah pertama kali dihidupkan. [33]



Gambar 2. 5 SensorGasMQ-2

Sensor gas *MQ-2* memiliki beberapa keunggulan, termasuk biaya yang relatif rendah dan kemudahan integrasi dengan berbagai platform pengembangan. Biasanya, sensor ini memiliki *pin* analog yang dapat langsung dihubungkan ke *pin input analog* pada mikrokontroler, serta *pin digital* yang dapat digunakan untuk memberikan *output ON/OFF* berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan.

Selain itu, sensor *MQ-2* dapat disesuaikan sensitivitasnya dengan mengubah resistor pada *pin* pemanasnya, sehingga memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan tingkat deteksi gas dengan kondisi lingkungan yang berbeda.

Meskipun cukup sensitif terhadap gas yang berbeda, sensor ini membutuhkan kalibrasi yang tepat untuk memastikan akurasi deteksi pada berbagai kondisi. [34]

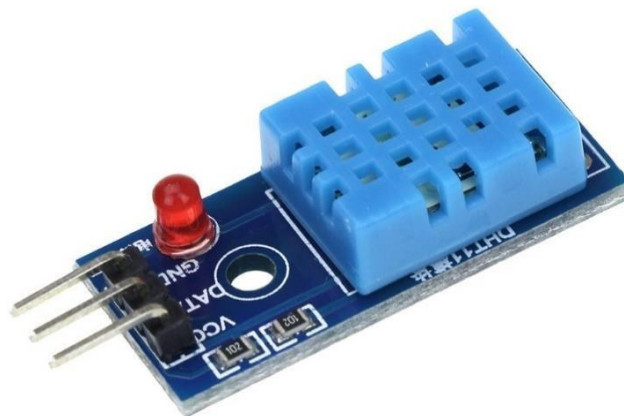
Dalam penggunaannya, sensor *MQ-2* sering diintegrasikan dengan perangkat lain untuk membangun sistem deteksi kebocoran gas otomatis atau sistem pemantauan kualitas udara. Misalnya, dalam proyek berbasis mikrokontroler, sensor *MQ-2* dapat dipasang bersama dengan *buzzer alarm* atau sistem notifikasi seperti aplikasi *smartphone* untuk memberikan peringatan kepada pengguna jika terdeteksi konsentrasi gas yang tinggi. [35]

Dengan adanya sensor ini, berbagai aplikasi rumah pintar atau sistem keamanan industri dapat menjadi lebih aman dengan deteksi kebocoran gas secara *real-time*, membantu mencegah potensi bahaya seperti ledakan atau keracunan. [36]

2.8 Sensor DHT-11

Sensor *DHT-11* adalah sensor suhu dan kelembaban digital yang banyak digunakan dalam proyek elektronik dan *Internet of Things (IoT)* untuk mengukur suhu dan kelembaban lingkungan. Sensor ini memiliki desain yang kompak dan mudah digunakan, menjadikannya pilihan populer di kalangan hobiis dan pengembang pemula. *DHT-11* menggunakan teknologi sensor kapasitif untuk mengukur kelembaban dan *thermistor* untuk suhu, memberikan data yang dapat dibaca oleh mikrokontroler seperti *Arduino* atau *ESP8266*. Dengan rentang pengukuran suhu antara 0°C hingga 50°C dan kelembaban antara 20% hingga 80%, sensor ini cukup untuk aplikasi yang tidak memerlukan pengukuran suhu atau kelembaban yang sangat ekstrem. [37]

DHT-11 mengirimkan data digital melalui protokol satu kabel (*single-wire*), yang berarti hanya membutuhkan satu *pin* pada mikrokontroler untuk komunikasi data. Meskipun sensor ini tidak seakurat sensor suhu dan kelembaban profesional lainnya, seperti *DHT-22* atau *SHT-15*, *DHT-11* cukup baik untuk aplikasi yang tidak memerlukan tingkat akurasi tinggi. Sensor ini juga memiliki waktu pembacaan yang cukup cepat, biasanya sekitar 1 detik, yang memungkinkan penggunaan dalam aplikasi pemantauan suhu dan kelembaban secara *real-time*. Biasanya, *DHT-11* disertai dengan pustaka (*library*) untuk *Arduino*, yang menyederhanakan proses pembacaan data dan mengurangi kebutuhan akan pengkodean yang rumit. [38]



Gambar 2. 6 Sensor DHT-11

Sensor *DHT-11* sangat ideal untuk aplikasi yang memerlukan pemantauan lingkungan sederhana, seperti sistem pemantauan cuaca, rumah pintar, atau proyek-proyek otomatisasi yang memerlukan pengukuran suhu dan kelembaban secara teratur. Dengan harga yang terjangkau, sensor ini sering digunakan dalam proyek-proyek pendidikan atau *prototyping* karena kemudahan dalam penggunaannya dan integrasi yang mudah dengan mikrokontroler. Meskipun

terbatas dalam hal akurasi dan rentang pengukuran, *DHT-11* memberikan performa yang cukup baik dalam kisaran penggunaannya dan sangat bermanfaat untuk pengukuran dasar dalam proyek *IoT*.

Namun, perlu diperhatikan bahwa *DHT-11* memiliki kelemahan jika dibandingkan dengan sensor suhu dan kelembaban lainnya yang lebih canggih. Salah satunya adalah kecepatan pembacaan yang terbatas (satu pembacaan setiap detik) dan sensitivitas yang lebih rendah pada kondisi kelembaban yang sangat rendah atau tinggi. Selain itu, *DHT-11* lebih rentan terhadap kesalahan pembacaan jika berada dalam kondisi yang sangat lembap atau pada suhu ekstrem di luar jangkauannya. Meskipun demikian, bagi aplikasi yang tidak membutuhkan tingkat akurasi tinggi, *DHT-11* adalah pilihan yang baik karena harganya yang terjangkau dan kemudahan dalam penggunaannya. [39]

2.9 Flowchart

Flowchart adalah suatu bagan dengan simbol-simbol tertentu yang menggambarkan urutan proses secara mendetail serta hubungan antara suatu proses (instruksi) dengan proses lainnya dalam suatu program. [40]

Flowchart merupakan bagan yang memiliki arus logika, menggambarkan langkah-langkah penyelesaian suatu masalah. Terdapat dua macam *flowchart* yang menggambarkan proses dengan komputer, yaitu:

a. System Flowchart

Bagan yang memperlihatkan urutan proses dalam sistem dengan menunjukkan alat media *input*, *output*, serta jenis media penyimpanan dalam proses pengolahan data.

b. Program Flowchart

Bagan yang memperlihatkan urutan instruksi yang digambarkan dengan simbol tertentu untuk memecahkan masalah dalam suatu program. [41]

2.10 Standar Kualitas Udara

Kualitas udara merupakan indikator penting dalam menentukan kondisi lingkungan yang sehat bagi kehidupan manusia. Monitoring kualitas udara secara real-time dapat dilakukan menggunakan berbagai sensor elektronik yang mampu mendeteksi parameter-parameter pencemar udara. Dalam penelitian ini, digunakan tiga jenis sensor utama yaitu sensor MQ135 untuk deteksi kualitas udara umum, sensor MQ2 untuk deteksi gas berbahaya, dan sensor debu untuk mengukur konsentrasi partikel debu di udara [42].

2.10.1 Sensor MQ135 untuk Monitoring Kualitas Udara

Sensor MQ135 adalah sensor gas semikonduktor yang sensitif terhadap berbagai gas pencemar udara seperti amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), alkohol, benzena, asap, dan karbon dioksida (CO_2). Sensor ini menggunakan teknologi SnO_2 (timah dioksida) sebagai material sensitif yang mengalami perubahan resistansi ketika terpapar gas-gas tersebut [42].

Berdasarkan standar kualitas udara WHO (World Health Organization) dan EPA (Environmental Protection Agency), kategori kualitas udara dapat diklasifikasikan sebagai berikut [43]:

Tabel 2. 1 Standar Kualitas Udara untuk Sensor MQ135

Parameter	Nilai Sensor	Status Kualitas	Keterangan
MQ135 Reading	< 200	AMAN	Kualitas udara baik, aman untuk aktivitas outdoor
MQ135 Reading	200 - 400	WASPADA	Kualitas udara sedang, mulai tidak sehat untuk kelompok sensitif
MQ135 Reading	> 400	BAHAYA	Kualitas udara buruk, tidak sehat untuk semua kelompok

Nilai pembacaan sensor MQ135 berbanding lurus dengan konsentrasi gas pencemar di udara. Semakin tinggi nilai yang terbaca, semakin buruk kualitas udara di lingkungan tersebut [42].

2.10.2 Sensor MQ2 untuk Deteksi Gas Berbahaya

Sensor MQ2 merupakan sensor gas yang dirancang khusus untuk mendeteksi gas-gas mudah terbakar dan asap, termasuk LPG (Liquefied Petroleum Gas), propana, metana, alkohol, hidrogen, dan asap. Sensor ini menggunakan prinsip kerja perubahan konduktivitas material sensing akibat adsorpsi gas target pada permukaan sensor [42].

Sensor MQ2 memberikan output digital (HIGH/LOW) yang menunjukkan ada tidaknya gas berbahaya yang terdeteksi. Standar keamanan untuk gas berbahaya berdasarkan OSHA (Occupational Safety and Health Administration) adalah sebagai berikut [43]:

Tabel 2. 2 Standar Deteksi Gas Berbahaya Sensor MQ2

Status Output	Kondisi	Tingkat Bahaya	Tindakan
LOW (0)	Tidak ada gas berbahaya	AMAN	Kondisi normal
HIGH (1)	Gas berbahaya terdeteksi	BAHAYA	Evakuasi dan ventilasi segera

Ketika sensor MQ2 mendeteksi adanya gas berbahaya, sistem secara otomatis mengklasifikasikan status lingkungan sebagai "BAHAYA" terlepas dari kondisi sensor lainnya, mengingat gas berbahaya dapat menyebabkan risiko kebakaran atau keracunan [42].

2.10.3 Sensor Debu untuk Monitoring Partikel Udara

Sensor debu (dust sensor) digunakan untuk mengukur konsentrasi partikel debu di udara, termasuk PM2.5 dan PM10 yang dapat membahayakan kesehatan pernapasan. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip hamburan cahaya (light scattering) dimana intensitas cahaya yang dihamburkan sebanding dengan konsentrasi partikel debu [44].

Berdasarkan standar kualitas udara WHO untuk partikel debu, klasifikasi kualitas udara adalah sebagai berikut [43]:

Tabel 2. 3 Standar Kualitas Udara untuk Sensor Debu

Nilai Sensor	Konsentrasi Estimasi	Status Kualitas	Dampak Kesehatan
< 100	PM2.5 < 15 µg/m ³	AMAN	Baik untuk kesehatan
100 - 300	PM2.5 15-35 µg/m ³	WASPADA	Mulai berpengaruh pada kelompok sensitif
> 300	PM2.5 > 35 µg/m ³	BAHAYA	Berbahaya untuk semua kelompok

Paparan partikel debu yang tinggi dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti iritasi mata, gangguan pernapasan, dan dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular [43]