

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi modern yang menghubungkan berbagai perangkat fisik ke jaringan internet untuk memungkinkan komunikasi dan pertukaran data secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. IoT telah menjadi salah satu komponen utama dalam penerapan teknologi cerdas (smart technology), khususnya dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan seperti kualitas udara. Dalam sistem ini, sensor yang terintegrasi dengan mikrokontroler akan bekerja secara real-time untuk membaca kondisi lingkungan sekitar, kemudian mengirimkan data ke platform cloud melalui koneksi internet, agar dapat diakses, dianalisis, dan dimanfaatkan oleh pengguna secara langsung. Salah satu bentuk implementasi nyata dari IoT dalam bidang lingkungan adalah alat pemantauan kualitas udara berbasis ESP32, yang dikombinasikan dengan sensor MQ-135 (untuk mendeteksi gas polutan seperti CO, NO₂, dan benzena) serta DHT11 (untuk membaca suhu dan kelembapan udara). ESP32 dipilih karena memiliki konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, serta mendukung penggunaan banyak sensor dengan konsumsi daya rendah dan kecepatan proses yang tinggi (Muttaqin et al., 2024).

Pada sistem ini, data yang diperoleh dari sensor akan diproses oleh ESP32 dan dikirimkan ke platform Blynk, yaitu layanan IoT berbasis cloud yang menyediakan tampilan antarmuka monitoring secara visual dan dapat diakses melalui smartphone. Blynk tidak hanya memungkinkan visualisasi data dalam

bentuk grafik dan indikator waktu nyata, tetapi juga dapat diprogram untuk mengeksekusi perintah otomatis saat kondisi tertentu terpenuhi, seperti ketika konsentrasi gas berbahaya melampaui ambang batas normal. Dalam implementasi lebih lanjut, sistem ini juga dapat dikombinasikan dengan layanan pengiriman pesan WhatsApp menggunakan API pihak ketiga seperti Twilio, sehingga peringatan kualitas udara dapat langsung dikirimkan ke pengguna dalam bentuk notifikasi real-time melalui aplikasi WhatsApp. Notifikasi ini sangat penting terutama ketika terjadi lonjakan gas berbahaya yang dapat membahayakan masyarakat di sekitar lokasi industri. Studi oleh Sitorus dan Hidayat (2023) menunjukkan bahwa integrasi sensor MQ-135 dan DHT11 dengan ESP32 serta sistem notifikasi WhatsApp berbasis Blynk mampu mendeteksi kondisi udara tidak sehat dan memberikan peringatan ke pengguna dengan waktu pengiriman pesan rata-rata kurang dari 5 detik. Selain itu, Prasetya dan Dewantara (2022) menambahkan bahwa penggunaan WhatsApp sebagai media notifikasi lebih diterima oleh masyarakat umum dibandingkan notifikasi melalui email atau dashboard web karena bersifat instan dan familiar.

Dari sudut pandang teknis, sistem ini dibangun dalam empat komponen utama: 1) sensing unit, yaitu MQ-135 dan DHT11 yang mendeteksi data lingkungan; 2) control unit, yaitu ESP32 yang memproses dan mengirim data ke server cloud; 3) platform cloud, seperti Blynk, yang menyimpan dan menampilkan data secara real-time; serta 4) output unit, berupa sistem notifikasi WhatsApp yang mengirimkan pesan otomatis ke pengguna. Integrasi ini menciptakan sistem monitoring yang tidak hanya cerdas, tetapi juga cepat dan responsif. Penelitian oleh

Garcia et al. (2025) dalam tinjauan sistematis menyimpulkan bahwa penggunaan IoT dalam pemantauan kualitas udara telah mengalami peningkatan signifikan dalam akurasi pengukuran, efisiensi energi, dan kecepatan notifikasi berkat penggabungan antara mikrokontroler, sensor gas, dan aplikasi berbasis cloud. Dengan demikian, penerapan sistem berbasis IoT seperti ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu teknis, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam pengambilan keputusan dan mitigasi pencemaran udara, terutama di sekitar area industri yang rawan polusi seperti wilayah PT Rubber Hock Lie di Sigambal.

2.2 PT Rubber Hock Lie

PT Rubber Hock Lie merupakan sebuah perusahaan yang bergerak di bidang pengolahan karet alam yang terletak di kawasan Sigambal, Kecamatan Rantau Selatan, Kabupaten Labuhanbatu, Sumatera Utara. Perusahaan ini telah beroperasi sejak era kolonial Belanda dan saat ini berada di bawah manajemen Halcyon Agri Corporation, sebuah korporasi multinasional yang memiliki sejumlah pabrik karet di berbagai negara (EMIS, 2024). Proses produksi karet di perusahaan ini mencakup tahapan pengasapan, pencucian lateks, pemanasan, hingga pengeringan, yang menghasilkan emisi gas buang seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), serta partikel halus (PM_{2.5} dan PM₁₀). Emisi ini, apabila dibiarkan dalam jangka waktu lama, berpotensi menurunkan kualitas udara dan membahayakan kesehatan masyarakat di sekitarnya (Yuliana et al., 2022). Warga sekitar, khususnya di wilayah Sigambal dan desa sekitarnya, juga telah menyampaikan keluhan terkait bau menyengat, asap pekat, dan gangguan pernapasan yang diduga berasal dari aktivitas industri tersebut (Medan Bisnis Daily, 2020).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut secara efektif, pendekatan berbasis teknologi seperti Internet of Things (IoT) sangat diperlukan. Teknologi IoT memungkinkan pembangunan alat pemantauan kualitas udara yang mampu mendeteksi keberadaan gas polutan secara waktu nyata (real-time), menggunakan sensor seperti MQ-135 untuk mendeteksi gas CO, NO₂, dan benzena; SDS011 untuk partikel debu PM_{2.5} dan PM₁₀; serta DHT11 untuk memantau suhu dan kelembapan udara (Muttaqin et al., 2024). Data dari sensor ini kemudian dikirim melalui modul mikrokontroler seperti ESP32 ke platform penyimpanan awan (cloud) seperti Blynk, dan dapat diakses secara daring. Selain visualisasi data dalam bentuk grafik, sistem ini juga dapat dikembangkan untuk memberikan notifikasi secara otomatis melalui pesan instan ke WhatsApp, jika terjadi pencemaran yang melebihi ambang batas aman yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) atau Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) (Garcia et al., 2025).

Sejumlah studi telah menunjukkan efektivitas penerapan sistem IoT dalam pemantauan kualitas udara di kawasan industri. Penelitian oleh Muttaqin et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan sensor MQ-135 yang dikombinasikan dengan ESP32 dan Blynk dapat mengukur parameter polusi secara akurat dan efisien. Sementara itu, (Din et al. 2024) menambahkan penggunaan antarmuka berbasis web untuk memudahkan pemantauan oleh pengguna. Penelitian lainnya oleh (Garcia et al. 2025) menyampaikan pentingnya penggabungan IoT dengan algoritma machine learning dalam memprediksi kualitas udara dan mengoptimalkan sistem respons dini. Selain itu, studi lokal oleh (Yuliana et al.

2022) dari Politeknik Negeri Medan membuktikan bahwa sistem pemantauan udara berbasis IoT dapat diterapkan dengan baik di industri kecil hingga menengah, serta mampu menekan biaya operasional dengan tetap mempertahankan keandalan alat.

Oleh karena itu, pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT di kawasan industri seperti PT Rubber Hock Lie menjadi sangat penting. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu dalam memantau kondisi lingkungan, tetapi juga sebagai bentuk pengawasan yang adaptif dan berbasis data terhadap aktivitas industri. Di samping itu, teknologi ini turut mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan serta perlindungan terhadap kesehatan masyarakat sekitar, dengan menyediakan informasi yang transparan, akurat, dan dapat digunakan dalam pengambilan keputusan strategis oleh pihak terkait.

2.3 Kualitas Udara

Kualitas udara adalah indikator penting untuk menilai sejauh mana udara di suatu area layak dihirup. Aktivitas manusia seperti emisi gas, polusi kendaraan, asap industri, dan limbah rumah tangga telah menurunkan mutu udara secara signifikan. Dampak dari penurunan ini sangat luas, mencakup gangguan sistem pernapasan, kesehatan umum, hingga menurunnya produktivitas manusia. Hal ini terjadi karena partikel dan gas berbahaya yang dihirup bisa menyebabkan peradangan di paru-paru. Anak-anak, dengan sistem imun yang belum matang, lebih rentan terhadap jenis peradangan ini dibanding orang dewasa. Oleh karena itu, penting sekali memantau kadar polutan udara seperti gas dan partikel halus (Asri and Irfan, n.d.).

Dalam sistem IoT untuk pemantauan kualitas udara ini, digunakan sensor gas jenis MQ serta sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembaban. Dengan memonitor secara real-time parameter-parameter tersebut, alat ini dapat membantu memastikan kondisi udara agar tetap sehat dan aman untuk dihuni.

2.4 Polusi Udara

Pencemaran udara merupakan kondisi di mana satu atau lebih zat fisik, kimia, atau biologis hadir di atmosfer dalam jumlah yang membahayakan kesehatan manusia, hewan, maupun tumbuhan. Selain itu, keberadaan zat-zat tersebut juga bisa mengganggu kenyamanan, keindahan lingkungan, dan merusak berbagai properti. Polusi udara di dalam ruangan ternyata memiliki dampak kesehatan yang sama seriusnya dengan polusi udara di luar ruangan (Rosa, Simon, and Lieanto 2020).

Sementara itu, menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Pasal 1 Ayat 49, pencemaran udara didefinisikan sebagai masuknya zat, energi, atau unsur lain ke udara ambien akibat aktivitas manusia, hingga melebihi ambang batas kualitas udara yang telah ditentukan (PP RI No. 22, 2021).

Polutan udara sendiri dibedakan menjadi dua jenis, yaitu polutan primer dan sekunder. Polutan primer adalah zat pencemar yang langsung dilepaskan ke atmosfer dari sumbernya, seperti karbon monoksida (CO) yang berasal dari proses pembakaran. Sebaliknya, polutan sekunder terbentuk melalui reaksi kimia antara polutan primer di atmosfer, misalnya ozon yang terbentuk dalam smog fotokimia.

Beberapa jenis polutan udara meliputi karbon monoksida, nitrogen oksida, sulfur oksida, CFC, hidrokarbon, senyawa organik volatil (VOC), partikel padat (partikulat), dan radikal bebas. Meski karbon dioksida (CO₂) tidak selalu dikategorikan sebagai polutan karena keberadaannya secara alami di atmosfer, kadar CO₂ yang berlebihan dapat memberikan dampak besar terhadap lingkungan, sehingga bisa dianggap sebagai polutan secara tidak langsung.

Dalam sistem yang akan dirancang, fokus pengukuran akan diarahkan pada dua jenis polutan utama, yaitu karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO) (Rosa, Simon, and Lieanto 2020).

2.5 Polutan Udara

2.5.1 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) merupakan senyawa kimia yang terdiri dari satu atom karbon dan dua atom oksigen. Gas ini diproduksi dari berbagai aktivitas manusia berisiko, seperti merokok, emisi kendaraan, asap industri, dan sumber pencemar lain. Karena gas ini sangat mudah menguap, konsentrasi tinggi di udara dapat mengganggu sistem pernapasan manusia.

Paparan CO₂ dapat menyebabkan berbagai gejala kesehatan, seperti sakit kepala, sesak napas, asma, kelelahan, kantuk, peningkatan detak jantung, dan percepatan pernapasan. Bahkan dalam paparan singkat pada konsentrasi tinggi, CO₂ bisa menurunkan penglihatan, menimbulkan ketidaknyamanan, hingga menyebabkan kehilangan kesadaran. Meski oksigen tersedia, tubuh akan kesulitan membersihkan kelebihan CO₂, sehingga gangguan pada pengeluaran limbah ini dapat berdampak serius (Azuma et al. 2020)

Kenaikan kadar karbon dioksida (CO₂) dalam tubuh pada tahap awal umumnya memicu respons berupa peningkatan kecepatan dan volume napas. Namun, jika paparan CO₂ terus berlangsung dan melebihi batas toleransi tubuh, maka dapat terjadi hipoventilasi yakni penurunan aktivitas ventilasi paru-paru yang mengakibatkan akumulasi asam dalam darah atau dikenal sebagai asidosis respiratorik. Bila kondisi ini terus dibiarkan dalam jangka waktu lama dan pada konsentrasi yang tinggi, risiko terjadinya asfiksia meningkat secara signifikan dan berpotensi menyebabkan kematian (Wimalasena et al. 2021)

Menurut situs Loggerindo.com (2020), paparan karbon dioksida juga dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan seperti sakit kepala, pusing, kecemasan, sensasi seperti kesemutan atau tertusuk, kesulitan bernapas, keringat berlebih, rasa lelah, serta peningkatan detak jantung. Berikut adalah klasifikasi konsentrasi CO₂ di udara beserta dampaknya:

1. **0 – 50ppm**: kadar normal di area terbuka.
2. **50–100 ppm**: umumnya ditemukan di ruangan dengan ventilasi yang baik.
3. **100–1000 ppm**: menunjukkan kualitas udara yang mulai menurun dan bisa menyebabkan rasa kantuk ringan.
4. **1.000–2.000 ppm**: kualitas udara yang cukup buruk, memicu sakit kepala, rasa kantuk berat, serta suasana udara yang terasa pengap dan tidak nyaman; dapat juga menurunkan konsentrasi, meningkatkan detak jantung, serta menyebabkan mual ringan.
5. **>3.000 ppm**: mencerminkan kondisi udara yang sangat buruk dan tidak normal. Paparan dalam kadar ini bisa menimbulkan efek toksik atau

kekurangan oksigen. Ini adalah batas maksimum yang diperbolehkan untuk lingkungan kerja sehari-hari.

6. **>5.000 ppm**: kadar yang sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kekurangan oksigen secara serius.

Berdasarkan klasifikasi tersebut, peneliti akan mengelompokkan tingkat konsentrasi CO₂ ke dalam empat kategori, yang rinciannya disajikan pada tabel 2.1 dalam penelitian.

Tabel 2.1 Kategori dari tingkat kadar karbon dioksida.

Rentang atau Tingkatan (ppm)	Kategori
<100	Baik
100 - 1000	Sedang
1001 – 2000	Tidak Sehat
>2001	Sangat Tidak Sehat

Sumber: (Fernando, 2023)

2.5.2 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah gas dengan sifat tidak berwarna, tidak berbau, serta mudah terbakar. Meskipun tampak tidak mencolok, gas ini sangat beracun bagi sistem pernapasan manusia. Ketika dihirup, karbon monoksida akan berikatan dengan hemoglobin dalam sel darah merah, menggantikan posisi oksigen. Ikatan antara karbon monoksida dan hemoglobin jauh lebih kuat, yaitu sekitar 200 kali lebih mudah terbentuk dibandingkan ikatan dengan oksigen. Akibatnya, proses pengangkutan oksigen ke seluruh jaringan tubuh menjadi terhambat, menjadikan gas ini sebagai racun yang bereaksi sangat cepat (Wimalasena et al. 2021)

Gas karbon monoksida biasanya terbentuk ketika bahan yang mengandung karbon dibakar dalam kondisi oksigen yang terbatas. Salah satu sumber utama gas ini adalah emisi kendaraan bermotor, terutama saat lalu lintas padat di jalan raya, di mana kadar CO dapat mencapai sekitar 100 ppm. Di Amerika Serikat, kendaraan baru diwajibkan memiliki converter katalitik untuk mengubah karbon monoksida yang beracun menjadi karbon dioksida yang lebih aman bagi manusia. Asap rokok juga mengandung karbon monoksida. Setelah seseorang merokok, dibutuhkan waktu beberapa jam agar tubuh dapat menggantikan karbon monoksida yang menempel pada hemoglobinnya. Pada waktu lalu lintas sibuk, kadar CO di udara sering kali cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan gejala seperti pusing atau mual (Wimalasena et al. 2021).

Untuk keperluan sistem monitoring yang dirancang, kadar karbon monoksida akan diklasifikasikan berdasarkan standar Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), dengan kategori: baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat, dan berbahaya.

Tabel 2.2 Tingkat kandungan CO

Rentang atau Tingkatan (ppm)	Efek
9	Maks pemaparan berkepanjangan (standar ASHRAE)
35	Paparan maks selama 8 jam hari kerja (OSHA)
900	Kematian dalam 2 hingga 3 jam
12800	Kematian dalam hingga 3 menit

Sumber: (Fernando, 2023)

2.6 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler yang sudah dilengkapi dengan konektivitas WiFi dan Bluetooth, sehingga sangat memudahkan dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT) berbasis komunikasi nirkabel. Perangkat ini berfungsi membaca data dari sensor, lalu mengirimkan informasi tersebut melalui jaringan WiFi ke server atau platform IoT untuk dianalisis dan ditampilkan secara visual, sehingga pengguna dapat memantau data secara langsung (Regan 2022).

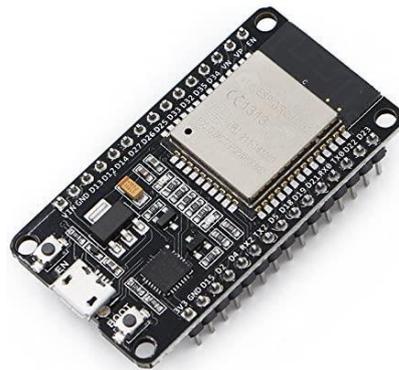
ESP32 dibekali prosesor dual-core dengan kecepatan hingga 240 MHz, RAM sebesar 520 KB, dan kapasitas memori flash mencapai 4 MB. Konsumsi dayanya yang rendah, dengan tegangan operasional antara 2.2V hingga 3.6V, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi IoT. Fitur-fitur tersebut memungkinkan ESP32 untuk mengelola data dari berbagai sensor, melakukan pemrosesan lokal, dan mengirimkannya ke sistem cloud atau platform pemantauan melalui internet. Selain itu, mikrokontroler ini mendukung protokol Modbus melalui koneksi UART, yang berguna untuk integrasi dengan perangkat seperti set-top box guna menampilkan data sensor (Regan 2022).

Dalam implementasi proyek ini, fitur ADC (Analog-to-Digital Converter) pada ESP32 dimanfaatkan untuk membaca sinyal analog dari beberapa sensor kualitas udara, seperti MQ-2, MQ-8, MQ-9, dan MQ-135. Sinyal analog tersebut diubah menjadi data digital 12-bit oleh ADC, sehingga memungkinkan ESP32 untuk menghitung konsentrasi gas dalam satuan part per million (ppm). Setiap jenis sensor menggunakan rumus kalibrasi tersendiri guna memastikan hasil pembacaan

yang akurat. Hasil data kemudian ditampilkan secara real-time menggunakan platform seperti Node-RED, yang mendukung pemantauan kondisi udara secara efisien dan tepat waktu (Regan 2022).

Tabel 2.3 Spesifikasi Mikrokontroler ESP32

Spesifikasi	Nilai
Prosesor	Dual-core Tensilica Xtensa LX6 (hingga 240 MHz)
Memori	SRAM 520 KB + Flash eksternal (biasanya 4MB)
WiFi & Bluetooth	WiFi 802.11 b/g/n + Bluetooth v4.2 (Classic & BLE)
GPIO (Pin I/O)	Hingga 34 pin input/output (tergantung versi modul)
Tegangan Operasi	3.3V (logika I/O juga 3.3V, bukan 5V)
Antarmuka Komunikasi	UART, SPI, I2C, PWM, ADC, DAC, CAN, I2S



Gambar 2.1 Mikrokontroler ESP32

Sumber: (Nizam et al., 2022)

2.7 Kabel Jumper

Kabel jumper merupakan salah satu komponen pendukung penting dalam perancangan dan pengujian rangkaian elektronik, khususnya pada tahap prototipe.

Kabel ini berbentuk kabel pendek yang dilengkapi dengan konektor pin (male) atau soket (female) di ujungnya. Fungsi utamanya adalah untuk menghubungkan satu titik ke titik lain pada papan breadboard, mikrokontroler, sensor, maupun perangkat elektronika lainnya tanpa melalui proses penyolderan. Jenis kabel jumper yang umum digunakan terdiri atas tiga tipe, yaitu male-to-male, male-to-female, dan female-to-female. Ketiga jenis ini dipilih sesuai kebutuhan koneksi pada suatu rangkaian.

Kelebihan penggunaan kabel jumper adalah kemudahannya dalam pemasangan dan pelepasan, sehingga sangat membantu saat melakukan eksperimen atau pengujian sistem secara berulang. Kabel ini juga tersedia dalam berbagai warna dan panjang, yang memudahkan identifikasi jalur koneksi pada rangkaian. Selain itu, sifatnya yang fleksibel dan reusable menjadikannya sebagai solusi praktis dan ekonomis dalam tahap awal pengembangan sistem elektronik.

Namun demikian, penggunaan kabel jumper juga memiliki beberapa keterbatasan. Salah satu kendala utamanya adalah potensi gangguan sinyal (noise) atau tidak stabilnya koneksi apabila kabel tidak terpasang dengan baik. Hal ini terutama berlaku pada rangkaian analog atau pada sistem yang memerlukan koneksi permanen dan tahan terhadap getaran. Oleh karena itu, meskipun sangat berguna dalam tahap perancangan, kabel jumper kurang cocok digunakan untuk sistem akhir atau produk jadi yang membutuhkan kestabilan koneksi jangka panjang.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kualitas dan ketahanan kabel jumper menjadi perhatian dalam bidang teknik, terutama saat digunakan dalam lingkungan ekstrem. Misalnya, dalam penelitian yang dilakukan oleh (He et al.

2020), dibahas mengenai kerusakan mekanis pada helai kabel jumper pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi yang terpapar angin kencang, di mana ditemukan bahwa getaran lateral secara terus-menerus dapat menyebabkan keausan dan keretakan kabel. Sementara itu, studi lain oleh (Azendorf, Dochhan, and Eiselt 2020) menunjukkan bahwa kabel jumper serat optik mengalami perubahan latensi sinyal yang signifikan pada suhu rendah, yang dapat mempengaruhi performa sistem komunikasi berkecepatan tinggi seperti jaringan 5G. Kedua penelitian ini menggaris bawahi pentingnya memilih jenis kabel jumper yang sesuai dengan kondisi dan kebutuhan sistem yang dirancang.



Gambar 2.2 Kabel Jumper

Sumber: (Yandri Lesmana, Purnama, and Rohani 2023)

2.8 Arduino IDE (*Integrated Development Environment*)

Arduino Integrated Development Environment (IDE) merupakan perangkat lunak sumber terbuka yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program ke papan mikrokontroler Arduino. IDE ini dirancang agar mudah digunakan, baik oleh pemula maupun pengembang tingkat lanjut dalam bidang elektronika dan pemrograman mikrokontroler. Arduino IDE mendukung bahasa pemrograman berbasis C dan C++, serta menyediakan berbagai pustaka (*library*)

yang memudahkan pengguna dalam mengakses dan mengontrol perangkat keras seperti sensor, aktuator, dan modul komunikasi (Sinha 2024).

Antarmuka pengguna dari Arduino IDE sangat sederhana, terdiri atas editor teks untuk menulis kode, jendela output untuk menampilkan pesan saat kompilasi atau unggahan, serta fitur untuk memilih jenis papan dan port komunikasi. Fitur-fitur ini dirancang secara intuitif sehingga meminimalkan kesalahan saat pengembangan sistem berbasis mikrokontroler. Selain itu, Arduino IDE juga dilengkapi dengan contoh kode bawaan (*example sketches*) yang dapat digunakan sebagai referensi atau titik awal dalam membuat proyek.

Keunggulan utama dari Arduino IDE terletak pada fleksibilitasnya dalam mendukung berbagai jenis papan pengembangan, tidak hanya dari keluarga Arduino, tetapi juga papan lain yang kompatibel seperti ESP8266, ESP32, dan lainnya. Hal ini dimungkinkan melalui manajemen board tambahan (*board manager*) yang memungkinkan pengguna menginstal dukungan untuk papan non-Arduino secara langsung dari dalam IDE. Selain itu, proses kompilasi dan unggah program ke papan mikrokontroler hanya memerlukan beberapa langkah sederhana, menjadikan Arduino IDE sebagai alat yang sangat efisien untuk pengembangan sistem tertanam (*embedded system*).

Beberapa penelitian telah memanfaatkan Arduino IDE dalam berbagai aplikasi, terutama di bidang otomasi, monitoring lingkungan, dan Internet of Things (IoT). Salah satunya ditunjukkan dalam studi oleh (Wulandari et al. 2022), yang mengembangkan sistem monitoring suhu dan kelembaban berbasis IoT menggunakan ESP8266 dan Arduino IDE sebagai lingkungan pemrogramannya.

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan Arduino IDE mampu mempercepat proses pengembangan sistem karena kemudahan integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak. Penelitian lain oleh (Sinha 2024) juga memanfaatkan Arduino IDE dalam merancang sistem pengendalian irigasi otomatis berbasis sensor tanah, di mana Arduino IDE berperan penting dalam mengatur logika pengendalian sistem secara real-time. Kedua studi ini menegaskan bahwa Arduino IDE merupakan alat yang sangat relevan dalam mendukung pengembangan teknologi berbasis mikrokontroler secara efektif dan efisien.

2.9 Sensor Pendeteksi Kadar Gas, Kelembaban dan Suhu

2.9.1 Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 adalah perangkat pendeteksi berbagai gas berbahaya seperti amonia (NH_3), oksida nitrogen (NO_x), alkohol, benzena, asap, dan karbon dioksida (CO_2). Sering digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan (indoor air quality), khususnya pada solusi berbasis IoT. Sensor ini memanfaatkan lapisan semikonduktor SnO_2 , yang resistansinya berubah saat berinteraksi dengan gas target, dan perubahan ini diterjemahkan menjadi sinyal analog yang mewakili konsentrasi gas di udara (usha rani et al. 2021).

Rentang pengukuran MQ-135 berada antara 10–1000 ppm, meskipun nilai pastinya bisa bervariasi tergantung jenis gas. Untuk berfungsi optimal, sensor memerlukan suplai tegangan 5V DC dan memiliki resistor pembebanan (load resistance) sekitar 10 k Ω . Waktu respons sensor berkisar 10–30 detik, tetapi memerlukan masa pemanasan awal (preheat) antara 24–48 jam agar pembacaan

menjadi stabil. Sensor ini dapat bekerja pada kondisi suhu -10°C hingga 50°C , serta kelembaban relatif hingga 95% RH (Fajar Nugraha et al. 2024).

Keluaran sensor berupa sinyal analog, sehingga dapat langsung disambungkan ke pin ADC mikrokontroler (misalnya GPIO 34 pada ESP32), lalu diubah menjadi nilai digital. Studi seperti (Fajar Nugraha et al. 2024) menunjukkan bahwa MQ-135 mampu memberikan tingkat akurasi pengukuran $< 12\%$ dalam kondisi dalam ruangan standar.

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

1. Pin 1: VCC – untuk suplai tegangan 5V DC
2. Pin 2: GND – untuk sambungan ke ground
3. Pin 3: AO – output analog yang dikirim ke ADC mikrokontroler (misalnya ke pin 34 ESP32)

Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor MQ-135

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Kerja	5V DC
Jenis Output	Analog dan Digital
Gas Terdeteksi	Amonia (NH_3), Karbon Monoksida (CO), Alkohol, Benzena, Asap, dll.
Waktu Pemanasan	± 20 detik (untuk mulai bekerja), ± 24 jam (untuk stabilitas penuh)
Rentang Suhu Kerja	-20°C hingga 50°C
Bahan Sensitif	SnO_2 (Timah Dioksida)



Gambar 2.3 Sensor MQ-135

Sumber: (Saputra, 2017)

2.9.2 Sensor DHT11

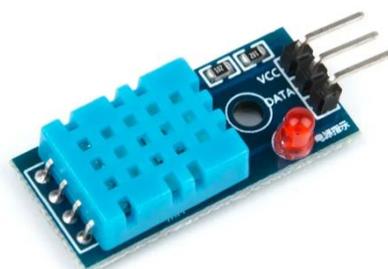
Sensor DHT11 merupakan perangkat yang dapat digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan secara bersamaan dalam suatu lingkungan. Sensor ini menghasilkan data dalam bentuk sinyal digital. Di dalamnya terdapat thermistor tipe NTC (Negative Temperature Coefficient) yang berfungsi sebagai pendeteksi suhu, serta sensor kelembapan tipe resistif. Selain itu, DHT11 juga dilengkapi dengan mikrokontroler 8-bit yang bertugas untuk mengolah data dari kedua sensor tersebut dan mengirimkannya melalui satu jalur data dua arah (Tiyas, Erwanto, and Yanuartanti 2025).

Secara umum, DHT11 adalah modul sensor yang digunakan untuk mendeteksi suhu dan kelembapan dengan menghasilkan tegangan analog yang bisa diproses lebih lanjut oleh mikrokontroler. Sensor ini memiliki fitur kalibrasi yang memungkinkan hasil pembacaan lebih akurat. Informasi kalibrasi disimpan dalam memori OTP (One Time Programmable) dalam bentuk koefisien kalibrasi. Berdasarkan (Pratama 2019), spesifikasi teknis DHT11 mencakup tegangan operasi sebesar 5V, rentang pengukuran suhu antara 0 hingga 50°C, dan kelembapan relatif antara 20 hingga 90 %RH.

Sensor DHT11 tersedia dalam dua varian, yakni versi 4 pin dan 3 pin. Kedua versi tersebut memiliki karakteristik fungsi yang sama. Pada versi 4 pin, susunan pinnya meliputi: pin pertama sebagai input daya (3V–5V), pin kedua untuk jalur data, pin ketiga yang tidak digunakan (NC), dan pin keempat sebagai ground. Sedangkan pada versi 3 pin, konfigurasi pin-nya adalah: pin pertama sebagai VCC (3V–5V), pin kedua untuk data, dan pin ketiga sebagai ground (Scendynawa24 2024).

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor DHT11

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Kerja	3.3V – 5.5V DC
Jenis Output	Digital (1-wire serial)
Rentang Kelembaban	20% – 90% RH ($\pm 5\%$ akurasi)
Waktu Pemanasan	± 20 detik (untuk mulai bekerja), ± 24 jam (untuk stabilitas penuh)
Rentang Suhu Kerja	Sekitar 1 detik sekali (1Hz)
Konsumsi Daya	Sangat rendah, cocok untuk sistem mikrokontroler



Gambar 2.4 Sensor DHT11

Sumber: (Prayoga, 2020)

2.10 Organic Light-Emitting Diode (OLED)

Organic Light-Emitting Diode (OLED) merupakan salah satu jenis layar modern yang banyak digunakan dalam berbagai perangkat elektronik, termasuk sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT). OLED bekerja berdasarkan prinsip elektroluminesensi dari lapisan organik yang memancarkan cahaya ketika dialiri arus listrik, sehingga layar ini tidak memerlukan backlight seperti halnya LCD. Dengan struktur yang tipis, fleksibel, dan mampu menghasilkan kontras tinggi serta sudut pandang luas, OLED menjadi pilihan ideal untuk perangkat portabel, termasuk alat pemantauan kualitas udara skala kecil. Pada aplikasi berbasis mikrokontroler seperti ESP8266 atau ESP32, OLED berukuran 0.96 inci (resolusi 128x64 piksel) umumnya digunakan untuk menampilkan informasi real-time seperti suhu, kelembapan, konsentrasi gas polutan (CO, NO₂, PM2.5), dan status sistem secara efisien. Keunggulan OLED juga terletak pada konsumsi daya yang rendah ketika menampilkan grafis dominan hitam, serta kemampuannya menampilkan ikon atau grafik kecil, yang tidak dapat dilakukan oleh layar karakter biasa. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi OLED pada sistem monitoring lingkungan dapat meningkatkan keterbacaan data di lapangan dan efisiensi energi alat. Penelitian oleh Zayyan et al. (2023) menyatakan bahwa penggunaan OLED dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT mampu menurunkan konsumsi daya hingga 25% dibandingkan LCD backlight pada kondisi luar ruangan. Selain itu, studi dari Arifin et al. (2022) mengungkapkan bahwa layar OLED lebih efektif digunakan pada alat berbasis mikrokontroler ESP32 karena

lebih kompatibel dengan komunikasi I2C, sehingga menghemat penggunaan pin GPIO yang terbatas.

Tabel 2.6 Spesifikasi *Organic Light-Emitting Diode (OLED)*

Spesifikasi	Nilai
Ukuran Tampilan	0.96 inci
Tegangan Operasi	3.3V – 5V DC
Antarmuka	I2C (default), bisa juga SPI (pada versi tertentu)
Pengontrol	SSD1306 (driver yang paling umum digunakan)
Tipe <i>Backlight</i>	Tidak diperlukan (self-emitting / memancarkan cahaya sendiri)
Tipe Tampilan	Grafis (bisa menampilkan teks, gambar, ikon, grafik)
Kompatibilitas	ESP32, ESP8266, Arduino Uno/Nano, STM32, dsb



Gambar 2.5 *Organic Light-Emitting Diode (OLED)*

Sumber: Arifin et al. (2022)

2.11 *Blynk*

Blynk merupakan sebuah platform modern yang dirancang untuk memudahkan pengguna dalam membangun antarmuka (interface) guna mengontrol dan memantau proyek berbasis perangkat keras melalui perangkat Android atau

iOS. Setelah aplikasi Blynk diunduh, pengguna dapat membuat dashboard proyek secara instan dengan menambahkan berbagai widget seperti tombol, slider, grafik, dan lainnya ke layar smartphone.

Dengan bantuan widget ini, pengguna dapat mengendalikan pin (menyalakan/mematikan) serta menampilkan data dari berbagai sensor. Platform ini sangat cocok digunakan untuk proyek sederhana seperti sistem pemantauan suhu atau kontrol lampu secara jarak jauh (- et al. 2024).

Blynk dikembangkan sebagai solusi dalam teknologi Internet of Things (IoT) yang memungkinkan perangkat seperti Arduino dan ESP8266 untuk dikendalikan secara jarak jauh dengan cepat dan mudah. Blynk bukan hanya sebuah layanan cloud untuk IoT, tetapi juga menawarkan solusi menyeluruh (end-to-end) yang membantu menghemat waktu dan sumber daya dalam proses pengembangan aplikasi untuk perangkat yang saling terhubung.

Salah satu tantangan umum yang sering dihadapi pemula adalah kompleksitas dalam penulisan kode dan konfigurasi jaringan. Oleh karena itu, Blynk hadir untuk menyederhanakan proses tersebut, mengurangi kebutuhan coding yang rumit, serta mempermudah akses ke perangkat dari mana pun menggunakan smartphone.

Blynk tersedia secara gratis untuk para hobiis dan pengembang aplikasi, namun juga memiliki opsi berbayar bagi penggunaan komersial. Aplikasi ini mendukung pengoperasian berbagai jenis perangkat seperti Arduino, Raspberry Pi, Wemos, dan modul lainnya yang terhubung ke internet, sehingga dapat dikendalikan dari lokasi mana pun (Yusof, Mohamed, and Kassim 2023).

Tabel 2.7 Komponen Utama dalam Blynk

Komponen	Fungsi
Blynk App	Aplikasi mobile Android/iOS untuk membuat dashboard dan kontrol UI
Blynk Cloud	Server cloud yang menjadi perantara antara perangkat dan aplikasi
Blynk Library	Pustaka yang diinstal di Arduino IDE agar perangkat bisa terhubung
Device Auth Token	Kode unik agar perangkat bisa terkoneksi dengan akun dan proyek Blynk

**Gambar 2.6 Blynk**

Sumber: (Satryawan & Susanti, 2023)

2.12 WhatsApp

Dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT), komunikasi antar perangkat dan pengguna akhir merupakan komponen penting yang menentukan kecepatan respons terhadap kondisi

lingkungan. Salah satu media komunikasi yang dapat dimanfaatkan secara luas adalah WhatsApp, sebuah aplikasi pesan instan yang memiliki pengguna aktif terbanyak di dunia, termasuk di Indonesia. WhatsApp dapat diintegrasikan ke dalam sistem IoT sebagai alat notifikasi otomatis, sehingga perangkat dapat mengirimkan peringatan secara real-time apabila kualitas udara melebihi ambang batas aman. Melalui penggunaan WhatsApp API atau layanan pihak ketiga seperti Twilio, sistem dapat dirancang untuk mengirimkan pesan berbasis data sensor seperti PM2.5, CO₂, suhu, dan kelembapan secara langsung ke nomor WhatsApp pengguna. Hal ini terbukti lebih efektif dan cepat dibandingkan notifikasi email atau platform digital lainnya, karena mayoritas masyarakat sudah terbiasa menggunakan WhatsApp dalam kehidupan sehari-hari.

Penelitian yang dilakukan oleh (Sitorus dan Hidayat 2023) menunjukkan bahwa integrasi ESP32 dengan sensor MQ-135 dan DHT11, yang dikombinasikan dengan WhatsApp API, mampu menghasilkan sistem peringatan kualitas udara yang handal, dengan rata-rata waktu pengiriman pesan kurang dari 3 detik setelah data diproses. Selain itu, studi oleh (Prasetya dan Dewantara 2022) menyimpulkan bahwa penggunaan notifikasi WhatsApp dalam sistem monitoring lingkungan dapat meningkatkan kesadaran pengguna hingga 70% lebih cepat dibandingkan penggunaan tampilan data biasa seperti LCD atau dashboard web. Penggunaan media komunikasi populer seperti WhatsApp dalam sistem IoT menjadi langkah strategis untuk menjembatani antara teknologi dan masyarakat secara praktis dan efisien.



Gambar 2.7 WhatsApp

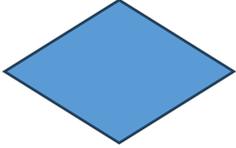
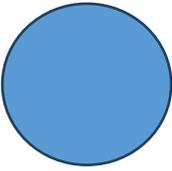
Sumber: Prasetya & Dewantara (2022)

2.13 Flowchart

Flowchart adalah representasi grafis yang menggambarkan Langkah-langkah dan urutan prosedur dari sebuah program. Umumnya memiliki dampak signifikan dalam pemecahan masalah yang memerlukan analisis mendalam dan penilaian yang cermat. (Budiman et al., 2021). Flowchart, dalam esensinya, beroperasi sebagai alat komunikasi universal yang memungkinkan para pemangku kepentingan yang berbeda, seperti pengembang, desainer, atau bahkan pengguna akhir, untuk memahami logika dan alur program dengan cepat dan efisien. Dalam tampilan visualnya yang berupa diagram, flowchart menggambarkan hubungan antara berbagai tahap atau tugas dalam suatu algoritma atau program.

Konsep ini sangat berguna dalam pendekatan pengembangan dan penyelesaian masalah yang berorientasi pada tim. Flowchart memungkinkan setiap anggota tim untuk berkontribusi secara lebih efektif, karena gambaran visual yang diberikan tidak memerlukan latar belakang teknis yang mendalam untuk dipahami. Selain itu, sebagai alat pendidikan, flowchart dapat membantu individu memahami aliran proses dan logika program, tanpa perlu terlalu fokus pada aspek teknis tertentu.

Tabel 2.8 Simbol, Nama, Arti Simbol Flowchart

NO	Simbol Flowchart	Nama	Arti Simbol
1		<i>Terminator</i>	Awal atau akhir konsep
2		<i>Process</i>	Proses Operasional
3		<i>Documented</i>	Dokumen atau laporan berupa <i>print out</i>
4		<i>Decision</i>	Keputusan atau Sub point, garis yang terhubung dengan bentuk <i>decision</i> merujuk pada situasi situasi yang berbeda sesuai dengan keputusan yang digambarkan
5		<i>Data</i>	<i>input</i> dan <i>output</i> , contohnya <i>input feedback</i> dari pelanggan, dan <i>output</i> desain produk baru
6		<i>On-page reference / Connector</i>	Penghubung alur dalam halaman yang sama
7		<i>Off-page referance / Off page Connector</i>	Penghubung alur dalam halaman yang berbeda
8		<i>Flow</i>	Arah alur dalam konsep (prosedur)

2.14 Penelitian Terkait

Berikut adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai monitoring kualitas udara yang dirangkum oleh penulis:

1. Penelitian oleh Prayoga (2020) yang berjudul "*Sistem Monitoring Kualitas Udara Secara Realtime Dengan Peringatan Bahaya Kualitas Udara Tidak Sehat Menggunakan Push Notification*", mengembangkan sistem yang dapat memantau konsentrasi gas CO, mendeteksi keberadaan asap, serta mengukur suhu dan kelembapan udara secara langsung (real-time). Data yang diperoleh dari perangkat sensor dikirimkan ke server dan ditampilkan melalui antarmuka website. Selain itu, sistem ini juga mampu mengirimkan notifikasi bahaya kepada pengguna yang telah mengaktifkan fitur pemberitahuan. Pemberitahuan ini dikirimkan secara otomatis saat rata-rata kualitas udara per jam menunjukkan kategori tidak sehat hingga sangat berbahaya.
2. Penelitian oleh Goh et al. (2021) mengajukan rancangan sistem pemantauan kualitas udara dalam kabin kendaraan secara real-time berbasis cloud. Sistem ini menggabungkan teknologi prediksi berbasis machine learning untuk memantau tingkat kantuk dan kelelahan pengemudi berdasarkan kualitas udara dalam kendaraan. Parameter yang diukur meliputi kadar CO₂, PM2.5, PM10, koordinat GPS, kecepatan kendaraan, suhu, dan kelembapan relatif. Seluruh data yang diperoleh dikirimkan ke database cloud, yang kemudian dapat diakses melalui platform web maupun aplikasi mobile. Namun, sistem ini belum dilengkapi fitur notifikasi otomatis apabila kualitas udara memburuk.

3. Penelitian oleh Waworundeng dan Lengkong (2020) yang berjudul "*Sistem Monitoring dan Notifikasi Kualitas Udara Dalam Ruangan dengan Platform IoT*", bertujuan merancang sistem yang dapat memberikan notifikasi terkait kondisi kualitas udara di dalam ruangan. Sistem ini juga mampu merekam data melalui koneksi Internet of Things (IoT). Perangkat prototipe dirancang menggunakan mikrokontroler Wemos, sensor kualitas udara MQ-135, dan terhubung dengan platform Blynk dan Thingspeak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini dapat berfungsi sesuai dengan tujuannya dan berpotensi untuk digunakan dalam ruangan yang memerlukan pemantauan kualitas udara demi meningkatkan kesadaran akan pentingnya lingkungan yang sehat.