



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 11431-11439

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Komparatif Kualitas Udara (PM2.5) di Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan Berdasarkan Data Real-Time Platform Iqair

Dhafa Aulia, Irgi Alfareza Saragih, Muhammad Fharhan, Ilham Syahputra Lubis, Ramadhan Ido Mulia Harahap, Adelyna Octavia

Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

dhafaaulia063@gmail.com, adelyna1100000198@uinsu.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kualitas udara di Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan menggunakan data real-time yang diperoleh dari platform IQAir. Pertumbuhan aktivitas industri yang semakin meningkat di kedua kawasan tersebut berpotensi menyebabkan peningkatan emisi polutan udara, khususnya partikel halus PM2.5, yang dapat memberikan dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang dapat menggambarkan kondisi kualitas udara secara aktual sebagai dasar evaluasi pengelolaan lingkungan di kawasan industri. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kuantitatif dan komparatif. Data penelitian diperoleh melalui observasi digital pada platform IQAir selama tujuh hari berturut-turut dengan dua waktu pengamatan setiap hari, yaitu pada pagi dan malam hari. Data yang terkumpul dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata, maksimum, dan minimum untuk mengetahui karakteristik tingkat pencemaran udara di masing-masing lokasi. Selain itu, dilakukan uji Independent Sample T-Test untuk menguji signifikansi perbedaan kualitas udara antara Kawasan Industri Medan dan Kawasan Industri Belawan. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kondisi kualitas udara di kedua kawasan industri, mengidentifikasi wilayah dengan tingkat pencemaran yang lebih tinggi, serta menunjukkan adanya perbedaan kualitas udara yang signifikan atau tidak signifikan berdasarkan data yang diperoleh. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah, pengelola kawasan industri, dan pemangku kepentingan lainnya dalam merumuskan kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis teknologi Internet of Things (IoT). Penelitian ini juga diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya menjaga kualitas udara demi kesehatan dan keberlanjutan lingkungan.

Kata kunci: Analisis Komparatif, IQAir, Kualitas Udara, PM2.5.

1. Latar Belakang

Pertumbuhan sektor industri di era modern merupakan salah satu motor penggerak utama dalam mengakselerasi roda perekonomian nasional di Indonesia. Prosedur industrialisasi tidak hanya berkontribusi masif terhadap peningkatan Produk Domestik Bruto (PDB), melainkan juga berperan vital dalam membuka lapangan pekerjaan berskala luas, menstimulus investasi asing, serta mendorong kemajuan infrastruktur daerah. Kota Medan, sebagai ibu kota Provinsi Sumatera Utara sekaligus episentrum pertumbuhan ekonomi terbesar di bagian barat Indonesia, mengandalkan kawasan industri strategis sebagai pilar utama pendapatan daerah. Dua kawasan ekonomi terpadu yang memiliki rekam jejak aktivitas antropogenik paling dinamis di wilayah metropolitan ini adalah Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan. Kendati memberikan dampak multiplikasi yang signifikan terhadap kesejahteraan ekonomi, ekspansi aktivitas industrialisasi yang tidak diimbangi dengan adopsi teknologi mitigasi emisi yang ketat berpotensi menimbulkan eksternalitas negatif, terutama berupa degradasi kualitas lingkungan hidup dan penurunan derajat kesehatan masyarakat akibat pencemaran udara ambien.

Di wilayah aglomerasi industri seperti KIM dan Belawan, pelepasan senyawa polutan ke atmosfer berlangsung secara kontinu selama dua puluh empat jam penuh. Aktivitas berskala makro seperti operasional mesin-mesin manufaktur, aktivitas logistik pergudangan, mobilitas kendaraan angkutan barang bermesin diesel (truk kontainer), hingga pemanfaatan pembangkit energi bertenaga bahan bakar fosil menjadi penyumbang terbesar emisi gas buang. Polutan-polutan tersebut mengalami dispersi, reaksi kimia sekunder, dan akumulasi di lapisan troposfer,

yang secara bertahap memburukkan indeks kualitas udara lokal. Jika kondisi ini dibiarkan tanpa adanya sistem pemantauan yang ketat, akumulasi zat pencemar tidak hanya merusak estetika lingkungan dan memicu hujan asam, tetapi juga menciptakan bom waktu ekologis yang mengancam kelangsungan hidup komunitas masyarakat yang bermukim di sekitar sabuk industri tersebut.

Di antara berbagai parameter pencemar udara yang menjadi perhatian serius dalam studi toksikologi lingkungan global, Particulate Matter 2.5 (PM2.5) dikategorikan sebagai polutan yang paling berbahaya. PM2.5 merupakan partikel padat atau cair tersuspensi di udara dengan diameter aerodinamis yang sangat mikro, yaitu kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer. Karakteristik fisik ukurannya yang berada di bawah ambang batas filtrasi biologis membuat partikel ini memiliki daya penetrasi yang sangat destruktif. Ketika terhirup oleh manusia, PM2.5 mampu melewati sistem penyaringan bulu hidung dan mukosa saluran pernapasan atas, meluncur langsung menuju alveoli paru-paru, hingga mengalami penetrasi menembus membran kapiler untuk bermigrasi ke dalam sistem peredaran darah mendalam. Paparan kronis dan akumulatif terhadap partikel halus ini telah terbukti secara klinis memicu stres oksidatif seluler, menginduksi infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), memperparah gejala asma bronkial, meningkatkan risiko gangguan kardiovaskular, memicu penyakit jantung koroner, hingga menyebabkan mutasi genetik yang berujung pada kanker paru-paru.

Secara struktural dan tipologi sektoral, Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan memiliki karakteristik operasional yang berbeda secara mendasar, yang diduga kuat memengaruhi beban emisi masing-masing wilayah. KIM didominasi oleh kluster industri manufaktur tulen, seperti pengolahan logam, pabrik kimia, pemrosesan plastik, serta industri makanan dan minuman berskala besar yang menggunakan cerobong asap sebagai saluran pembuangan akhir sisa produksi pembakaran batubara atau solar industri. Sebaliknya, Kawasan Industri Belawan merupakan kawasan yang terintegrasi dengan aktivitas pelabuhan laut internasional, didominasi oleh jasa distribusi logistik, pergudangan, transportasi laut makro, serta pembangkit energi termal. Perbedaan karakteristik sektoral dan intensitas pergerakan moda transportasi angkutan berat di kedua area ini melahirkan hipotesis bahwa tingkat konsentrasi polutan PM2.5 di udara ambien kedua lokasi tidak berada pada level yang sama. Oleh karena itu, diperlukan sebuah studi analisis komparatif yang empiris untuk membedah secara mendalam sejauh mana variasi spasial dan karakteristik industri memengaruhi fluktuasi kualitas udara di kedua wilayah tersebut.

Guna menjembatani kebutuhan data yang akurat dan kontinu, pemantauan kualitas lingkungan di era transformasi digital 4.0 ini telah bergeser ke arah pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT). Penerapan sensor kualitas udara berbasis IoT memungkinkan proses akuisisi data polusi dilakukan secara otomatis, presisi, dan real-time, yang kemudian ditransmisikan melalui komputasi awan ke server pusat untuk diakses secara terbuka oleh publik dan akademisi. Salah satu platform global terkemuka yang mengintegrasikan jaringan sensor IoT ambien ini adalah IQAir. Platform ini mengombinasikan data dari stasiun pemantau resmi pemerintah dengan sensor komunitas yang tervalidasi, sehingga menyajikan parameter Air Quality Index (AQI) yang komprehensif. Melalui pemanfaatan data sekunder yang disediakan oleh IQAir, peneliti dapat melakukan pengamatan lingkungan jarak jauh tanpa terkendala keterbatasan operasional alat fisik di lapangan.

Riset mengenai studi komparatif kualitas udara di kawasan industri memegang peranan yang sangat krusial dalam pembangunan berkelanjutan (sustainable development). Kajian ini tidak hanya berfungsi memberikan gambaran riil mengenai status kesehatan lingkungan aktual, melainkan juga memosisikan diri sebagai landasan saintifik bagi pembuat kebijakan dalam merancang regulasi pengendalian pencemaran udara yang lebih terukur. Di samping itu, publikasi data komparatif ini esensial untuk mengeskalisasi kesadaran kolektif masyarakat serta pelaku industri mengenai bahaya polusi udara terhadap kesehatan kerja. Berdasarkan latar belakang urgensi tersebut, penelitian ini dilaksanakan dengan fokus untuk menganalisis, menguji, dan membandingkan profil kualitas udara di Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan dengan memanfaatkan basis data real-time dari platform teknologi IQAir.

2. Kajian Teoritis

1. Kualitas Udara Ambien

Secara konseptual, kualitas udara didefinisikan sebagai tingkat kesesuaian komposisi udara di atmosfer pada ruang dan waktu tertentu berdasarkan kandungan atau konsentrasi zat-zat pencemar yang terkandung di dalamnya. Udara ambien yang berada pada lapisan troposfer merupakan elemen vital yang menyokong kehidupan seluruh makhluk hidup di bumi, sehingga perubahan sekecil apa pun pada struktur kimianya akan berdampak langsung pada

keseimbangan ekosistem. Dalam kondisi ideal dan alami, atmosfer bumi didominasi oleh gas nitrogen (N_2) sebesar 78%, oksigen (O_2) sebesar 21%, argon sebesar 0,93%, dan karbon dioksida (CO_2) sebesar 0,03%, serta gas-gas runtuhan lainnya dalam jumlah yang sangat kecil. Namun, masifnya aktivitas antropogenik di era modern telah memperkenalkan berbagai senyawa asing ke dalam udara dalam volume yang melebihi kapasitas pembersihan alami (self-purification) atmosfer, yang pada akhirnya memicu degradasi kualitas udara secara masif.

Karakteristik penurunan kualitas udara umumnya terjadi secara terpusat dan menunjukkan pola yang lebih buruk di wilayah aglomerasi industri serta kawasan perkotaan padat. Terdapat tiga faktor determinan utama yang mengemban tanggung jawab terbesar atas penurunan mutu udara ini, yakni aktivitas operasional manufaktur industri, kepadatan sektor transportasi, serta intensitas pembakaran bahan bakar fosil secara stasioner maupun bergerak. Sektor manufaktur menyuplai polutan melalui proses pembakaran material baku dan pembuangan gas sisa produksi lewat cerobong asap pabrik. Sementara itu, sektor transportasi, terutama kendaraan bermotor angkutan barang yang menggunakan mesin diesel, melepaskan emisi gas buang kaya partikulat akibat pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Di kawasan perkotaan yang berdampingan dengan zona industri, interaksi ketiga elemen tersebut menciptakan akumulasi polutan yang kompleks dan memicu terbentuknya polutan sekunder berbahaya melalui reaksi fotokimia di bawah paparan sinar matahari.

Di Indonesia, parameter baku mengenai penilaian status kualitas udara diatur secara ketat melalui instrumen hukum positif, yaitu Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Berdasarkan ketentuan regulasi nasional tersebut, udara dikategorikan telah tercemar apabila konsentrasi atau tingkat polutan fisik dan kimia yang terkandung di dalam udara ambien melampaui batas ambang aman yang disebut dengan Baku Mutu Udara Ambien (BMUA). BMUA ini merupakan batas maksimum komparatif yang ditoleransi oleh pemerintah untuk mencegah timbulnya dampak buruk terhadap kesehatan manusia, hewan, tumbuhan, dan properti. Penentuan melampauinya nilai BMUA ini menjadi basis legalistik bagi instansi terkait untuk menyatakan terjadinya pencemaran lingkungan sekaligus menjadi dasar dalam merumuskan langkah-langkah penegakan hukum dan mitigasi emisi pada suatu kawasan industri..

2. Particulate Matter 2.5 (PM2.5) dan Implikasi Kesehatan

Particulate Matter 2.5 atau yang secara universal disingkat sebagai PM2.5 merupakan salah satu parameter polutan udara yang menjadi fokus perhatian utama dalam studi toksikologi lingkungan global modern. Secara definitif, PM2.5 merujuk pada partikel padat, cair, atau aerosol yang melayang tersuspensi di atmosfer bumi dengan diameter aerodinamis yang sangat kecil, yaitu kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer. Jika dibandingkan secara visual, ukuran partikel halus ini setara dengan sepertiga puluh dari diameter sehelai rambut manusia normal. Karakteristik fisik yang sangat mikroskopis ini memberikan PM2.5 sifat penyerapan (adsorption) yang tinggi terhadap senyawa beracun lain di atmosfer, seperti logam berat (timbal, kadmium, arsenik), senyawa organik volatil (VOCs), serta hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), yang menjadikannya jauh lebih toksik dibandingkan dengan partikel debu berukuran besar seperti PM10.

Sumber pembentukan paparan PM2.5 di udara ambien sebagian besar berasal dari aktivitas antropogenik yang melibatkan proses pembakaran suhu tinggi. Faktor utama pelepasan polutan ini meliputi emisi gas buang kendaraan bermotor (terutama kendaraan berbahan bakar diesel), aktivitas manufaktur berskala besar, serta pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara dan minyak bumi pada pembangkit energi stasioner maupun mesin-mesin pabrik. Berdasarkan mekanisme pembentukannya, PM2.5 dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu polutan primer dan sekunder. PM2.5 primer dilepaskan secara langsung dari sumber emisi, seperti jelaga dari cerobong asap industri. Sementara itu, PM2.5 sekunder terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia kompleks dari gas-gas prekursor seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan amonia (NH_3) yang mengalami kondensasi menjadi partikel halus di bawah pengaruh radiasi sinar matahari.

Dampak paparan PM2.5 terhadap kesehatan manusia dikategorikan sebagai ancaman kesehatan masyarakat yang sangat serius. Karena ukurannya yang sangat halus, partikel ini memiliki kemampuan penetrasi yang luar biasa di dalam anatomi tubuh manusia. Ketika terhirup oleh sistem pernapasan, PM2.5 tidak mampu disaring oleh silia atau bulu-bulu hidung pada saluran pernapasan atas, melainkan langsung meluncur menembus trakea, bronkus, hingga mencapai bagian terdalam paru-paru, yaitu jaringan alveoli. Pada titik ini, partikel halus tersebut mengalami difusi menembus membran kapiler darah dan menginvasi sistem peredaran darah mendalam secara sistemik.

Berdasarkan laporan resmi dari Organisasi Kesehatan Dunia atau World Health Organization (WHO, 2021), tidak ada ambang batas aman di mana paparan polutan ini sepenuhnya bebas dari risiko kesehatan. Masuknya partikel PM_{2.5} ke dalam aliran darah dan jaringan paru secara kronis akan menginduksi stres oksidatif seluler, memicu reaksi peradangan sistemik, serta merusak elastisitas pembuluh darah. Paparan kumulatif jangka panjang terhadap PM_{2.5} secara klinis terbukti meningkatkan angka morbiditas dan mortalitas akibat infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), asma kronis, bronkitis, penurunan fungsi paru-paru, serangan jantung, stroke, gangguan kardiovaskular, hingga mutasi DNA seluler yang memicu kanker paru-paru. Oleh karena itu, WHO menetapkan batas panduan kualitas udara tahunan yang sangat ketat untuk PM_{2.5} demi meminimalisasi risiko kematian dini di kawasan padat penduduk dan wilayah industrial.

3. Analisis Komparatif dalam Studi Kualitas Lingkungan

Secara metodologis, analisis komparatif merupakan salah satu pendekatan ilmiah yang diarahkan untuk mengidentifikasi, menguji, dan menjelaskan karakteristik persamaan serta perbedaan yang terjadi antara dua atau lebih objek penelitian berdasarkan variabel tertentu. Pendekatan ini tidak sekadar berfokus pada pencatatan deskriptif mengenai kondisi dari masing-masing objek, melainkan bertujuan untuk membedah faktor-faktor kausalitas yang melatarbelakangi munculnya variasi atau ketimpangan nilai antar variabel tersebut. Dalam kajian teknik lingkungan dan sosiologi tata ruang, metode komparatif memegang peranan yang sangat krusial. Metode ini sering digunakan untuk mengevaluasi efektivitas regulasi lingkungan, memetakan dampak zonasi tata guna lahan, serta mengisolasi pengaruh elemen meteorologi lokal di dua atau lebih wilayah spasial yang memiliki karakteristik sosio-ekonomi atau aktivitas antropogenik yang kontras.

Dalam konteks penelitian ini, analisis komparatif diaplikasikan sebagai pisau analisis utama untuk membandingkan parameter kualitas udara ambien secara makro antara Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan berdasarkan fluktuasi konsentrasi Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}). Penggunaan metode komparatif ini didasarkan pada asumsi teoritis bahwa perbedaan tipologi sektoral—di mana wilayah KIM didominasi oleh kluster industri manufaktur berat statis sedangkan wilayah Belawan didominasi oleh kluster logistik maritim dinamis—akan menghasilkan dampak beban emisi yang berbeda terhadap atmosfer sekitarnya. Melalui komparasi yang sistematis, penelitian ini dapat menguji secara empiris apakah perbedaan karakteristik operasional wilayah tersebut benar-benar melahirkan perbedaan kualitas udara yang nyata, ataukah variasi yang terjadi hanya berupa fluktuasi acak yang tidak signifikan.

Lebih jauh lagi, implementasi analisis komparatif ini diperkuat dengan penerapan statistik inferensial, yaitu pengujian hipotesis dua arah menggunakan uji beda rata-rata sampel independen (Independent Sample T-Test). Pendekatan statistik ini berfungsi untuk memberikan validasi matematis terhadap data sekunder yang dikumpulkan dari platform IQAir. Dengan membandingkan nilai rata-rata (mean difference), sebaran nilai maksimum, serta sebaran nilai minimum dari kedua kawasan industri, analisis komparatif ini mampu mengidentifikasi wilayah mana yang memiliki tingkat pencemaran dan risiko paparan polutan yang lebih tinggi. Output dari analisis komparatif ini sangat penting, karena dapat memberikan gambaran spasial yang objektif bagi para pembuat kebijakan untuk menentukan prioritas wilayah penanganan polusi serta merumuskan strategi mitigasi emisi yang lebih tepat sasaran sesuai dengan karakteristik unik dari masing-masing kawasan industri.

4. Teknologi IoT dalam Monitoring Kualitas Udara

Transformasi digital di era Industri 4.0 telah membawa perubahan paradigma yang signifikan dalam sistem pemantauan ekosistem lingkungan hidup, salah satunya melalui implementasi teknologi Internet of Things (IoT). Secara konseptual, IoT merupakan sebuah arsitektur jaringan terintegrasi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik, seperti sensor elektrokimia atau sensor optik pemantau polusi, dengan sistem komputasi awan (cloud computing) melalui konektivitas internet secara nirkabel. Keunggulan utama dari arsitektur IoT ini terletak pada kemampuannya untuk melakukan akuisisi data, transmisi, dan pemrosesan parameter polusi udara secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manual manusia. Pemanfaatan teknologi IoT ini secara drastis mampu memangkas rantai birokrasi pengumpulan data konvensional yang cenderung memakan waktu lama, membutuhkan biaya operasional tinggi, serta rentan terhadap human error pada saat proses enkapsulasi data di lapangan.

Dalam konteks manajemen kualitas udara, pemanfaatan jaringan sensor berbasis IoT memberikan keuntungan taktis berupa penyediaan data polusi secara real-time dan berkelanjutan. Sensor yang dipasang pada titik-titik

spasial strategis di kawasan industri bekerja dengan mengukur tingkat penyebaran cahaya (light scattering) atau menggunakan reaksi kimia elektrokimia untuk menghitung konsentrasi mikrogram polutan per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) secara instan. Data yang terbaca kemudian langsung dikirimkan ke peladen pusat setiap beberapa detik atau menit sekali. Ketersediaan data yang cepat dan aktual ini sangat krusial karena dapat meningkatkan efektivitas, ketepatan, dan kecepatan dalam mendeteksi lonjakan emisi berbahaya di atmosfer. Ketika konsentrasi polutan terdeteksi melampaui ambang batas baku mutu, sistem peringatan dini (early warning system) yang terintegrasi dengan IoT dapat langsung memberikan notifikasi kepada pihak pengelola kawasan ataupun instansi penegak hukum lingkungan untuk segera melakukan tindakan mitigasi operasional.

Efektivitas pemanfaatan teknologi nirkabel ini dalam ruang lingkup industrialisasi didukung secara kuat oleh studi literatur terdahulu. Menurut Prasetyo dkk. (2023), implementasi teknologi Internet of Things terbukti dapat diaplikasikan dengan sangat baik dan memiliki tingkat akurasi tinggi untuk memantau fluktuasi kualitas udara di kawasan industri. Karakteristik kawasan industri yang dinamis, padat aktivitas logistik, dan memiliki sumber emisi yang tersebar, sangat membutuhkan fleksibilitas dari jaringan sensor IoT yang dapat dipasang secara menyebar (distributed network). Melalui integrasi sensor IoT, pengawasan terhadap emisi cerobong asap pabrik maupun emisi bergerak dari kendaraan berat dapat dilakukan secara transparan dan komprehensif, sehingga menjadi fondasi utama dalam perumusan kebijakan tata ruang dan pengendalian polusi udara yang berkelanjutan di wilayah perkotaan.

5. Platform IQAir

Dalam ekosistem pemantauan lingkungan berbasis digital, platform IQAir memosisikan diri sebagai salah satu infrastruktur penyedia data kualitas udara global yang paling terkemuka dan banyak diadaptasi oleh para peneliti di seluruh dunia. Secara operasional, IQAir merupakan platform teknologi informasi berskala internasional yang mengintegrasikan, mengolah, dan menyajikan metrik konsentrasi zat polutan atmosfer serta data indeks kualitas udara atau Air Quality Index (AQI) secara real-time. Keunggulan utama dari platform ini terletak pada kemampuan komputasi awannya yang mampu menyatukan transmisi data dari ribuan stasiun pemantauan resmi milik lembaga pemerintah (seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika atau Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan) dengan jaringan sensor ambien mandiri berbasis Internet of Things (IoT) yang dioperasikan oleh komunitas kosmopolitan maupun institusi pendidikan yang telah lolos uji kalibrasi.

Sistem pemrosesan data pada platform IQAir bekerja dengan menerapkan algoritma validasi ketat guna meminimalisasi anomali data sebelum dipublikasikan ke hadapan publik. Platform ini menyajikan parameter polusi dalam dua bentuk visualisasi utama. Pertama, dalam bentuk satuan massa per volume ambien, seperti mikrogram per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) untuk partikel halus PM_{2.5}, PM₁₀, sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), dan ozon permukaan (O_3). Kedua, data tersebut dikonversikan ke dalam skala numerik terstandarisasi yang diadopsi dari parameter United States Air Quality Index (US AQI). Indeks US AQI berkisar antara nilai 0 hingga 500, di mana skor yang semakin tinggi mencerminkan tingkat polusi udara yang semakin pekat dan tingkat risiko bahaya kesehatan yang semakin mengkhawatirkan bagi populasi manusia.

Melalui visualisasi data yang interaktif dan berbasis geolokasi, IQAir mempermudah para ilmuwan, pembuat kebijakan, serta masyarakat awam untuk melacak pergerakan polutan secara spasial dan temporal dari waktu ke waktu. Bagi dunia akademis, eksistensi platform global ini memberikan kontribusi besar berupa penyediaan data sekunder empiris yang tepercaya dan dapat diakses secara instan. Pemanfaatan data dari IQAir memangkas ketergantungan riset pada instrumen laboratorium konvensional yang mahal, sehingga mempercepat proses analisis risiko lingkungan, mempermudah studi komparatif antarwilayah industri, serta mengoptimalkan transparansi informasi ekologis yang diperlukan untuk mendukung terwujudnya kebijakan tata kota yang berbasis pembangunan berkelanjutan.

3. Metode Penelitian

Metode kuantitatif deskriptif komparatif digunakan dalam penelitian ini untuk mendeskripsikan kondisi kualitas udara berdasarkan konsentrasi PM_{2.5}. Penelitian juga membandingkan tingkat pencemaran udara antara Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan. Data sekunder yang diperoleh secara real-time dari platform IQAir digunakan untuk melakukan penelitian. Penelitian ini menggunakan semua data kualitas udara yang tersedia di platform IQAir, termasuk konsentrasi PM_{2.5} dan Index Kualitas Udara (AQI) dari dua lokasi penelitian: Kawasan Industri Medan dan Kawasan Industri Belawan. Karena lokasi dipilih berdasarkan

karakteristik aktivitas industri yang berbeda, teknik purposive sampling digunakan untuk pengambilan sampel. Data dikumpulkan sekali selama empat belas hari berturut-turut pada pukul 08.00 WIB dan 20.00 WIB.

Metode pengumpulan data menggunakan observasi digital, dan platform IQAir berfungsi sebagai sumber data sekunder. Nilai PM2.5 dan AQI dari setiap lokasi penelitian termasuk dalam data yang dikumpulkan. Instrument penelitian terdiri dari perangkat laptop atau smartphone yang dapat mengakses platform IQAir dan lembar tabulasi data yang dapat digunakan menggunakan Microsoft Excel untuk menyimpan hasil pengamatan. Selanjutnya, nilai rata-rata (mean), nilai maksimum, dan nilai minimum konsentrasi PM2.5 pada kedua lokasi penelitian dihitung menggunakan statistik deskriptif. Selanjutnya, uji beda dua rata-rata (uji-t) dilakukan untuk menentukan apakah ada perbedaan signifikan dalam kualitas udara di Kawasan Industri Medan dan Kawasan Industri Belawan. Agar lebih mudah dipahami, hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

Untuk penelitian ini, model analisis komparatif digunakan. Ini membandingkan konsentrasi PM2.5 antara dua kawasan industri dengan berbagai karakteristik aktivitas. Kawasan Industri Medan adalah variabel X1, dan Kawasan Industri Belawan adalah variabel X2. Tingkat kualitas udara, berdasarkan nilai PM2.5 dan Index Kualitas Udara (AQI), adalah variabel Y. Untuk mengetahui bagaimana tingkat pencemaran udara di kedua wilayah industri tersebut berbeda, hubungan antar variabel dipelajari.

4. Hasil dan Diskusi

Deskripsi Data Konsentrasi PM2.5

Untuk mengetahui distribusi data konsentrasi Particulate Matter 2.5 (PM2.5) pada kedua lokasi penelitian, pengujian statistik deskriptif dilakukan. Tabel 1 menunjukkan hasil rekapitulasi nilai rata-rata, maksimum, dan minimum.

Tabel 1

Variabel Lokasi	Rata-rata (Mean)	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Kawasan Industri Medan (KIM)	40,96	6,0	85,6
Kawasan Industri Belawan	11,01	8,0	15,8

Sumber: Data Sekunder Diolah dari IQAir, 2026

Tabel 1 menunjukkan perbedaan yang jelas dalam paparan polutan. Kawasan Industri Belawan memiliki udara yang lebih bersih dengan rata-rata 11,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan nilai maksimum 15,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Di sisi lain, Medan memiliki tingkat polusi yang tinggi dengan rata-rata 40,96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan titik maksimum 85,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Distribusi Kategori Kualitas Udara (US AQI)

Selain parameter PM2.5, data juga dikategorikan berdasarkan US Air Quality Index (US AQI) untuk menunjukkan tingkat bahaya bagi kesehatan. Tabel 2 menunjukkan rincian frekuensi kategori kualitas udara di kedua lokasi.

Tabel 2

Kategori US AQI	Status Kualitas Udara	Frekuensi KIM	Frekuensi Belawan
0 – 50	<i>Good (Baik)</i>	1	2
51 – 100	<i>Moderate (Sedang)</i>	7	12
101 – 150	<i>Unhealthy for Sensitive Groups</i>	2	0
151 – 200	<i>Unhealthy (Tidak Sehat)</i>	4	0

Sumber: Data Sekunder Diolah dari IQAir, 2026

Menurut Tabel 2, kualitas udara di Belawan sangat stabil, dengan 12 pengamatan di kategori Sedang dan 2 pengamatan di kategori Baik, tetapi KIM memiliki fluktuasi polusi yang tinggi, dengan 4 pengamatan di zona Tidak Sehat (merah) dan 2 pengamatan di zona Tidak Sehat bagi Kelompok Sensitif (oranye).

Hasil Uji Hipotesis (Uji Komparatif)

Uji beda dua rata-rata (Independent Sample T-Test) digunakan untuk menentukan secara empiris seberapa signifikan perbedaan kualitas udara antara kedua wilayah industri tersebut.

Tabel 3

Variabel	Nilai T-Hitung	Mean Difference	P-Values (Sig.)	Keterangan
KIM - Belawan	4.872	29.95	0.000	Signifikan

Sumber: Data Primer Diolah, 2026

Kawasan Industri Medan dan Kawasan Industri Belawan memiliki perbedaan kualitas udara yang sangat signifikan secara statistik, seperti yang ditunjukkan oleh nilai tingkat signifikansi (P-Values) 0,000. Karena nilai signifikansi 0,000 lebih rendah dari 0,05 ($0,000 < 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa ada perbedaan kualitas udara yang signifikan secara statistik.

Pembahasan

Temuan utama penelitian ini mengkonfirmasi fakta bahwa ada ketimpangan kualitas udara yang signifikan antara Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan (KIM). Jumlah PM_{2.5} yang tinggi di wilayah KIM sebagian besar dikaitkan dengan prosedur produksi sehari-hari, emisi gas buang dari cerobong pabrik, dan banyaknya kendaraan berat yang beroperasi di daerah tersebut. Disebabkan pembakaran bahan bakar fosil yang terus-menerus, ada peningkatan konsentrasi partikel halus. Ini ditunjukkan oleh banyaknya indikator AQI Amerika Serikat yang menunjukkan zona yang tidak sehat. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas udara di KIM telah melampaui standar yang aman, mengancam kesehatan pernapasan karyawan dan masyarakat di sekitarnya.

Berlawanan dengan KIM, Kawasan Industri Belawan memiliki kondisi kualitas udara yang lebih aman dan stabil. Sebagian besar indikator AQI AS berada pada batas Sedang hingga Baik. Dua komponen utama, karakteristik industri dan kondisi geografis, secara teoritis sangat memengaruhi perbedaan ini. Jika dibandingkan dengan manufaktur berat, pelabuhan, logistik, dan perdagangan merupakan sektor yang memiliki tingkat emisi partikulat pembakaran yang lebih rendah untuk belawan. Lokasi Belawan di pesisir juga memberikan banyak keuntungan bagi lingkungan. Karena angin laut adalah sirkulasi dan dispersi alami, partikel PM_{2.5} tidak mengendap di satu tempat.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kualitas udara di Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan berdasarkan data konsentrasi PM_{2.5} dan indeks kualitas udara (US AQI) yang diperoleh melalui platform IQAir. Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan yang cukup besar antara kedua kawasan industri tersebut. Perbedaan ini terlihat baik dari nilai konsentrasi PM_{2.5}, distribusi kategori kualitas udara, maupun hasil pengujian statistik yang dilakukan menggunakan Independent Sample T-Test.

Berdasarkan hasil statistik deskriptif, rata-rata konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan Industri Medan mencapai 40,96 µg/m³, sedangkan di Kawasan Industri Belawan hanya sebesar 11,01 µg/m³. Selisih rata-rata sebesar 29,95 µg/m³ menunjukkan bahwa tingkat pencemaran udara di KIM jauh lebih tinggi dibandingkan dengan Belawan. Selain itu, nilai maksimum PM_{2.5} di KIM mencapai 85,6 µg/m³, sedangkan di Belawan hanya 15,8 µg/m³. Temuan ini mengindikasikan bahwa fluktuasi kualitas udara di KIM lebih besar dan lebih rentan mengalami peningkatan konsentrasi partikulat pada waktu-waktu tertentu.

Tingginya konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan Industri Medan dapat dikaitkan dengan karakteristik aktivitas industri yang berlangsung di kawasan tersebut. KIM merupakan salah satu pusat industri terbesar di Sumatera Utara yang menampung berbagai sektor manufaktur, seperti industri makanan dan minuman, kimia, logam, plastik, serta industri pengolahan lainnya. Aktivitas produksi yang berlangsung secara terus-menerus menghasilkan emisi gas buang dan partikulat yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar fosil, penggunaan mesin industri, serta

operasional kendaraan berat yang mendukung kegiatan distribusi barang. Emisi dari berbagai sumber tersebut berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi PM2.5 di udara ambien.

Partikel PM2.5 merupakan salah satu polutan udara yang sangat berbahaya karena memiliki ukuran yang sangat kecil, yaitu kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer. Ukurannya yang sangat halus memungkinkan partikel ini masuk hingga ke bagian terdalam paru-paru bahkan dapat memasuki aliran darah manusia. Paparan PM2.5 dalam jangka panjang diketahui dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, asma, bronkitis kronis, hingga kematian dini. Oleh karena itu, tingginya konsentrasi PM2.5 yang ditemukan di KIM menjadi perhatian penting bagi pengelola kawasan industri maupun pemerintah daerah.

Sementara itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas udara di Kawasan Industri Belawan relatif lebih baik dan stabil. Nilai rata-rata PM2.5 sebesar 11,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ masih berada pada kategori yang lebih aman dibandingkan dengan KIM. Selain itu, rentang nilai minimum dan maksimum yang tidak terlalu jauh menunjukkan bahwa kualitas udara di Belawan cenderung konsisten selama periode pengamatan. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui karakteristik aktivitas ekonomi yang dominan di wilayah Belawan. Sebagai kawasan pelabuhan dan pusat logistik, aktivitas industri di Belawan lebih banyak berfokus pada pergudangan, distribusi barang, transportasi laut, serta jasa kepelabuhanan. Aktivitas tersebut umumnya menghasilkan emisi partikulat yang lebih rendah dibandingkan dengan industri manufaktur berat yang banyak ditemukan di KIM.

Selain faktor jenis industri, kondisi geografis juga berperan penting dalam memengaruhi kualitas udara di Belawan. Kawasan Belawan terletak di wilayah pesisir yang secara alami memiliki sirkulasi udara yang lebih baik dibandingkan wilayah daratan yang padat aktivitas industri. Angin laut yang bertiup secara teratur membantu proses dispersi polutan sehingga konsentrasi partikulat di udara tidak terkonsentrasi pada satu lokasi dalam waktu yang lama. Fenomena ini menyebabkan kualitas udara di Belawan relatif lebih stabil dan terjaga dibandingkan dengan kawasan industri yang berada di pusat aktivitas perkotaan.

Temuan penelitian ini juga diperkuat oleh hasil analisis kategori kualitas udara berdasarkan US Air Quality Index (US AQI). Distribusi kategori AQI menunjukkan bahwa sebagian besar pengamatan di Belawan berada pada kategori Moderate (Sedang) dan Good (Baik). Tidak ditemukan pengamatan yang masuk ke kategori Unhealthy for Sensitive Groups maupun Unhealthy. Sebaliknya, di KIM terdapat empat pengamatan yang masuk kategori Unhealthy dan dua pengamatan pada kategori Unhealthy for Sensitive Groups. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masyarakat yang berada di sekitar KIM memiliki risiko paparan polusi udara yang lebih tinggi dibandingkan masyarakat di Belawan.

Keberadaan kategori Unhealthy dan Unhealthy for Sensitive Groups di KIM menunjukkan bahwa pada waktu-waktu tertentu kualitas udara dapat membahayakan kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, ibu hamil, serta individu yang memiliki riwayat penyakit pernapasan dan jantung. Pada kondisi tersebut, aktivitas luar ruangan sebaiknya dibatasi karena risiko gangguan kesehatan meningkat seiring dengan tingginya konsentrasi polutan di udara. Temuan ini menjadi indikator penting bahwa pengendalian emisi di kawasan industri perlu mendapatkan perhatian yang lebih serius.

Secara statistik, hasil Independent Sample T-Test menunjukkan nilai t-hitung sebesar 4,872 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 0,000. Nilai ini lebih kecil dari tingkat signifikansi yang digunakan dalam penelitian, yaitu 0,05. Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) yang menyatakan tidak terdapat perbedaan kualitas udara antara kedua lokasi ditolak, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) diterima. Hasil ini membuktikan bahwa terdapat perbedaan kualitas udara yang signifikan antara Kawasan Industri Medan dan Kawasan Industri Belawan.

Perbedaan yang signifikan tersebut menunjukkan bahwa faktor-faktor lokal seperti jenis industri, intensitas aktivitas produksi, kepadatan transportasi, serta kondisi geografis memiliki pengaruh yang nyata terhadap kualitas udara suatu wilayah. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa kawasan dengan aktivitas industri berat cenderung memiliki tingkat pencemaran udara yang lebih tinggi dibandingkan kawasan yang didominasi oleh aktivitas jasa, logistik, atau perdagangan.

Selain memberikan gambaran kondisi kualitas udara, penelitian ini juga menunjukkan manfaat penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam pemantauan lingkungan. Data yang diperoleh melalui platform IQAir memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi kualitas udara secara real-time, cepat, dan mudah. Teknologi ini memberikan keuntungan dalam proses pengambilan keputusan karena kondisi lingkungan dapat

dipantau secara berkelanjutan tanpa harus melakukan pengukuran manual yang membutuhkan biaya dan waktu yang lebih besar. Dengan adanya sistem pemantauan berbasis IoT, pemerintah daerah dan pengelola kawasan industri dapat melakukan tindakan mitigasi lebih cepat ketika terjadi peningkatan konsentrasi polutan.

Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa Kawasan Industri Medan memiliki tingkat pencemaran udara yang lebih tinggi dibandingkan Kawasan Industri Belawan. Tingginya konsentrasi PM2.5 serta frekuensi kategori kualitas udara yang tidak sehat menunjukkan perlunya upaya pengendalian emisi yang lebih ketat di kawasan tersebut. Pemerintah daerah bersama pengelola kawasan industri perlu meningkatkan pengawasan terhadap sumber emisi, menerapkan teknologi pengendalian polusi udara yang lebih efektif, serta memperluas sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT. Langkah-langkah tersebut diharapkan dapat menurunkan konsentrasi PM2.5, meningkatkan kualitas lingkungan, serta melindungi kesehatan masyarakat yang tinggal dan beraktivitas di sekitar kawasan industri.

Hasil ini sejalan dengan gagasan dasar dalam pengelolaan lingkungan bahwa tingkat aktivitas industri berkorelasi langsung dengan penurunan kualitas udara. Selain itu, data observasi yang dikumpulkan IQAir menunjukkan bahwa teknologi Internet of Things (IoT) sangat praktis dan akurat untuk memantau kualitas lingkungan secara real-time. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa evaluasi regulasi emisi sangat penting, terutama di Kawasan Industri Medan. Ini dilakukan agar pengelola kawasan dan pemerintah daerah dapat menerapkan teknologi penyaring emisi udara yang lebih ketat untuk menekan jumlah partikulat halus di masa mendatang.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian hipotesis mengenai komparasi kualitas udara di Kawasan Industri Medan (KIM) dan Kawasan Industri Belawan menggunakan pemantauan data real-time IQAir, dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan kualitas udara yang sangat signifikan antara kedua kawasan tersebut. Tingkat pencemaran udara berdasarkan parameter konsentrasi PM2.5 di Kawasan Industri Medan terbukti jauh lebih tinggi dan fluktuatif hingga menyentuh kategori tidak sehat dibandingkan dengan Kawasan Industri Belawan yang kualitas udaranya relatif stabil pada kategori sedang hingga baik. Perbedaan tingkat polusi ini sangat bergantung pada karakteristik utama dari masing-masing kawasan, di mana tingginya emisi partikulat di wilayah KIM merupakan akibat langsung dari intensitas produksi manufaktur dan volume transportasi alat berat, sementara Belawan diuntungkan oleh letak geografis pesisir dan dominasi sektor logistik yang memungkinkan dispersi polutan secara alami oleh angin laut.

Referensi

1. IQAir. (2026). Air Quality Monitoring Platform. Diakses dari IQAir Official Website
2. World Health Organization. (2021). WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Diakses dari WHO Official Website
3. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2022). Pengendalian Pencemaran Udara di Kawasan Industri. Diakses dari KLHK Official Website
4. Badan Pusat Statistik. (2025). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia. Diakses dari BPS Official Website
5. Mukono, H. J. (2008). Pencemaran Udara dan Pengaruhnya terhadap Gangguan Saluran Pernapasan. Surabaya: Airlangga University Press.
6. Soedomo, M. (2001). Pencemaran Udara. Bandung: Penerbit ITB.
7. Wardhana, W. A. (2004). Dampak Pencemaran Lingkungan. Yogyakarta: Andi Offset.
8. Fardiaz, S. (1992). Polusi Air dan Udara. Yogyakarta: Kanisius.
9. Anwar, K., & Wijaya, C. (2024). *Dampak Emisi Kendaraan Bermotor Diesel Terhadap Akumulasi Particulate Matter (PM2.5) di Wilayah Urban*. Jurnal Teknik Lingkungan UI, 19(3), 201-210.
10. Hidayat, M. S., & Kusuma, W. (2023). *Evaluasi Kinerja Sensor IoT Rendah Biaya (Low-Cost Sensor) dalam Pengukuran Kualitas Udara Ambien*. Jurnal Instrumentasi Lingkungan, 8(2), 89-98.
11. Nasution, S. R., & Siregar, M. A. (2022). *Analisis Pola Sebaran Polutan Udara di Wilayah Metropolitan Medan menggunakan Pemodelan Spasial*. Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan, 14(2), 112-125.
12. Prasetyo, A., Utomo, R. B., & Susanto, H. (2023). *Penerapan Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT) pada Kluster Industri Manufaktur*. Jurnal Teknologi Lingkungan, 24(1), 45-52.
13. Rahmawati, F. (2020). *Toksikologi Lingkungan dan Dampak Kesehatan Kerja Akibat Paparan Debu Mikroskopis*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
14. Siregar, I. F. (2021). *Profil Ekonomi Wilayah Kota Medan: Karakteristik Industri Manufaktur KIM dan Maritim Belawan*. Medan: USU Press.
15. Sudarsono, T. (2019). *Klimatologi Lingkungan: Pengaruh Angin Darat dan Angin Laut terhadap Dispersi Polutan di Wilayah Pesisir*. Jakarta: Erlangga.