

BAB II

TINJAUAN LITERATUR

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian ini juga menggunakan beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi fondasi dari penelitian yang akan dilakukan. Tinjauan pustaka ini berfungsi untuk mengulas, menganalisis, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian-penelitian yang sudah ada sebelumnya yang relevan dengan topik penelitian yang akan dilaksanakan mengenai deteksi pulusi udara.

Penelitian oleh Sulistiyanti dkk. membahas metode pendeteksian polusi udara menggunakan pengolahan citra inframerah berbasis transformasi wavelet. Penelitian ini bertujuan mendeteksi keberadaan polutan di udara secara tidak langsung melalui noise atau piksel putih yang muncul pada citra inframerah akibat pantulan panjang gelombang polutan yang tertangkap sensor kamera digital yang dimodifikasi dengan filter SRS. Citra inframerah diambil di area pasar Bambu Kuning, Bandar Lampung, pada rentang waktu pukul 08.00–16.00 dengan interval dua jam, kemudian diproses melalui tahapan konversi ke grayscale, registrasi citra, cropping area of interest, transformasi wavelet 2D, dan perhitungan intensitas rata-rata piksel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat polusi tertinggi terjadi pada pukul 12.00, bertepatan dengan jam lalu lintas tersibuk, sedangkan polusi terendah terjadi pada pukul 08.00 saat aktivitas kendaraan masih rendah. Temuan ini juga diperkuat oleh pengukuran kadar CO₂ menggunakan alat Combo IAQ meter yang menunjukkan pola tren serupa. Secara keseluruhan,

penelitian ini menyimpulkan bahwa transformasi wavelet pada citra inframerah efektif digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis tren polusi udara berdasarkan perubahan intensitas piksel pada citra (Sulistiyanti, Setyawan and Komarudin, 2019).

Penelitian selanjutnya oleh Marviola Hardini dkk. membahas pendekatan prediksi kualitas udara berbasis citra dengan memanfaatkan teknologi deep learning, khususnya Convolutional Neural Networks (CNN), serta teknik machine learning. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya tingkat pencemaran udara yang berdampak serius terhadap kesehatan manusia dan keterbatasan metode pemantauan konvensional yang bergantung pada sensor fisik. Model yang diusulkan menggunakan citra lingkungan (foto lanskap/langit) yang diambil melalui kamera ponsel sebagai sumber data utama, kemudian diekstraksi fitur-fiturnya menggunakan CNN untuk memprediksi Air Quality Index (AQI), dengan validasi menggunakan data sensor kualitas udara di berbagai wilayah perkotaan. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji persepsi masyarakat terhadap kualitas udara dan efektivitas platform AIR-Protection melalui kuesioner yang dianalisis menggunakan metode SEM-PLS dengan bantuan perangkat lunak SmartPLS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis citra dan CNN mampu memberikan prediksi kualitas udara yang akurat serta mampu menangkap hubungan kompleks antara kualitas udara dan faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Temuan lain menunjukkan bahwa pengalaman digital dan loyalitas pengguna berpengaruh signifikan terhadap penggunaan platform AIR-Protection, sementara kepuasan pengguna tidak menunjukkan pengaruh langsung yang

signifikan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi citra digital, deep learning, dan analisis persepsi pengguna merupakan pendekatan inovatif dan menjanjikan untuk meningkatkan sistem pemantauan kualitas udara yang lebih fleksibel, murah, dan mudah diakses oleh masyarakat (Hardini *et al.*, 2023).

Penelitian yang dilakukan oleh Leonardo Simanullang dkk. membahas pemanfaatan citra inframerah untuk menentukan kondisi udara lingkungan, baik udara bersih maupun tercemar polusi, sebagai alternatif dari alat ukur kualitas udara konvensional yang relatif mahal dan kurang terawat. Penelitian ini menggunakan kamera digital Fujifilm FinePix A400 dan Casio QV-R200 yang dipadukan dengan filter optik berupa negative film untuk menghasilkan citra inframerah, kemudian citra diproses menggunakan teknik pengolahan citra digital meliputi konversi grayscale, cropping, serta pemfilteran menggunakan Low Pass Filter (LPF), Median Filter, dan High Pass Filter (HPF). Penentuan kondisi udara dilakukan melalui analisis perubahan histogram citra setiap dua jam serta perhitungan nilai Signal to Noise Ratio (SNR), dengan studi kasus pada dua lokasi berbeda, yaitu Bambu Kuning yang merepresentasikan kondisi udara tercemar dan Lembah Hijau sebagai wilayah dengan udara relatif bersih. Hasil penelitian menunjukkan bahwa udara tercemar ditandai dengan histogram citra inframerah yang memiliki lebar cukup besar dan mengalami pergeseran ke kanan seiring waktu, sedangkan udara bersih ditunjukkan oleh histogram dengan puncak sempit dan pergeseran yang tidak beraturan. Namun demikian, nilai dan grafik SNR yang diperoleh belum menunjukkan pola yang konsisten dan belum dapat digunakan

secara andal untuk menentukan kondisi udara, sehingga penelitian ini menyimpulkan bahwa analisis histogram citra inframerah lebih efektif dibandingkan pendekatan SNR dalam mengidentifikasi kualitas udara lingkungan (Simanullang *et al.*, 2013).

Penelitian selanjutnya oleh Mustafa dkk Penelitian ini membahas pendeteksian asap rokok menggunakan teknik pengolahan citra digital sebagai solusi pemantauan lingkungan sehat di area publik, mengingat tingginya tingkat konsumsi rokok di Indonesia dan lemahnya penerapan kawasan tanpa rokok. Metode yang digunakan meliputi tahapan akuisisi citra menggunakan kamera ponsel, pre-processing berupa resize citra, segmentasi foreground dengan metode active contour, serta segmentasi berbasis color models untuk mengekstraksi ciri visual asap rokok. Dataset terdiri dari 300 citra asap rokok yang dikelompokkan berdasarkan jumlah puntung rokok, kemudian diuji menggunakan variasi nilai threshold. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai threshold optimal berada pada $th = 15$ dengan tingkat keberhasilan deteksi rata-rata sebesar 65,67%, sementara 34,33% citra tidak terdeteksi akibat pengaruh perubahan pencahayaan dan pergerakan kamera, sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi segmentasi foreground dan color models cukup efektif dalam mendeteksi asap rokok, namun masih memerlukan pengembangan lebih lanjut agar akurasi sistem menjadi lebih optimal (Inal Achyar, Yasir and Satria, 2023).

Penelitian selanjutnya yang mengusulkan VTrUNet, sebuah model segmentasi asap berbasis UNet yang diperkuat transformer untuk mendeteksi asap kebakaran hutan pada citra multispektral Landsat dengan latar belakang kompleks

seperti awan, kabut, bayangan awan, variasi permukaan bumi, serta asap tipis yang bersifat kontekstual. Model ini memanfaatkan enam kanal spektral (RGB, NIR, SWIR1, SWIR2) dan terdiri dari dua komponen utama: Virtual Channel Construction (VC) untuk memperluas kanal fitur agar pola spektral lebih terwakili, serta Transformer-boosted UNet (TrUNet) yang mengintegrasikan self-attention di setiap level UNet guna menangkap korelasi jarak jauh dan fitur kontekstual, khususnya untuk membedakan peran asap tipis sebagai target atau latar belakang. Selain itu, penulis memperkenalkan metrik evaluasi F1 termoderasi (F1h) yang dirancang untuk kondisi pelabelan parsial, sehingga penilaian kinerja lebih adil pada area yang ambigu. Melalui studi ablasi komprehensif, ditunjukkan bahwa tidak semua penambahan modul meningkatkan performa, dan kombinasi VC + TrUNet tanpa channel attention memberikan hasil terbaik. Eksperimen pada dataset Landsat memperlihatkan bahwa VTrUNet mengungguli metode mutakhir seperti Smoke-UNet, MA-UNet, dan GFUNet dengan peningkatan signifikan pada skor F1, presisi, dan keseimbangan presisi–recall, serta mampu mendeteksi asap dengan berbagai warna dan kepadatan pada kondisi lingkungan yang menantang, meskipun masih terdapat keterbatasan pada area berwarna coklat gelap, pantai berpasir, dan bayangan luas yang diusulkan sebagai arah penelitian selanjutnya (J. Liu *et al.*, 2024).

2.2 Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital didefinisikan sebagai proses memanipulasi dan menganalisis data visual dua dimensi menggunakan komputer untuk menghasilkan representasi yang lebih informatif atau untuk mengekstrak fitur-

fitur tertentu yang tidak langsung terlihat oleh mata manusia (Hardini *et al.*, 2023). Rangkaian operasi dalam pengolahan citra biasanya mengalir secara berurutan, dimulai dari akuisisi (penangkapan citra melalui kamera atau sensor), pre-processing (perbaikan kualitas seperti peningkatan kontras, reduksi derau, dan normalisasi cahaya), segmentasi (pemisahan objek dari latar belakang), ekstraksi ciri (pengambilan parameter numerik seperti tekstur, bentuk, atau warna), hingga interpretasi atau klasifikasi. Tujuan akhir dari keseluruhan proses ini adalah agar sistem komputer mampu "memahami" isi citra secara otomatis, atau setidaknya menyajikan informasi visual dalam bentuk yang lebih mudah dianalisis oleh manusia (Liaw *et al.*, 2020).

Pengolahan citra digital dalam konteks lingkungan perkotaan telah berkembang pesat sebagai respons terhadap keterbatasan sistem pemantauan kualitas udara konvensional. Stasiun pemantauan ground-based, meskipun akurat, seringkali gagal menyediakan cakupan spasial yang memadai karena jumlahnya yang terbatas dan distribusi yang tidak merata (X. Liu *et al.*, 2024). Pendekatan berbasis citra menawarkan alternatif yang menjanjikan dengan memanfaatkan berbagai sumber data visual, mulai dari citra satelit resolusi menengah seperti Sentinel dan Landsat, hingga citra *street view* dan foto *smartphone*. Prinsip dasarnya terletak pada kemampuan polutan udara, khususnya partikulat seperti PM_{2.5} dan PM₁₀, dalam menghamburkan dan menyerap cahaya tampak, yang secara langsung mempengaruhi nilai piksel pada citra digital. Dengan kata lain, semakin tinggi konsentrasi polutan, semakin kabur atau "buram" objek dalam

citra, sehingga parameter kecerahan (brightness) dan kontras dapat menjadi indikator visual polusi (Baran and Zender-Świercz, 2025).

2.3 Preprocessing

Preprocessing merupakan tahap awal dan krusial dalam alur pengolahan citra digital yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas citra mentah sebelum memasuki proses lanjutan seperti segmentasi, ekstraksi ciri, atau klasifikasi. Citra yang diakuisisi dari berbagai sumber baik kamera digital, smartphone, maupun citra satelit seringkali mengandung berbagai bentuk gangguan atau ketidaksempurnaan. Gangguan ini dapat berupa derau (noise) akibat keterbatasan sensor, pencahayaan yang tidak merata, kontras yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, distorsi geometris akibat sudut pengambilan gambar, hingga artefak kompresi. Jika tidak ditangani dengan baik, gangguan-gangguan tersebut akan menurunkan akurasi interpretasi pada tahap-tahap selanjutnya (Rizki Akbar Pratama, Barry Ceasar, 2025).

Tahap preprocessing dalam penelitian ini bertujuan untuk mempersiapkan citra mentah area publik agar layak diproses lebih lanjut pada tahap segmentasi dan ekstraksi fitur. Citra yang diakuisisi dari berbagai sumber, seperti kamera pengawas publik, dokumentasi lapangan, atau citra satelit, umumnya memiliki dimensi yang tidak seragam dan merepresentasikan warna dalam ruang RGB (Red-Green-Blue). Padahal, dalam ruang RGB, informasi kecerahan dan warna bercampur sehingga sulit memisahkan efek polusi udara dari efek perubahan

pencahayaan alami seperti bayangan atau perbedaan sudut datang sinar matahari. Oleh karena itu, dua operasi utama dilakukan pada tahap preprocessing ini. Operasi pertama adalah resizing, yaitu mengubah seluruh citra ke dalam ukuran dimensi piksel yang seragam. Penyeragaman ini penting agar proses komputasi pada tahap-tahap selanjutnya, seperti thresholding dan ekstraksi fitur statistik, dapat berjalan secara konsisten dan efisien tanpa perlu menyesuaikan parameter terhadap ukuran citra yang berbeda-beda. Resolusi yang dipilih harus cukup tinggi untuk mempertahankan detail spasial yang relevan dengan jejak polusi, namun tidak terlalu besar sehingga membebani sumber daya komputasi (Ashillah *et al.*, 2025). Operasi kedua adalah konversi ruang warna dari RGB ke HSV (Hue-Saturation-Value). Konversi ini dipilih karena ruang HSV memisahkan komponen warna (Hue), kejenuhan warna (Saturation), dan kecerahan (Value) secara independen. Dalam konteks estimasi polusi udara, komponen Value menjadi sangat krusial karena partikulat di udara seperti PM2.5 dan PM10 menghamburkan cahaya tampak, yang secara langsung menurunkan nilai kecerahan pada area-area tertentu seperti langit atau objek yang berada di kejauhan. Sementara itu, komponen Saturation juga relevan karena polusi cenderung membuat warna langit yang awalnya jenuh menjadi tampak lebih pudar atau keabu-abuan. Dengan berpisahnya komponen-komponen ini, efek polusi dapat diukur secara lebih akurat tanpa terganggu oleh variasi warna alami yang tidak berkaitan dengan kualitas udara. Setelah kedua operasi preprocessing ini selesai, citra siap memasuki tahap segmentasi menggunakan metode thresholding, di mana nilai ambang batas akan diterapkan terutama pada komponen Value dan

Saturation untuk memisahkan area yang diduga tercemar dari area yang relatif bersih (Affandi *et al.*, 2026).

2.4 Polusi Udara

Polusi udara merupakan kondisi di mana terdapat kontaminan atau zat-zat berbahaya di dalam atmosfer yang dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup, merusak lingkungan, serta menurunkan kualitas kehidupan manusia. Menurut *World Health Organization* (WHO), polusi udara didefinisikan sebagai pencemaran lingkungan dalam ruangan maupun luar ruangan oleh agen kimia, fisik, atau biologis yang mengubah karakteristik alami atmosfer. Sumber polusi udara dapat berasal dari aktivitas manusia (*anthropogenic*) seperti emisi kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, aktivitas industri, dan pembakaran biomassa, maupun sumber alami seperti letusan gunung berapi, kebakaran hutan, dan debu vulkanik (Najwa *et al.*, 2025).



Gambar 2.1 Contoh Polusi Udara

Kualitas udara diukur berdasarkan konsentrasi berbagai polutan yang terkandung di dalamnya. Parameter utama yang digunakan dalam pemantauan kualitas udara meliputi Particulate Matter (PM_{2.5} dan PM₁₀), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan ozon (O₃). PM_{2.5}

adalah partikel dengan diameter aerodinamis kurang dari 2,5 mikrometer yang sangat berbahaya karena mampu menembus saluran pernapasan bagian bawah hingga alveoli paru-paru. PM10 merupakan partikel dengan diameter kurang dari 10 mikrometer yang dapat terhirup dan menyebabkan gangguan pada saluran pernapasan atas. Konsentrasi polutan-polutan tersebut menjadi dasar perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) atau Air Quality Index (AQI) yang digunakan sebagai indikator tingkat bahaya polusi udara bagi kesehatan masyarakat (Kurniawan, 2017).

Paparan polusi udara dalam jangka pendek maupun jangka panjang dapat menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan manusia. Dampak jangka pendek meliputi iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, batuk, sesak napas, serta eksaserbasi penyakit asma. Sementara itu, paparan jangka panjang dapat menyebabkan penyakit paru-paru kronis, kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular, hingga penurunan fungsi kognitif. WHO memperkirakan bahwa setiap tahunnya sekitar 7 juta kematian prematur di seluruh dunia disebabkan oleh polusi udara, menjadikannya salah satu risiko kesehatan lingkungan terbesar. Selain dampak terhadap kesehatan, polusi udara juga memengaruhi ekosistem melalui fenomena hujan asam, pengurangan visibilitas atmosfer, perubahan iklim global akibat efek gas rumah kaca, serta kerusakan vegetasi dan keanekaragaman hayati (Azizah and Lestari, 2026).

Polusi udara, khususnya yang disebabkan oleh partikulat dan aerosol, memiliki manifestasi visual yang dapat dideteksi melalui analisis citra digital. Keberadaan partikel-partikel polutan di atmosfer menyebabkan fenomena haze

(kabut asap) yang mengubah karakteristik optis cahaya yang melewatinya, sehingga memengaruhi kecerahan, kontras, saturasi warna, dan visibilitas objek dalam gambar. Penelitian terdahulu menunjukkan adanya korelasi antara tingkat polusi udara dengan degradasi kualitas visual pada citra yang diambil di lingkungan terbuka. Parameter citra seperti nilai intensitas piksel, perbedaan kontras, distribusi warna pada kanal RGB, serta tingkat kekaburan (blur metric) dapat dimanfaatkan sebagai fitur estimasi konsentrasi polutan. Pendekatan ini membuka peluang pemanfaatan kamera pengawas (CCTV), kamera satelit, maupun kamera smartphone yang telah tersebar luas sebagai instrumen pemantauan kualitas udara yang ekonomis dan berkesinambungan (Sohrabi and Maleki, 2025).

2.5 Sensor Kualitas Udara

Sensor kualitas udara merupakan perangkat elektronik yang dirancang untuk mendeteksi, mengukur, dan memantau konsentrasi berbagai polutan atau parameter fisikokimia yang terdapat di udara ambien. Perkembangan teknologi sensor kualitas udara telah mengalami kemajuan yang signifikan, mulai dari perangkat stasioner berukuran besar dengan akurasi tinggi yang digunakan pada stasiun pemantauan udara resmi, hingga sensor berukuran kecil (low-cost sensor) yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem pemantauan portabel dan jaringan IoT (Internet of Things). Sensor kualitas udara bekerja berdasarkan berbagai prinsip pengukuran fisika dan kimia, di antaranya deteksi optis menggunakan hamburan cahaya laser, reaksi elektrokimia, spektroskopi inframerah, serta metode gravimetri. Pemilihan jenis sensor disesuaikan dengan polutan target yang ingin

diukur, rentang konsentrasi yang diharapkan, tingkat akurasi yang diperlukan, serta kondisi lingkungan tempat sensor dioperasikan (Hendi Budianto, 2024).

Berdasarkan prinsip kerja dan polutan yang dideteksi, sensor kualitas udara diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama. Sensor partikulat menggunakan prinsip hamburan cahaya atau penghamburan laser untuk mendeteksi keberadaan partikel tersuspensi di udara dan mengestimasi konsentrasi PM2.5 maupun PM10. Cahaya dari sumber laser diarahkan ke aliran udara yang melewati ruang pengukuran, dan intensitas cahaya yang dihamburkan oleh partikel dideteksi oleh fotodioda untuk menghitung konsentrasi partikel. Sensor gas elektrokimia bekerja berdasarkan reaksi oksidasi-reduksi antara gas target dengan elektroda dalam sel elektrokimia yang menghasilkan arus listrik proporsional terhadap konsentrasi gas. Sensor elektrokimia umum digunakan untuk mengukur CO, NO₂, SO₂, dan O₃ dengan sensitivitas tinggi pada konsentrasi rendah.



Gambar 2.1 Alat Pengukur Kualitas Udara

2.6 Segmentasi Citra

Segmentasi citra merupakan salah satu tahapan dalam pengolahan citra digital (digital image processing) yang bertujuan untuk mempartisi atau membagi suatu citra menjadi beberapa region atau segmen yang memiliki karakteristik serupa, seperti warna, intensitas, tekstur, atau batas tepi objek. Proses segmentasi mengubah representasi citra menjadi sesuatu yang lebih bermakna dan lebih mudah dianalisis (Gibran, 2025). Hasil segmentasi berupa sekumpulan region yang secara kolektif mencakup seluruh area citra, di mana setiap piksel dalam satu region memiliki kemiripan atribut visual yang tinggi dibandingkan piksel di region berbeda. Dalam konteks estimasi polusi udara, segmentasi citra digunakan untuk memisahkan elemen-elemen visual dalam gambar seperti langit, vegetasi, bangunan, jalan, dan asap, sehingga analisis dapat difokuskan pada region yang paling relevan terhadap indikasi keberadaan polutan di atmosfer.

Berbagai metode segmentasi citra telah dikembangkan dan diklasifikasikan berdasarkan pendekatan yang digunakan. Pertama, segmentasi berbasis ambang batas (thresholding) merupakan metode paling sederhana yang mempartisi piksel berdasarkan nilai intensitasnya terhadap suatu nilai ambang tertentu. Metode Otsu's thresholding secara otomatis menentukan nilai ambang optimal dengan memaksimalkan variansi antar kelas piksel (Yovi Apridiansyah, Rozali Toyib and Ardi Wijaya, 2022). Kedua, segmentasi berbasis tepi (edge-based segmentation) memanfaatkan diskontinuitas intensitas piksel pada batas antara dua region yang berbeda, menggunakan operator seperti Sobel, Canny, atau Laplacian of Gaussian (Azis *et al.*, 2024). Ketiga, segmentasi berbasis region (region-based segmentation) mengelompokkan piksel yang berdekatan dan

memiliki atribut serupa melalui metode region growing atau region splitting and merging. Keempat, segmentasi berbasis kluster (clustering-based) seperti algoritma K-Means dan Fuzzy C-Means mengelompokkan piksel ke dalam sejumlah kluster berdasarkan kemiripan fitur ruang warna. Kelima, segmentasi semantik (semantic segmentation) berbasis deep learning mengklasifikasikan setiap piksel ke dalam kategori semantik tertentu menggunakan arsitektur jaringan saraf tiruan seperti Fully Convolutional Network (FCN), U-Net, DeepLab, dan SegNet (Aakanksha, Arushi Seth, 2022).

Setelah proses segmentasi dilakukan, tahap ekstraksi fitur bertujuan untuk mengubah informasi visual dari region yang tersegmentasi menjadi representasi numerik yang dapat diproses oleh model komputasi. Fitur-fitur yang relevan untuk estimasi polusi udara mencakup fitur berbasis warna seperti rata-rata dan variansi pada setiap kanal warna, fitur berbasis tekstur menggunakan metode Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) yang mengukur homogenitas, energi, kontras, dan korelasi tekstur, serta fitur berbasis frekuensi yang diperoleh melalui transformasi Fourier atau Wavelet untuk menganalisis degradasi ketajaman citra akibat kabut. Selain itu, metrik visibilitas dan tingkat kabut (haze metric) seperti Dark Channel Prior (DCP) yang dikembangkan oleh He et al. (2009) banyak dimanfaatkan untuk mengestimasi kedalaman transmisi cahaya melalui atmosfer yang tercemar. Keseluruhan fitur tersebut membentuk vektor fitur yang menjadi representasi kuantitatif kondisi polusi udara yang terekam dalam citra digital.

2.7 OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) merupakan sebuah pustaka perangkat lunak yang bersifat *open source* yang digunakan untuk pengolahan citra digital dan pengembangan aplikasi computer vision. OpenCV pertama kali dikembangkan oleh Intel pada tahun 1999 dan hingga saat ini terus dikembangkan oleh komunitas open source di seluruh dunia. Library ini menyediakan berbagai fungsi dan algoritma yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses pengolahan citra seperti pembacaan gambar, manipulasi citra, segmentasi objek, deteksi tepi, pengenalan pola, hingga analisis video secara real-time (Zulkhaidi, Maria and Yulianto, 2020).

OpenCV dirancang untuk mendukung berbagai bahasa pemrograman seperti C++, Python, dan Java, sehingga banyak digunakan dalam penelitian maupun pengembangan sistem berbasis pengolahan citra. Salah satu keunggulan OpenCV adalah kemampuannya dalam melakukan pemrosesan citra secara efisien dan cepat karena telah dioptimalkan untuk berbagai platform komputasi. Selain itu, OpenCV juga menyediakan banyak fungsi siap pakai yang memudahkan pengembang dalam membangun sistem computer vision tanpa harus membuat algoritma dari awal (Zebua and Rosyani, 2024).

Dalam pengolahan citra digital, OpenCV menyediakan berbagai fungsi penting seperti pembacaan citra, konversi warna, filtering, thresholding, segmentasi citra, serta deteksi kontur. Fungsi-fungsi tersebut memungkinkan sistem untuk mengekstraksi informasi penting dari sebuah citra sehingga dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Dengan memanfaatkan berbagai metode yang tersedia pada OpenCV, proses pengolahan citra dapat dilakukan secara lebih

efektif dan terstruktur (Supiyandi Supiyandi *et al.*, 2024). OpenCV digunakan untuk membaca citra input, melakukan proses pre-processing seperti konversi citra dan thresholding, serta melakukan segmentasi objek untuk memisahkan area background dengan polusi.

2.8 *Phyton*

Python merupakan salah satu bahasa pemrograman tingkat tinggi (high-level programming language) yang banyak digunakan dalam pengembangan perangkat lunak, analisis data, kecerdasan buatan, serta pengolahan citra digital. Bahasa pemrograman ini pertama kali dikembangkan oleh Guido van Rossum pada tahun 1991 dan dirancang dengan tujuan agar mudah dipelajari serta memiliki sintaks yang sederhana dan mudah dibaca. Python bersifat open source, sehingga dapat digunakan secara bebas oleh siapa saja dan terus dikembangkan oleh komunitas pengembang di seluruh dunia (Buwono *et al.*, 2025).

Python memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan bahasa pemrograman lainnya, di antaranya adalah sintaks yang sederhana, dukungan pustaka yang sangat banyak, serta kompatibilitas dengan berbagai sistem operasi seperti Windows, Linux, dan macOS. Selain itu, Python juga mendukung berbagai paradigma pemrograman seperti pemrograman berorientasi objek, pemrograman prosedural, dan pemrograman fungsional. Hal ini menjadikan Python sebagai salah satu bahasa pemrograman yang sangat fleksibel untuk berbagai kebutuhan pengembangan sistem. Dalam bidang pengolahan citra digital dan computer vision, Python banyak digunakan karena memiliki berbagai pustaka yang mendukung proses analisis citra, seperti OpenCV, NumPy, dan Matplotlib.

Pustaka-pustaka tersebut menyediakan berbagai fungsi yang dapat digunakan untuk membaca citra, memproses data piksel, melakukan segmentasi objek, serta melakukan visualisasi hasil pengolahan citra (Adawiyah Ritonga and Yahfizham Yahfizham, 2023).

Python juga berperan penting dalam proses akuisisi data langsung dari perangkat sensor kualitas udara melalui berbagai protokol komunikasi. Pustaka pyserial memungkinkan komunikasi serial antara komputer atau Raspberry Pi dengan modul sensor seperti PMS5003 dan SDS011 melalui antarmuka UART, sehingga data pembacaan sensor dapat diterima, diparse, dan disimpan secara otomatis dalam format terstruktur. Untuk sensor yang terhubung melalui protokol I²C atau SPI, pustaka smbus2 dan spidev pada platform Raspberry Pi memfasilitasi komunikasi tingkat rendah dengan modul sensor seperti BME688 dan SGP30. Dalam skenario pemantauan berbasis IoT, pustaka paho-mqtt digunakan untuk mengirimkan data sensor ke broker MQTT pada platform cloud secara real-time, sedangkan requests dan aiohttp dimanfaatkan untuk integrasi dengan API layanan kualitas udara publik seperti OpenAQ dan IQAir. Keseluruhan pipeline akuisisi data sensor ini diintegrasikan dengan pipeline pengolahan citra dalam satu sistem terpadu berbasis Python, sehingga proses estimasi polusi berbasis citra dan validasinya terhadap data sensor aktual dapat berjalan secara otomatis, efisien, dan dapat direproduksi secara ilmiah.

2.9 Visual Studio Code

Visual Studio Code (VS Code) merupakan editor kode sumber (source code editor) yang dikembangkan oleh Microsoft dan dirilis pertama kali pada

tahun 2015. VS Code bersifat open-source, ringan, dan lintas platform sehingga dapat dijalankan pada sistem operasi Windows, macOS, maupun Linux tanpa perbedaan fungsionalitas yang berarti. Meskipun secara teknis VS Code adalah editor teks yang diperluas, kemampuannya yang dapat dikustomisasi melalui ribuan ekstensi menjadikannya setara dengan Integrated Development Environment (IDE) penuh dalam praktik penggunaannya. Dalam konteks penelitian estimasi tingkat polusi udara berbasis segmentasi citra dan validasi sensor, VS Code digunakan sebagai lingkungan pengembangan utama untuk menulis, menjalankan, men-debug, dan mengelola seluruh kode Python yang mencakup pipeline pengolahan citra, implementasi algoritma segmentasi, pembangunan model machine learning, serta sistem akuisisi dan analisis data sensor kualitas udara (Murani *et al.*, 2025).

VS Code menyediakan serangkaian fitur inti yang secara signifikan meningkatkan produktivitas pengembangan kode Python dalam penelitian ilmiah. Fitur *IntelliSense* memberikan kemampuan penyelesaian kode (*code completion*) secara cerdas berbasis analisis semantik, sehingga nama fungsi, metode, atribut kelas, maupun parameter dari pustaka seperti OpenCV, NumPy, dan scikit-learn dapat disarankan secara otomatis saat pengetikan. Fitur *syntax highlighting* membantu peneliti membedakan elemen-elemen kode secara visual berdasarkan warna, sementara *code folding* memudahkan navigasi pada file kode yang panjang dengan menyembunyikan sementara blok kode yang tidak sedang diperhatikan. Kemampuan *multi-cursor editing* dan *find-and-replace* berbasis ekspresi reguler memungkinkan modifikasi kode secara massal yang sangat berguna ketika

merefaktor nama variabel atau fungsi yang digunakan berulang kali di seluruh proyek. Fitur *integrated terminal* yang tertanam langsung di dalam VS Code memungkinkan peneliti menjalankan skrip Python, menginstal paket melalui pip, serta berinteraksi dengan sistem operasi tanpa perlu berpindah ke aplikasi terminal terpisah, sehingga alur kerja pengembangan menjadi lebih efisien dan terpusat (Abidah, Hadi Wijoyo and Rahman, 2025).

2.10 Pengujian

Evaluasi model merupakan tahapan krusial dalam setiap penelitian berbasis pembelajaran mesin dan pengolahan citra yang bertujuan untuk mengukur sejauh mana model yang dikembangkan mampu melakukan prediksi atau klasifikasi secara akurat terhadap data yang belum pernah dilihat sebelumnya. Dalam penelitian estimasi tingkat polusi udara berbasis segmentasi citra dan validasi sensor, evaluasi dilakukan pada dua level utama, yaitu evaluasi kinerja model segmentasi citra dalam mengidentifikasi dan mempartisi region-region relevan seperti langit, kabut, dan area berpolusi, serta evaluasi kinerja model klasifikasi atau regresi dalam mengestimasi tingkat polusi udara berdasarkan fitur visual yang diekstraksi dari hasil segmentasi. Pendekatan evaluasi yang sistematis dan komprehensif menggunakan berbagai metrik statistik diperlukan untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan tidak hanya bekerja baik pada data latih, tetapi juga memiliki kemampuan generalisasi yang memadai pada kondisi lingkungan nyata yang beragam (Humaidi and Maulani, 2023).

Confusion matrix atau matriks kebingungan merupakan alat evaluasi fundamental dalam pembelajaran mesin yang digunakan untuk menggambarkan

kinerja model klasifikasi secara komprehensif dengan membandingkan label prediksi model terhadap label aktual (*ground truth*) pada setiap sampel data uji. Confusion matrix disusun dalam bentuk tabel dua dimensi berukuran $N \times N$, di mana N adalah jumlah kelas yang diklasifikasikan, dengan baris merepresentasikan kelas aktual dan kolom merepresentasikan kelas prediksi model. Dalam penelitian estimasi polusi udara, confusion matrix dapat diterapkan pada klasifikasi tingkat kualitas udara ke dalam kategori-kategori berdasarkan AQI seperti Baik, Sedang, Tidak Sehat bagi Kelompok Sensitif, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, dan Berbahaya, di mana setiap sel pada matriks menunjukkan jumlah sampel yang diklasifikasikan ke dalam kombinasi kelas aktual dan kelas prediksi tertentu. Diagonal utama matriks mencerminkan jumlah prediksi yang benar untuk setiap kelas, sedangkan elemen di luar diagonal utama merepresentasikan kesalahan klasifikasi yang menunjukkan kelas aktual mana yang sering salah diprediksi sebagai kelas lain, sehingga memberikan gambaran mendalam tentang pola kesalahan model yang tidak dapat diperoleh hanya dari nilai akurasi tunggal.

Pada kasus klasifikasi biner yang paling sederhana, confusion matrix terdiri dari empat komponen dasar yang menjadi fondasi perhitungan seluruh metrik evaluasi turunannya. True Positive (TP) merupakan jumlah sampel yang secara aktual termasuk kelas positif dan diprediksi dengan benar sebagai kelas positif oleh model, dalam konteks penelitian ini misalnya citra yang aktualnya menunjukkan kondisi udara tercemar dan berhasil diklasifikasikan sebagai tercemar. True Negative (TN) adalah jumlah sampel yang aktualnya termasuk

kelas negatif dan diprediksi dengan benar sebagai kelas negatif, misalnya citra dengan kondisi udara bersih yang berhasil diklasifikasikan sebagai bersih. False Positive (FP) atau Type I Error merupakan jumlah sampel yang aktualnya kelas negatif namun salah diprediksi sebagai kelas positif, dalam hal ini citra kondisi udara bersih yang keliru diklasifikasikan sebagai tercemar. False Negative (FN) atau Type II Error adalah jumlah sampel yang aktualnya kelas positif namun salah diprediksi sebagai kelas negatif, yaitu citra yang menunjukkan kondisi udara tercemar namun gagal terdeteksi oleh model dan diklasifikasikan sebagai bersih. Dalam aplikasi pemantauan kualitas udara, False Negative memiliki konsekuensi yang lebih serius dibandingkan False Positive karena kegagalan mendeteksi kondisi udara berbahaya dapat berdampak langsung pada kesehatan masyarakat yang tidak mendapatkan peringatan dini yang seharusnya.

Dari empat komponen dasar confusion matrix, sejumlah metrik evaluasi turunan dapat dihitung untuk memberikan gambaran kinerja model yang lebih komprehensif dari berbagai sudut pandang. Akurasi (Accuracy) merupakan metrik paling mendasar yang mengukur proporsi prediksi benar terhadap keseluruhan jumlah sampel, dihitung sebagai $(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$. Meskipun akurasi mudah dipahami, metrik ini dapat memberikan gambaran yang menyesatkan pada dataset yang tidak seimbang (imbalanced dataset), misalnya ketika frekuensi kemunculan kondisi udara sangat tercemar jauh lebih sedikit dibandingkan kondisi udara normal. Presisi (Precision) mengukur proporsi prediksi positif yang benar-benar positif, dihitung sebagai $TP / (TP + FP)$, dan merepresentasikan seberapa dapat dipercaya prediksi polusi tinggi yang dihasilkan

model. Recall atau Sensitivity mengukur proporsi sampel positif aktual yang berhasil dideteksi oleh model, dihitung sebagai $TP / (TP + FN)$, dan mencerminkan kemampuan model dalam mendeteksi seluruh kondisi udara berbahaya yang sesungguhnya terjadi. F1-Score merupakan rata-rata harmonik antara presisi dan recall yang dihitung sebagai $2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall)$, memberikan ukuran keseimbangan antara kemampuan model dalam menghindari false alarm dan kemampuannya mendeteksi semua kasus polusi yang relevan. Specificity mengukur proporsi sampel negatif aktual yang berhasil diklasifikasikan dengan benar sebagai negatif, dihitung sebagai $TN / (TN + FP)$, yang dalam penelitian ini merepresentasikan kemampuan model mengidentifikasi kondisi udara bersih secara tepat (Adib Ulinuha El Majid and Reflan Nuari, 2025).