

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Kualitas udara merupakan faktor kunci dalam menjaga kesehatan masyarakat dan lingkungan. Perserikatan Bangsa-Bangsa melalui *Sustainable Development Goals* (SDGs) Target 11.6 menekankan pentingnya pengurangan dampak lingkungan perkotaan, termasuk kualitas udara, dengan memberikan perhatian khusus pada kelompok rentan. Laporan *The Sustainable Development Goals Report 2025* mencatat bahwa meskipun polusi udara di wilayah perkotaan telah menurun di hampir semua negara, *World Health Organization* (WHO) menyatakan bahwa hampir seluruh populasi global (99%) masih menghirup udara dengan kadar polutan yang melebihi pedoman WHO. Polusi udara ambien dan rumah tangga dikaitkan dengan 7 juta kematian prematur setiap tahunnya akibat penyakit kardiovaskular, kanker paru-paru, dan gangguan pernapasan.

Penerapan *Internet of Things* (IoT) dalam pemantauan kualitas udara telah berkembang pesat untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis *data real-time*. (Azizah et al., 2025) dalam *Journal of Multidisciplinary Application and Commerce* menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor PM2.5, PM10, CO<sub>2</sub>, dan NO<sub>2</sub> mampu memberikan pemantauan polutan secara akurat dengan notifikasi otomatis ketika kualitas udara melebihi ambang batas. Pendekatan *Weighted Class* yang diterapkan meningkatkan

kinerja pemrosesan dan prediksi dengan menangani ketidakseimbangan kelas dalam *dataset* secara signifikan.

Lebih lanjut, (Ramadani & Ramadhan Nasution, 2025) dalam Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan arsitektur *dual-cloud* yang menggabungkan ThingSpeak dan Blynk menggunakan mikrokontroler ESP32. Penelitian ini menerapkan metode Fuzzy Mamdani untuk mengklasifikasikan tingkat kualitas udara menjadi tiga kategori berdasarkan variabel suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas, dengan hasil pengujian menunjukkan skor validasi ahli sebesar 92% dan peningkatan responsivitas sebesar 15% dibandingkan implementasi *single-cloud*. Pada penelitian ini, konsep serupa diterapkan dengan mengintegrasikan ESP32, sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22 untuk pengambilan data yang dikirimkan melalui koneksi *Wi-Fi* menuju *server cloud* dan ditampilkan pada *dashboard* berbasis web secara *real-time*.

## **2.2 Kajian Penelitian Terdahulu**

(Priyatna et al., 2024) mengkaji peran pemerintah Karawang dalam mengatasi polusi udara yang dihasilkan oleh pabrik-pabrik di Kawasan Industri Karawang. Penelitian ini mencatat bahwa pada tahun 2023, Karawang mengalami tingkat polusi udara sangat tinggi dengan nilai *Air Quality Index* (AQI) mencapai 178 (kategori "sangat tidak sehat"), diakibatkan oleh 787 pabrik swasta, 638 Penanaman Modal Asing, 269 Penanaman Modal Dalam Negeri, dan 58 *joint*

*venture*. Dampak buruk mencakup peningkatan kasus ISPA pada masyarakat sekitar dan pencemaran silang hingga ke Jakarta dan sekitarnya. Penelitian ini merekomendasikan pemasangan Instalasi Standar Pencemaran Udara (ISPU) pada pemukiman warga yang berlokasi dekat pabrik untuk pemantauan kualitas udara berkelanjutan.

(Harpad et al., 2022) dalam studinya, mengembangkan alat *monitoring* kualitas udara berbasis IoT pada kawasan industri untuk mendeteksi emisi gas CO dan CO<sub>2</sub>. Penelitian ini menunjukkan hasil pengujian nilai CO = 1452,8 PPM dan CO<sub>2</sub> = 27,17 PPM pada wilayah pabrik, yang berada dalam kategori udara sangat berbahaya berdasarkan level ISPU. Informasi kualitas udara dikirim ke website untuk akses *real-time*, membuktikan efektivitas sistem IoT dalam memberikan peringatan dini terhadap pencemaran udara di kawasan industri. Penelitian ini menjadi fondasi bagi pengembangan sistem *monitoring* yang serupa dengan mengintegrasikan sensor MQ-135, PMS5003T, dan DHT22 pada ESP32 dan ESP32-CAM untuk memantau kualitas udara di pemukiman sekitar Kawasan Industri Karawang.

### **2.3 Internet of Things (IoT)**

*Internet of Things* (IoT) telah menjadi teknologi kunci dalam pemantauan polusi udara secara *real-time*, memungkinkan integrasi sensor, komunikasi nirkabel, komputasi awan, dan analisis data untuk memberikan informasi kualitas udara yang akurat dan responsif. Penelitian yang dilakukan oleh (Jadhav &

Banerjee, 2025) menunjukkan bahwa sistem IoT untuk pemantauan lingkungan menggabungkan arsitektur hibrida yang mengintegrasikan *edge computing* dan *cloud computing* dengan jaringan sensor LoRaWAN. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem IoT yang dikembangkan mampu mendeteksi polusi udara 2 jam lebih cepat dibandingkan sistem manual konvensional, dengan peningkatan akurasi sensor sebesar 20% untuk pengukuran PM2.5, menggunakan ambang batas latensi di bawah 100ms untuk peringatan *real-time* dan akurasi sensor  $\pm 10\%$ . Sistem ini menjadikan IoT sebagai solusi hemat biaya, skalabel, dan berkemampuan *real-time* untuk sistem peringatan dini dan pendukung keputusan lingkungan.

Studi yang dilakukan (Karthikeyan & Kumar N V, 2024) mengembangkan sistem *monitoring Air Quality Index* (AQI) berbasis ESP32 yang mengintegrasikan sensor materi partikulat, nitrogen oksida, karbon monoksida, ozon, serta sulfur dioksida. ESP32 berfungsi sebagai platform yang robust untuk pengambilan data dan *preprocessing*, memfasilitasi pengumpulan dan pemrosesan data sensor sebelum diintegrasikan ke dalam model *deep learning* seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN) dan *Recurrent Neural Networks* (RNN) untuk menganalisis data secara *real-time* dengan akurasi tinggi. Penggunaan ESP32 memberikan keunggulan dalam konsumsi daya rendah, konektivitas nirkabel, dan fleksibilitas sebagai platform pemrosesan data untuk berbagai aplikasi pemantauan lingkungan. Pada penelitian ini, konsep serupa diterapkan dengan mengintegrasikan ESP32 dan ESP32-CAM sebagai pengendali utama yang menghubungkan sensor MQ-135, PMS5003T, dan DHT22 untuk pengambilan data kualitas udara secara *real-time*,

dengan data dikirimkan melalui *Wi-Fi* ke *server cloud* berbasis PHP-MySQL untuk diproses dan ditampilkan pada dashboard web.

## **2.4 Parameter Kualitas Udara**

Kualitas udara ditentukan oleh konsentrasi polutan spesifik di atmosfer yang dapat memengaruhi kesehatan manusia dan ekosistem. Dalam penelitian ini, fokus pengukuran mencakup partikulat halus (*Particulate Matter*) dan gas pencemar yang relevan dengan aktivitas industri (Damero Siregar et al., 2025).

### **2.4.1 *Particulate Matter* (PM2.5 dan PM10)**

*Particulate Matter* (PM) adalah campuran kompleks partikel padat dan cair yang tersuspensi di udara. Berdasarkan ukuran aerodinamisnya, partikulat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama yang memiliki dampak kesehatan berbeda:

1. PM10 (Diameter < 10  $\mu\text{m}$ ): Partikel kasar yang dapat terinhalasi masuk ke saluran pernapasan bagian atas. Paparan jangka pendek terhadap PM10 dikaitkan dengan iritasi saluran napas, batuk, dan eksaserbasi asma.
2. PM2.5 (Diameter < 2.5  $\mu\text{m}$ ): Partikel halus yang memiliki risiko kesehatan lebih tinggi karena ukurannya yang mikroskopis memungkinkan penetrasi hingga ke alveoli paru-paru dan masuk ke

sistem peredaran darah (sirkulasi sistemik). Studi epidemiologi terbaru menunjukkan korelasi kuat antara paparan PM2.5 dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, stroke, dan gangguan fungsi paru kronis (Nengsih et al., 2025).

#### 2.4.2 Gas Pencemar Industri

Selain partikulat, emisi industri juga melepaskan berbagai gas yang bersifat toksik dan iritan. Sensor MQ-135 yang digunakan dalam penelitian ini difungsikan untuk mendeteksi keberadaan kelompok gas berikut:

1. Benzena ( $C_6H_6$ ): Senyawa hidrokarbon aromatik yang bersifat karsinogenik (pemicu kanker). Di kawasan industri, benzena sering dilepaskan dari proses produksi petrokimia. Paparan benzena dalam jangka panjang, meskipun pada konsentrasi rendah, diasosiasikan dengan gangguan fungsi sumsum tulang dan peningkatan risiko leukemia (Halizah & Tejamaya, 2024).
2. Alkohol dan Etanol: Etanol ( $C_2H_5OH$ ) dan golongan alkohol lainnya merupakan bagian dari *Volatile Organic Compounds* (VOCs). Meskipun toksisitasnya lebih rendah dibandingkan benzena, emisi uap alkohol ke udara ambien dapat berkontribusi pada pembentukan ozon troposferik. Inhalasi uap alkohol dalam konsentrasi tinggi dapat memicu iritasi pada mukosa mata dan saluran pernapasan atas.

3. Karbon Monoksida (CO): Gas hasil pembakaran tidak sempurna yang dapat mengikat hemoglobin dalam darah membentuk karboksihemoglobin (COHb), sehingga menghambat suplai oksigen ke jaringan tubuh. Pada konsentrasi tinggi, CO dapat menyebabkan pusing, kelelahan, hingga gangguan kesadaran (Faisal Al Farosi, 2025).
4. Nitrogen Oksida (NO<sub>2</sub>) dan Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>): Gas iritan utama yang merusak mukosa saluran pernapasan dan menurunkan fungsi paru. Kedua gas ini juga merupakan prekursor pembentukan hujan asam dan partikulat sekunder di atmosfer (Dameri Siregar et al., 2025).
5. Amonia (NH<sub>3</sub>) dan Senyawa Organik: Sering ditemukan di kawasan industri kimia, paparan gas ini dapat memicu iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta pada paparan kronis berpotensi menyebabkan kerusakan jaringan paru.

#### **2.4.3 Indeks Standar Pencemar Udara (AQI)**

Untuk mengomunikasikan risiko kesehatan kepada publik, data konsentrasi polutan dikonversi menjadi nilai indeks tanpa satuan yang dikenal sebagai *Air Quality Index* (AQI). Skala AQI mengelompokkan kualitas udara ke dalam kategori mulai dari "Baik" hingga "Berbahaya", yang menjadi acuan tindakan mitigasi bagi kelompok rentan maupun populasi umum (Jayadi et al., 2024).

#### 2.4.4 Faktor Meteorologi dan Kenyamanan Termal

Evaluasi kualitas udara yang komprehensif tidak hanya bergantung pada pengukuran konsentrasi polutan semata, melainkan juga harus mempertimbangkan variabel meteorologi, khususnya temperatur dan kelembapan udara, sebagai faktor determinan yang signifikan.

1. Dinamika Dispersi Polutan Variabel meteorologi memiliki korelasi langsung terhadap pergerakan dan konsentrasi polutan di atmosfer. Kondisi temperatur rendah yang berkombinasi dengan kelembapan tinggi kerap memicu fenomena inversi suhu. Fenomena ini menyebabkan polutan terperangkap di lapisan troposfer bawah, sehingga meningkatkan risiko paparan pada manusia. Sebaliknya, temperatur yang lebih tinggi memfasilitasi dispersi vertikal yang efektif dalam mereduksi konsentrasi polutan di permukaan tanah.
2. Aspek Kenyamanan Termal (*Thermal Comfort*) Dalam perspektif kesehatan lingkungan, kualitas udara mencakup dimensi kenyamanan termal, yaitu kondisi kepuasan manusia terhadap lingkungan termalnya. Relevansi parameter ini dikonfirmasi oleh studi literatur sistematis terhadap teknologi pemantauan udara berbasis *Internet of Things* (IoT), yang menemukan bahwa 70% dari sistem *monitoring* modern memprioritaskan integrasi sensor suhu dan kelembapan sebagai parameter standar. (Saini et al., 2020) menekankan bahwa integrasi ini krusial karena faktor meteorologi dan polutan mempengaruhi kesehatan manusia secara simultan. Mengingat lokasi penelitian berada di kawasan industri Karawang yang memiliki

karakteristik iklim panas, pemantauan parameter ini menjadi urgensi untuk mendeteksi risiko tekanan panas (*heat stress*) yang dapat memperburuk kondisi kesehatan warga, khususnya kelompok rentan yang telah terpapar risiko ISPA.

3. Pengaruh Spesifik Parameter Meteorologi Berdasarkan studi literatur terkini (Prasetyo et al., 2025) interaksi antara parameter meteorologi dan polutan memiliki karakteristik sebagai berikut:

a. Temperatur Udara: Hubungan antara temperatur dan PM2.5 bersifat kompleks. (Shen et al., (2024) mencatat bahwa meskipun suhu rendah di musim dingin sering dikaitkan dengan peningkatan emisi, suhu tinggi justru dapat memicu reaksi fotokimia yang menghasilkan ozon dan aerosol sekunder, serta mengubah ketinggian lapisan batas atmosfer. Studi spesifik di Jakarta oleh (Zhang et al., (2024) bahkan menemukan pola fluktuasi harian temperatur yang memiliki kemiripan pola dengan konsentrasi PM2.5.

b. Kelembapan Relatif: Dampak kelembapan relatif menunjukkan dualisme efek. Di satu sisi, kelembapan tinggi berpotensi meningkatkan deposisi basah yang membersihkan partikel dari udara (Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, 2020). Namun, di sisi lain, kondisi ini dapat memfasilitasi pembentukan aerosol sulfat dan nitrat (Shen et al., 2024). Babu (Zaheer et al., 2022) mencatat adanya korelasi negatif antara kelembapan dan

PM2.5, meskipun studi lain menekankan peran krusialnya dalam reaksi kimia aerosol.

- c. Kecepatan Angin dan Presipitasi: (Luthfiarta et al., 2020) mengidentifikasi korelasi negatif yang signifikan antara kecepatan angin dengan mayoritas polutan (PM2.5, PM10, NO<sub>2</sub>, CO, dan SO<sub>2</sub>). Angin kencang berfungsi sebagai mekanisme ventilasi atmosfer yang mendispersikan polutan (Zhang et al., 2024), sedangkan kondisi angin tenang memicu akumulasi polutan. Selain itu, presipitasi (hujan) terbukti efektif dalam membersihkan atmosfer melalui mekanisme *washout*.

## 2.5 ESP32 DEVKIT V1

ESP32 adalah mikrokontroler berperforma tinggi yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan telah menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi IoT, termasuk sistem pemantauan lingkungan dan kualitas udara. Penelitian yang dilakukan oleh (Arrahma & Mukhaiyar, 2023) menunjukkan bahwa ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan yang andal dengan fitur konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth* terintegrasi, serta dapat diprogram menggunakan *Arduino IDE* untuk berbagai aplikasi pemantauan *real-time*. ESP32 DEVKIT V1 dengan 30 pin merupakan versi development board yang dirancang untuk kemudahan prototyping dan penelitian, dilengkapi dengan banyak *port* komunikasi dan interface yang memungkinkan integrasi mudah dengan berbagai sensor dan modul eksternal. Fitur

unggulan termasuk konektivitas *Wi-Fi* IEEE 802.11 b/g/n/e/i yang mendukung mode AP, STA, dan AP+STA, memfasilitasi pengiriman data secara nirkabel ke *server cloud* dengan responsif. Kehadiran 3 *port* UART, 2 *port* SPI, dan 3 *port* I2C memberikan fleksibilitas tinggi dalam menghubungkan berbagai sensor secara bersamaan, sehingga sangat sesuai untuk sistem multi-sensor seperti pemantauan kualitas udara.

Spesifikasi teknis ESP32 DEVKIT V1 yang digunakan pada penelitian ini mencakup: tegangan operasi 3.3V dengan *input voltage* 7-12V (*V<sub>in</sub>*), 25 Digital IO Pin (DIO) untuk kontrol logika, 6 Analog *Input* Pin (ADC) untuk pembacaan sensor analog, 2 Analog *Output* Pin (DAC) untuk *output* analog, memori *flash* 4 MB untuk penyimpanan program dan data, serta SRAM 520 KB untuk operasi *runtime*. Kecepatan prosesor mencapai 240 MHz yang memungkinkan pemrosesan data *real-time* dengan latensi rendah, menjadikannya ideal untuk akuisisi data sensor yang cepat dan pengiriman data ke *cloud* secara berkelanjutan. Dilengkapi dengan CP2102 USB *controller*, ESP32 DEVKIT V1 memudahkan komunikasi dengan komputer untuk *programming* dan *debugging*.

Studi yang dilakukan oleh (Purnamasari et al., 2024) menunjukkan bahwa ESP32 efektif digunakan dalam pengembangan sistem *smart home* dan *monitoring* berbasis IoT dengan kemampuan deteksi *real-time* dan integrasi dengan platform *cloud*. Kombinasi dari spesifikasi ini memberikan kepada ESP32 keunggulan dalam konsumsi daya yang efisien, kecepatan pemrosesan yang tinggi, dan kapabilitas konektivitas yang *robust*, sehingga menjadi pilihan optimal untuk node IoT pada sistem pemantauan kualitas udara di lokasi penelitian.

## 2.6 ESP32-CAM

ESP32-CAM adalah modul mikrokontroler berbasis ESP32 yang dilengkapi dengan kamera OV2640 dan konektivitas *Wi-Fi* serta *Bluetooth* terintegrasi, menjadikannya solusi ideal untuk aplikasi IoT yang memerlukan kemampuan visual *monitoring*. Penelitian yang dilakukan oleh (Rusimamto et al., 2021) mengimplementasikan Arduino Pro Mini dan ESP32-CAM untuk pemantauan suhu otomatis pada termogun berbasis IoT, di mana ESP32-CAM berfungsi sebagai modul pengambil gambar dan transmisi data melalui jaringan *Wi-Fi* dengan hasil yang menunjukkan sistem mampu bekerja secara *real-time* dan efisien. Modul ini memiliki ukuran ringkas dan harga terjangkau, serta dapat diprogram menggunakan Arduino IDE untuk berbagai keperluan seperti *smart home*, sistem keamanan, CCTV jarak jauh, dan pemantauan lingkungan. ESP32-CAM mampu mengambil foto, merekam video, dan mentransmisikannya melalui internet, dengan dukungan resolusi hingga 1600x1200 (UXGA) yang memadai untuk aplikasi *monitoring* visual di lokasi pemantauan kualitas udara.

Spesifikasi teknis ESP32-CAM yang digunakan pada penelitian ini mencakup: *low-power dual-core* 32-bit CPU untuk prosesor aplikasi dengan frekuensi *clock* hingga 240MHz dan daya komputasi hingga 600 DMIPS, memori *built-in* 520 KB SRAM dengan external 4M PSRAM untuk *buffer* gambar dan operasi intensif memori, dukungan *interface* UART/SPI/I2C/PWM/ADC/DAC untuk integrasi dengan berbagai sensor dan aktuator, dukungan kamera OV2640 2 MP dan OV7670 dengan *flash* LED terintegrasi untuk pengambilan gambar dalam kondisi cahaya rendah, kemampuan upload gambar melalui *Wi-Fi*, dukungan kartu

TF (*MicroSD*) untuk penyimpanan lokal, *multiple sleep modes* untuk efisiensi daya, *embedded* Lwip dan FreeRTOS untuk manajemen jaringan dan *multitasking*, serta mendukung mode kerja STA/AP/STA+AP dengan fitur *Smart Config/AirKiss* untuk konfigurasi jaringan *one-click*.

Studi yang dilakukan oleh (Sari & Waliyuddin, 2021) mengembangkan alat deteksi polusi udara dalam ruangan berbasis IoT menggunakan ESP32-CAM yang terintegrasi dengan sensor MQ2, di mana ketika polusi terdeteksi kamera akan mengambil gambar dan mengirimkannya ke aplikasi Telegram sebagai notifikasi visual kepada pengguna. Pada penelitian ini, ESP32-CAM digunakan untuk mendokumentasikan kondisi visual lokasi pemantauan kualitas udara di pemukiman sekitar Kawasan Industri Karawang, dengan gambar yang dapat diakses melalui dashboard web untuk keperluan verifikasi dan dokumentasi kondisi lingkungan.

## **2.7 Sensor MQ-135**

Sensor MQ-135 diadopsi dalam penelitian ini sebagai instrumen utama untuk mendeteksi keberadaan gas polutan di udara ambien. Perangkat ini diklasifikasikan sebagai sensor tipe *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) yang memiliki sensitivitas luas terhadap berbagai senyawa gas berbahaya, termasuk Amonia ( $\text{NH}_3$ ), Benzena ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), Karbon Dioksida ( $\text{CO}_2$ ), hingga Karbon Monoksida ( $\text{CO}$ ). Mekanisme transduksi pada MQ-135 berbasis pada material sensitif Stannum Dioksida ( $\text{SnO}_2$ ) sebagai lapisan aktif. Secara teoritis, material

SnO<sub>2</sub> memiliki konduktivitas listrik yang rendah di udara bersih, namun ketika terpapar gas target, terjadi reaksi reduksi-oksidasi pada permukaan sensor yang menyebabkan penurunan resistivitas material, sehingga konduktivitas listrik meningkat secara proporsional dengan konsentrasi gas. Validasi kinerja sensor ini telah dikonfirmasi oleh studi (Taufiq et al., 2024), yang membuktikan bahwa MQ-135 mampu memberikan respons *real-time* yang linier terhadap fluktuasi kualitas udara dengan waktu pemulihan (*recovery time*) yang cepat, memungkinkan pengukuran kuantitatif yang andal.

Ditinjau dari aspek spesifikasi teknis, sensor ini dipilih karena profilnya yang kompatibel dengan arsitektur sistem tertanam (*embedded system*) berdaya rendah. Modul ini memiliki dimensi fisik yang ringkas berukuran 32mm x 20mm dan dilengkapi dengan *chip* komparator LM393 untuk menjamin stabilitas pembacaan sinyal. Sensor beroperasi pada tegangan kerja 5V (baik AC maupun DC) dan mendukung antarmuka data ganda (*Dual Output*), yaitu keluaran digital (TTL) dan keluaran analog (AO) dengan resolusi ADC 10-bit. Fitur ini memfasilitasi interoperabilitas yang mulus dengan mikrokontroler seperti ESP32 tanpa memerlukan rangkaian pengondisi sinyal tambahan yang kompleks. Karakteristik umur operasional yang panjang serta stabilitas termal yang baik menjadikan komponen ini sangat ideal untuk implementasi perangkat pemantauan kontinyu di lingkungan luar ruang.

Relevansi penggunaan sensor ini dalam skenario *Internet of Things* (IoT) juga diperkuat oleh riset (Asri & Irfan, 2024), yang berhasil mengintegrasikan MQ-135 dengan sensor variabel lingkungan lainnya untuk sistem peringatan dini

otomatis. Mengacu pada kapabilitas tersebut, dalam penelitian ini sensor MQ-135 difungsikan secara spesifik untuk mengakuisisi data konsentrasi gas polutan yang terpapar ke area pemukiman di sekitar Kawasan Industri Karawang. Data analog yang dihasilkan oleh sensor selanjutnya akan diproses oleh unit pemroses pusat dan ditransmisikan ke *server cloud* guna divisualisasikan sebagai grafik tren dinamis pada antarmuka *dashboard* pengguna.

## 2.8 Sensor PMS5003T

Sensor PMS5003T adalah sensor *particulate matter* berbiaya rendah yang dikembangkan oleh Plantower dan telah menjadi salah satu sensor yang paling banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara global. Penelitian yang dilakukan oleh (Searle et al., 2023) mengidentifikasi adanya pembaruan performa pada sensor versi PMS-U sejak Juni 2021. Studi tersebut menemukan bias pembacaan rendah pada konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di bawah 16 µg/m<sup>3</sup>. Meskipun bias ini tidak signifikan pada kondisi polusi tinggi (seperti kebakaran hutan), temuan ini penting diperhatikan untuk studi kesehatan yang membutuhkan presisi tinggi pada konsentrasi rendah. Sensor PMS5003T bekerja menggunakan prinsip *optical particle counter* (OPC) dengan *laser scattering* untuk mendeteksi dan menghitung partikel dalam udara, kemudian mengkonversi hitungan partikel tersebut menjadi massa konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, dan PM<sub>10</sub>.

Spesifikasi teknis sensor PMS5003T yang digunakan pada penelitian ini mencakup: dimensi kompak ~38 × 50 × 21 mm<sup>3</sup> dengan konektor 8-pin 1.25 mm

Molex PicoBlade, kebutuhan daya  $5V \pm 0.5V$  dengan konsumsi  $\sim 100$  mA saat operasi dan  $\leq 200$   $\mu A$  saat mode sleep untuk efisiensi energi, level I/O 3.3V TTL (tidak toleran terhadap 5V) yang kompatibel dengan ESP32, serta *interface* UART 9600 *baud* (8N1) untuk komunikasi serial yang mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler. Sensor ini mampu mengukur PM2.5, dan PM10 secara simultan, serta dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan terintegrasi, menjadikannya solusi *all-in-one* untuk pemantauan kualitas udara. *Control* pins *SET* dan *RESET* memungkinkan pengaturan mode operasi (*active*, *passive*, *sleep*, *wake*) untuk mengoptimalkan konsumsi daya dan frekuensi pembacaan sesuai kebutuhan aplikasi.

Studi yang dilakukan oleh (Purnamasari et al., 2024) menunjukkan bahwa sensor PMS5003 yang diintegrasikan dalam sistem IoT mampu mengukur, PM2.5, dan PM10 dengan akurasi tinggi dan mengunggah data ke *cloud* pada interval 15 detik untuk visualisasi *real-time*, dengan hasil pengukuran menunjukkan variasi signifikan antara hari kerja dan akhir pekan yang mencerminkan pengaruh aktivitas antropogenik terhadap kualitas udara. Pada penelitian ini, sensor PMS5003T digunakan untuk mengukur konsentrasi *particulate matter* di pemukiman sekitar Kawasan Industri Karawang, dengan data dikirimkan melalui ESP32 ke *server cloud* untuk analisis tren dan visualisasi.

## 2.9 Sensor DHT22

Sensor DHT22, juga dikenal sebagai AM2302 atau RHT03, merupakan sensor suhu dan kelembaban digital yang banyak digunakan dalam aplikasi pemantauan lingkungan, sistem *weather station*, dan proyek IoT berbasis Arduino maupun mikrokontroler lainnya. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip kapasitif untuk pengukuran kelembaban dan termistor untuk pengukuran suhu, dengan *chip* 8-bit internal yang mengkonversi sinyal analog dari kedua sensor menjadi *output* sinyal digital yang dapat dibaca langsung oleh mikrokontroler. Dibandingkan dengan DHT11, DHT22 memiliki akurasi yang lebih tinggi, rentang pengukuran yang lebih luas, dan kecepatan respons yang lebih baik dalam mendeteksi perubahan suhu dan kelembaban. Sensor ini menampilkan *output* sinyal digital melalui *single-wire interface*, memudahkan integrasi dengan berbagai platform *embedded system* tanpa memerlukan resistor atau kapasitor eksternal.

Spesifikasi teknis sensor DHT22 yang digunakan pada penelitian ini mencakup: tipe sensor DHT22/AM2302, tegangan kerja 3.3V hingga 6V DC dengan konsumsi arus ~1-1.5 mA saat pengukuran dan  $\leq 50 \mu\text{A}$  saat *standby*, *output* berupa sinyal digital melalui *single-wire bus* dengan *sampling period* maksimum 2 detik, rentang pengukuran suhu  $-40^{\circ}\text{C}$  hingga  $+80^{\circ}\text{C}$  dengan akurasi  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , rentang pengukuran kelembaban 0% hingga 100% RH dengan akurasi  $\pm 2\%$ , resolusi 16-bit untuk presisi pengukuran tinggi, dan kompatibilitas penuh dengan Arduino Uno, Mega, ESP32, Raspberry Pi, serta mikrokontroler lainnya. Studi yang dilakukan oleh (Asri & Irfan, 2024) menunjukkan bahwa sensor DHT22 yang diintegrasikan dalam sistem IoT pemantauan kualitas udara mampu melakukan

pembacaan suhu dan kelembaban dengan akurasi tinggi, memungkinkan karakterisasi lingkungan yang lebih komprehensif dengan memperhitungkan faktor meteorologi yang mempengaruhi konsentrasi polutan. Pada penelitian ini, sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu ambien dan kelembaban relatif di pemukiman sekitar Kawasan Industri Karawang, dengan data yang dikirimkan melalui ESP32 ke *server cloud* untuk analisis korelasi antara kondisi meteorologi dan tingkat polusi udara pada *dashboard*.

