

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Konsep Dasar Sistem Pemantauan Kualitas Udara

Sistem pemantauan kualitas udara merupakan sistem yang digunakan untuk mengukur, memantau, dan menganalisis kondisi udara berdasarkan parameter tertentu dengan memanfaatkan sensor dan teknologi pendukung untuk mendeteksi berbagai polutan di lingkungan [13]. Tujuan utama sistem ini adalah menyediakan informasi yang akurat dan *real-time* mengenai kondisi kualitas udara sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam upaya menjaga kesehatan masyarakat dan kelestarian lingkungan [14]. Pada implementasinya, sistem pemantauan kualitas udara umumnya memanfaatkan sensor debu untuk mengukur konsentrasi partikel udara seperti $PM_{2.5}$ dan PM_{10} , serta sensor gas untuk mendeteksi keberadaan berbagai zat pencemar di atmosfer [15]. Data hasil pengukuran kemudian dikirim, disimpan, dan ditampilkan melalui antarmuka berbasis web atau aplikasi [16].

Parameter kualitas udara merupakan indikator yang digunakan untuk menilai kondisi udara berdasarkan kandungan polutan dan faktor lingkungan yang memengaruhinya. Pada penelitian ini, parameter yang diamati meliputi konsentrasi partikel $PM_{2.5}$, konsentrasi gas karbon dioksida (CO_2), suhu udara, dan kelembapan udara. $PM_{2.5}$ merupakan partikel halus berukuran kurang dari 2,5 mikrometer yang berpotensi membahayakan kesehatan karena dapat masuk hingga ke saluran pernapasan bagian dalam. Selain itu, kadar CO_2 , suhu, dan kelembapan juga digunakan sebagai indikator kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi kenyamanan serta kualitas udara pada suatu lokasi [17].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong sistem pemantauan kualitas udara menjadi lebih efektif karena memungkinkan proses pengambilan, pengiriman, penyimpanan, dan visualisasi data dilakukan secara otomatis dan *real-time*. Saat ini, sistem pemantauan kualitas udara telah banyak diterapkan dengan memanfaatkan jaringan internet sehingga data dapat dipantau dari jarak jauh melalui website maupun aplikasi *mobile*. Namun, ketersediaan perangkat pemantauan masih terbatas pada titik-titik tertentu sehingga cakupan wilayah pengukuran belum merata. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu menyajikan informasi kualitas udara secara *real-time*. Melalui

integrasi sensor lingkungan, mikrokontroler, basis data, dan website, informasi kualitas udara dapat ditampilkan secara lebih informatif sehingga mendukung proses pemantauan kondisi lingkungan secara berkelanjutan.

2.2 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) adalah suatu indikator tanpa satuan yang digunakan untuk menggambarkan kualitas udara ambien pada suatu lokasi. Indeks ini disusun berdasarkan tingkat dampak pencemaran udara terhadap kesehatan manusia, keindahan lingkungan, serta keberlangsungan makhluk hidup lainnya. Pada daerah yang memiliki risiko tinggi terhadap kebakaran hutan dan lahan, ISPU juga berperan sebagai sistem peringatan dini bagi masyarakat. Secara umum, ISPU bertujuan untuk menyediakan informasi kualitas udara yang seragam dan mudah dipahami, serta dapat dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan terkait pengendalian pencemaran udara oleh pemerintah pusat maupun daerah.

Pada tahun 2020, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menetapkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara sebagai pengganti Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 45 Tahun 1997. Peraturan tersebut memperbarui metode perhitungan ISPU dengan menggunakan tujuh parameter utama, yaitu PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , dan hidrokarbon (HC). Penambahan parameter $PM_{2.5}$ dan HC dilakukan karena kedua jenis polutan tersebut memiliki potensi dampak yang tinggi terhadap kesehatan manusia, terutama pada sistem pernapasan.

Perhitungan ISPU ditentukan berdasarkan beberapa parameter, yaitu nilai ISPU batas atas, ISPU batas bawah, konsentrasi ambien batas atas, konsentrasi ambien batas bawah, serta hasil pengukuran konsentrasi ambien di lapangan. Berdasarkan parameter tersebut, nilai ISPU dihitung menggunakan persamaan matematika tertentu yang telah ditetapkan.

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (2.1)$$

Dimana:

- I = ISPU terhitung
- I_a = ISPU batas atas

- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu g/m^3$)
- X_b = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu g/m^3$)
- X_x = Konsentrasi ambien hasil pengukuran ($\mu g/m^3$)

Tabel 2.1. *Breakpoint* Konsentrasi $PM_{2.5}$ untuk Perhitungan ISPU

I_b	I_a	$X_b (\mu g/m^3)$	$X_a (\mu g/m^3)$
0	50	0.0	15.5
51	100	15.6	55.4
101	200	55.5	150.4
201	300	150.5	250.4

Tabel 2.1 menunjukkan nilai batas bawah (I_b , X_b) dan batas atas (I_a , X_a) yang digunakan dalam perhitungan ISPU berdasarkan parameter $PM_{2.5}$. Nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ hasil pengukuran (X_x) dicocokkan dengan rentang konsentrasi pada tabel tersebut untuk menentukan *breakpoint* yang sesuai, kemudian dihitung menggunakan Persamaan 2.1 melalui metode interpolasi linier.

Tabel 2.2. Kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Rentang	Kategori	Penjelasan
1–50	Baik	Kualitas udara berada pada kondisi sangat baik dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia, hewan, maupun tumbuhan.
51–100	Sedang	Kualitas udara masih tergolong aman dan dapat diterima oleh manusia, hewan, serta tumbuhan tanpa menimbulkan gangguan yang signifikan.
101–200	Tidak Sehat	Kualitas udara mulai memberikan dampak merugikan bagi kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan, terutama pada kelompok yang sensitif.
Lanjut pada halaman berikutnya		

Rentang	Kategori	Penjelasan
201–300	Sangat Tidak Sehat	Kualitas udara dapat menyebabkan peningkatan risiko gangguan kesehatan pada sebagian besar populasi yang terpapar.
301+	Berbahaya	Kualitas udara berada pada tingkat yang sangat berisiko dan dapat menyebabkan dampak kesehatan serius sehingga memerlukan tindakan segera.

Pada Tabel 2.2 merupakan kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) menunjukkan klasifikasi tingkat kualitas udara berdasarkan rentang nilai indeks yang dihasilkan dari perhitungan konsentrasi polutan di udara. Setiap rentang nilai ISPU merepresentasikan tingkat dampak yang berbeda terhadap kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan. Nilai ISPU antara 1–50 dikategorikan sebagai baik, yang berarti kualitas udara tidak memberikan dampak negatif. Rentang 51–100 termasuk kategori sedang, di mana kualitas udara masih dapat diterima namun mulai berpotensi menimbulkan dampak ringan bagi kelompok sensitif.

Selanjutnya, nilai 101–200 dikategorikan sebagai tidak sehat, yang menunjukkan bahwa kualitas udara mulai memberikan dampak merugikan bagi kesehatan, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan. Pada rentang 201–300, kualitas udara masuk dalam kategori sangat tidak sehat, yang dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan secara lebih luas. Sementara itu, nilai ISPU di atas 300 dikategorikan sebagai berbahaya, yang berarti kualitas udara berada pada kondisi sangat buruk dan dapat menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan seluruh populasi. Oleh karena itu, klasifikasi ini sangat penting sebagai acuan dalam menentukan tindakan pencegahan serta meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap kondisi kualitas udara di sekitarnya [18].

2.3 Teknologi IoT dalam Pemantauan dan Deteksi Kualitas Udara

Teknologi *Internet of Things* (IoT) merupakan konsep yang mengintegrasikan perangkat fisik dengan jaringan internet sehingga memungkinkan perangkat tersebut saling berkomunikasi, mengumpulkan data, serta melakukan pertukaran informasi secara otomatis tanpa interaksi manusia secara langsung [10, 16, 19]. IoT terdiri dari berbagai komponen seperti sensor, aktuator,

perangkat pemrosesan data, serta konektivitas jaringan yang memungkinkan proses pengambilan, pengolahan, dan pengiriman data secara *real-time* [20, 8]. Dengan adanya kemampuan tersebut, IoT menjadi salah satu teknologi yang berkembang pesat dan banyak diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk pemantauan lingkungan [9, 4].

Dalam konteks pemantauan dan deteksi kualitas udara, IoT menawarkan solusi yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Sistem berbasis IoT memungkinkan pengumpulan data secara kontinu dari berbagai parameter lingkungan, seperti konsentrasi gas berbahaya, partikulat udara, suhu, dan kelembapan [21]. Data yang diperoleh dari sensor kemudian dikirim melalui jaringan nirkabel ke server atau platform berbasis *cloud* untuk diproses, dianalisis, dan divisualisasikan dalam bentuk antarmuka web atau aplikasi *mobile* [13]. Hal ini memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi kualitas udara secara *real-time* serta memperoleh informasi yang lebih cepat dan akurat [22, 1].

Keunggulan lain dari penerapan IoT dalam pemantauan kualitas udara adalah dari segi biaya dan fleksibilitas [23]. Perangkat berbasis IoT umumnya menggunakan sensor berbiaya rendah serta platform *open-source*, sehingga lebih terjangkau dan mudah dikembangkan dibandingkan dengan sistem pemantauan konvensional yang cenderung mahal dan terbatas pada lokasi tertentu. Selain itu, sistem IoT dapat dirancang dalam bentuk *mobile monitoring*, sehingga memungkinkan pengumpulan data kualitas udara dari berbagai lokasi geografis secara lebih luas dan dinamis [4].

Pemanfaatan IoT juga berkontribusi dalam meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap kualitas udara [24]. Informasi yang dihasilkan dapat diakses secara mudah melalui platform digital, sehingga masyarakat dapat mengetahui kondisi udara di sekitarnya dan mengambil langkah pencegahan yang diperlukan. Selain itu, data yang dikumpulkan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan oleh pemerintah atau pihak terkait dalam upaya pengendalian pencemaran udara.

2.3.1 ESP32

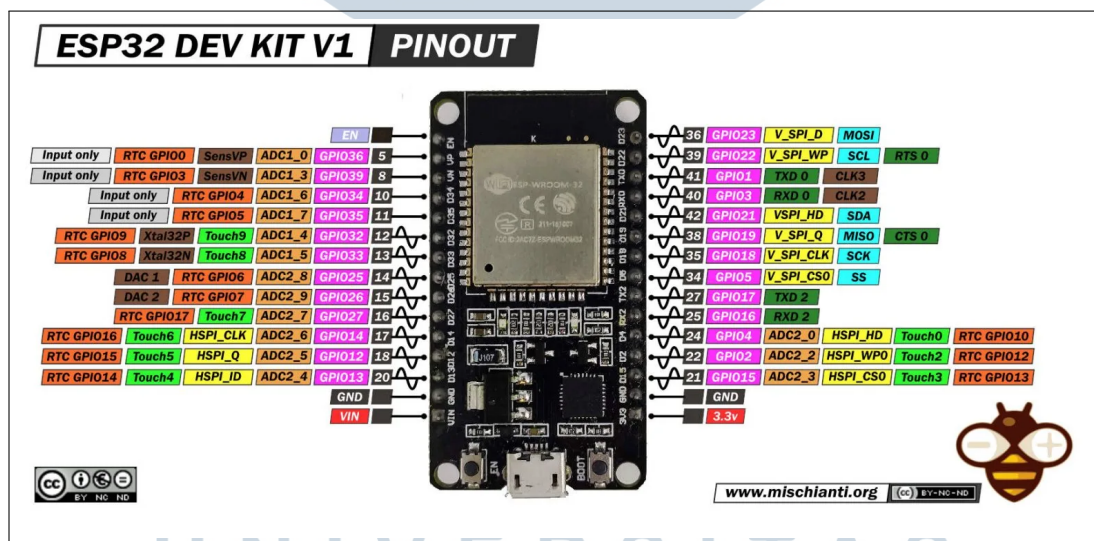
ESP32 adalah mikrokontroler yang dikembangkan oleh sebuah perusahaan China bernama Espressif Systems berbasis *System on Chip* (SoC) yang dirancang dengan konsumsi daya rendah serta dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth. Mikrokontroler ini memiliki kemampuan pemrosesan yang baik serta

mendukung berbagai antarmuka komunikasi, sehingga sangat sesuai digunakan dalam pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT). Dengan kemampuannya dalam mengirim dan menerima data secara nirkabel, ESP32 banyak dimanfaatkan dalam aplikasi pemantauan dan kontrol yang membutuhkan akses data secara *real-time* dan jarak jauh [6].

Selain fitur perangkat keras yang dimiliki, ESP32 juga mendukung berbagai bahasa pemrograman sehingga memberikan fleksibilitas bagi pengembang dalam proses implementasi sistem. Bahasa pemrograman yang umum digunakan pada ESP32 adalah C/C++, yang diimplementasikan melalui platform seperti Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) dan Arduino IDE.

Selain itu, ESP32 juga mendukung penggunaan Python dalam bentuk MicroPython yang memungkinkan proses pengembangan menjadi lebih cepat dan sederhana, terutama pada tahap prototipe. Bahasa pemrograman lain seperti Lua juga dapat digunakan melalui platform tertentu, sehingga semakin memperluas opsi pengembangan pada perangkat ini.

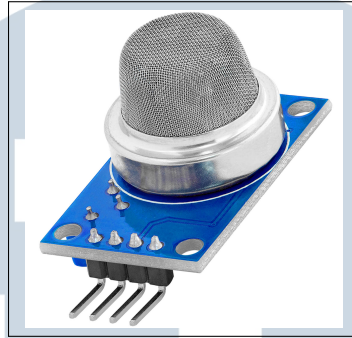
Berikut merupakan Pinout dari ESP32 terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. ESP32

Sumber: [25]

2.3.2 Sensor MQ-135



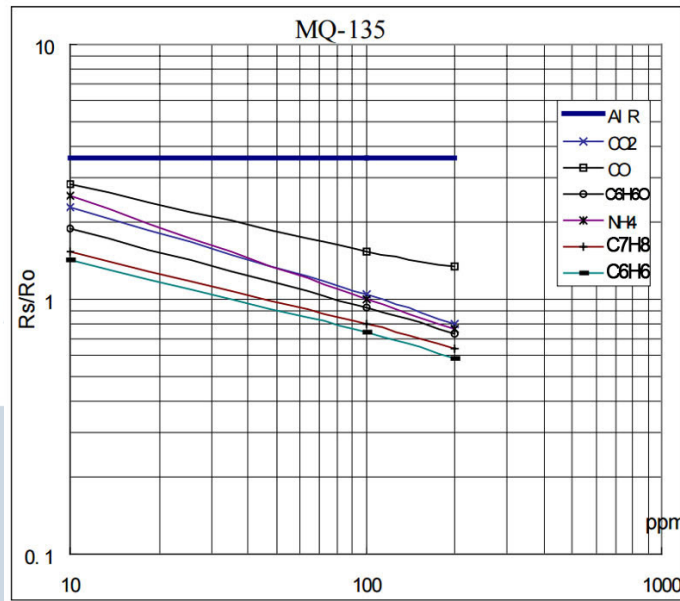
Gambar 2.2. Sensor MQ-135

Sumber: [25]

Pada Gambar 2.2 merupakan sensor MQ-135, salah satu jenis sensor gas yang banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara karena kemampuannya dalam mendeteksi berbagai senyawa gas berbahaya. Sensor ini memiliki sensitivitas terhadap beberapa gas seperti amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), alkohol, benzena, asap, karbon monoksida (CO), serta karbon dioksida (CO_2) [6].

Prinsip kerja sensor MQ-135 didasarkan pada perubahan nilai resistansi material semikonduktor ketika terpapar gas tertentu. Perubahan resistansi ini kemudian dikonversi menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Sensor ini umumnya menghasilkan dua jenis keluaran, yaitu keluaran analog (AO) yang menunjukkan tingkat konsentrasi gas secara kontinu, serta keluaran digital (DO) yang menunjukkan kondisi ambang batas tertentu berdasarkan pengaturan *threshold* [19].

Meskipun memiliki keunggulan dalam mendeteksi berbagai jenis gas, sensor MQ-135 memerlukan proses kalibrasi agar dapat menghasilkan data yang lebih akurat sesuai dengan konsentrasi gas tertentu. Kalibrasi ini penting karena sensitivitas sensor dapat berbeda-beda tergantung pada kondisi lingkungan dan jenis gas yang terdeteksi. Oleh karena itu, sensor MQ-135 lebih sering digunakan sebagai indikator tingkat kualitas udara secara umum dibandingkan sebagai alat ukur presisi tinggi [1].



Gambar 2.3. Karakteristik sensitivitas sensor MQ-135

Sumber: [26]

Pada Gambar 4.7 menunjukkan kurva sensitivitas sensor MQ-135 terhadap beberapa jenis gas seperti CO_2 , CO , NH_3 , benzena, toluena, dan alkohol. Kurva tersebut menggambarkan hubungan antara rasio resistansi sensor terhadap resistansi referensi (R_s/R_0) dengan konsentrasi gas dalam satuan ppm pada skala logaritmik. Terlihat bahwa nilai R_s/R_0 cenderung menurun seiring meningkatnya konsentrasi gas, yang menunjukkan perubahan karakteristik resistansi sensor akibat paparan gas tertentu. Kurva sensitivitas ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan persamaan empiris untuk mengestimasi konsentrasi gas berdasarkan hasil pembacaan sensor MQ-135.

Kalibrasi sensor MQ-135 dilakukan untuk memperoleh nilai resistansi referensi (R_0) pada kondisi udara bersih. Sebelum proses kalibrasi, sensor dipanaskan (*preheating*) agar elemen sensor mencapai kondisi stabil. Nilai resistansi sensor (R_s) dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$R_s = R_L \left(\frac{V_C}{V_{out}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

dengan:

- R_s = resistansi sensor ($k\Omega$)
- R_L = resistor beban (*load resistance*)

- V_C = tegangan catu daya sensor (Volt)
- V_{out} = tegangan keluaran sensor (Volt)

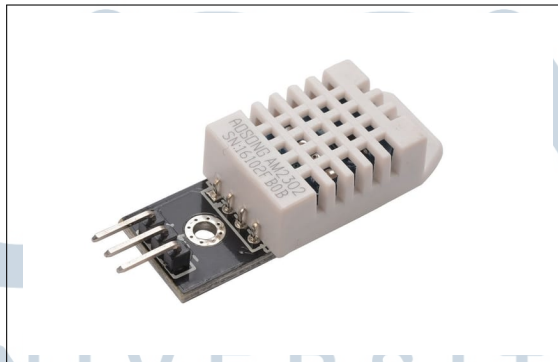
sesuai karakteristik sensor MQ-135 pada kondisi udara bersih.

$$C_x = a \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^b \quad (2.3)$$

dengan:

- C_x = estimasi konsentrasi gas (ppm)
- a = konstanta regresi sensor
- b = eksponen regresi sensor
- R_s = resistansi sensor
- R_0 = resistansi referensi hasil kalibrasi

2.3.3 Sensor DHT22



Gambar 2.4. Sensor DHT22

Sumber: [27]

Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara bersamaan. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem pemantauan lingkungan karena memiliki tingkat akurasi dan presisi yang lebih baik dibandingkan dengan sensor sejenis, seperti DHT11. DHT22, yang juga dikenal sebagai AM2302, mampu memberikan data pengukuran yang lebih stabil

dan dapat diandalkan untuk berbagai aplikasi, termasuk sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) [6].

DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu antara -40°C hingga 80°C dan rentang kelembapan relatif antara 0% hingga 100%. Selain itu, sensor ini memiliki resolusi yang lebih tinggi serta tingkat akurasi yang lebih baik, sehingga mampu menghasilkan data yang lebih presisi. Keluaran dari sensor DHT22 berupa sinyal digital yang telah diproses secara internal oleh mikrokontroler 8-bit yang terdapat di dalam sensor, sehingga memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32 tanpa memerlukan konversi analog tambahan [28].

2.3.4 Sensor PMS7003



Gambar 2.5. Sensor PMS7003

Sumber: [29]

Pada Gambar 2.5 merupakan sensor partikulat berbasis teknologi laser scattering yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi partikel debu di udara, khususnya $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, dan PM_{10} . Sensor ini bekerja dengan cara memancarkan sinar laser ke partikel udara, kemudian mendeteksi cahaya yang dipantulkan untuk menghitung jumlah serta ukuran partikel.

PMS7003 memiliki keunggulan berupa respons *real-time*, tingkat kesalahan yang rendah, serta kemampuan mendeteksi partikel dengan diameter minimum hingga $0.3\ \mu\text{m}$. Selain itu, sensor ini dirancang dengan struktur pelindung *six-side shielding* yang meningkatkan ketahanan terhadap gangguan eksternal. Ukurannya

yang kecil dan tipis juga membuatnya mudah diintegrasikan dalam sistem berbasis *Internet of Things* (IoT).

2.4 Systematic Literature Review

Tabel 2.3. *Systematic Literature Review*

Referensi	Sensor	Hasil	Keterbatasan	Relevansi
D. Azizah et al. (2025) – <i>IoT-Based Air Quality Monitoring System with Automatic Notification</i> [30]	PMS5003, DHT22, MH-Z19	Pemantauan kualitas udara secara <i>real-time</i> dengan notifikasi otomatis dan dashboard berbasis web	Pengujian dilakukan pada area pemantauan yang terbatas	Menjadi referensi integrasi sensor PM _{2.5} , suhu, kelembapan, dan CO ₂ pada sistem pemantauan kualitas udara
D. Heavyanto et al. (2026) – <i>Sistem Kontrol Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Arduino</i> [31]	MQ-7, PMS5003, Passive Infrared(PIR)	Sistem pengendalian kualitas udara dalam ruangan dengan otomatisasi <i>exhaust fan</i>	Belum mendukung penyimpanan data historis dan pemantauan jarak jauh berbasis IoT	Menjadi referensi pemanfaatan sensor PM _{2.5} untuk pemantauan kualitas udara dalam ruangan
Lanjut pada halaman berikutnya				

Referensi	Sensor	Hasil	Keterbatasan	Relevansi
A. Dimiyati et al. (2025) – Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dengan Visualisasi Android (Studi Kasus: PT. South Pacific Viscose) [3]	MQ-135, PMS5003	Pemantauan kualitas udara secara <i>real-time</i> melalui aplikasi Android	Sistem visualisasi hanya dapat diakses melalui perangkat Android	Menjadi referensi implementasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 dan multi-sensor
D. Santoso et al. (2025) – <i>Low-Cost Sensor Based on Internet of Things for PM_{2.5} Air Quality Monitoring</i> [12]	PMS7003, DHT	Pemantauan kualitas udara secara <i>real-time</i> dengan cakupan lokasi pemantauan yang luas	Visualisasi data masih terbatas pada platform ThingSpeak dan belum mendukung analisis spasial yang interaktif	Menjadi referensi pemanfaatan PMS7003 serta visualisasi data kualitas udara berbasis lokasi
Lanjut pada halaman berikutnya				

Referensi	Sensor	Hasil	Keterbatasan	Relevansi
V. Hura et al. (2023) – <i>IoT-Based Solution for Detection of Air Quality Using ESP32</i> [14]	MQ-135, PMS5003, CCS811, BME280	Pemantauan kualitas udara secara <i>real-time</i> dengan biaya implementasi yang relatif rendah	Pengujian dilakukan pada satu lokasi dengan periode pengamatan yang terbatas	Menjadi referensi implementasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis multi-sensor dan ESP32

Studi literatur dilakukan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan membandingkan penelitian terkait sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT). Analisis dilakukan terhadap perangkat yang digunakan, metode implementasi, hasil yang diperoleh, keterbatasan penelitian, serta relevansinya terhadap penelitian yang dilakukan.

Berdasarkan Tabel 2.3, sebagian besar penelitian menggunakan mikrokontroler ESP32 atau Arduino yang dipadukan dengan sensor kualitas udara seperti MQ-135, PMS5003, PMS7003, DHT22, dan MH-Z19. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi IoT mampu mendukung pemantauan kualitas udara secara *real-time* melalui integrasi dengan aplikasi mobile, platform web, maupun layanan *cloud*.

Meskipun demikian, masih terdapat beberapa keterbatasan pada penelitian terdahulu. Beberapa penelitian hanya berfokus pada pemantauan di satu lokasi sehingga belum mampu memberikan perbandingan kondisi kualitas udara antarwilayah. Selain itu, visualisasi data masih terbatas pada aplikasi tertentu atau platform *cloud* seperti ThingSpeak, sehingga aksesibilitas dan fleksibilitas pengguna masih terbatas. Penelitian lain juga belum mengintegrasikan penyimpanan data historis, pemetaan lokasi sensor secara interaktif, serta visualisasi yang mampu menampilkan kondisi kualitas udara dari beberapa titik pemantauan secara bersamaan.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, *research gap* yang ditemukan adalah belum banyak penelitian yang mengintegrasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan kemampuan pemantauan multi-lokasi, penyimpanan data

historis, visualisasi berbasis web, serta pemetaan lokasi sensor secara interaktif dalam satu platform yang terintegrasi.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan dan deteksi kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor MQ-135, PMS7003, dan DHT22 yang terintegrasi dengan ESP32. Sistem dirancang untuk melakukan pengambilan data secara *real-time*, menyimpan data ke basis data, serta menampilkan visualisasi berbasis web dan peta interaktif pada dua lokasi pengamatan yang berbeda. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan penelitian sebelumnya dan memberikan informasi kualitas udara yang lebih komprehensif, dan informatif.

