

ISPU UNTUK KESEHATAN MASYARAKAT: SEBUAH TINJAUAN NARASI TENTANG PEMANTAUAN KUALITAS UDARA

AQI for public health: A narrative review of air pollution monitoring

Vissia Didin Ardiyani^{*1}

Nang Randu Utama²

^{*1}Jurusan Keperawatan, Poltekkes
Kemenkes Palangka Raya

² Jurusan Keperawatan, Poltekkes
Kemenkes Palangka Raya

*email:
vissia.ardiyani@polkesraya.c.id

Abstrak

Efek negatif kualitas udara ambien yang buruk banyak dibuktikan oleh berbagai penelitian, dan temuan-temuan tersebut sangat penting bagi masyarakat, terutama kelompok rentan, untuk memahami kondisi udara di wilayah mereka sehingga tindakan pencegahan dapat segera dilakukan ketika terjadi peningkatan polusi. Para pembuat kebijakan juga perlu memiliki pemahaman yang baik mengenai pola kualitas udara saat ini serta proyeksi di masa mendatang. Tinjauan literatur ini menyoroti pentingnya penyediaan data kualitas udara secara langsung dan sistem peringatan dini terhadap kejadian yang berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat melalui informasi proaktif dan pemanfaatan indeks kualitas udara nasional. Selain itu, tulisan ini membahas sejumlah kendala teknis dalam pengembangan sistem tersebut, termasuk kompleksitas karakteristik polutan, variasi konsentrasi paparan, serta tingkat pemahaman dan penerimaan masyarakat terhadap informasi kualitas udara. Pemanfaatan ponsel dengan aplikasi sensor memungkinkan penyampaian informasi paparan udara yang lebih akurat berdasarkan lokasi dan waktu. Dengan demikian, masyarakat dapat menyesuaikan perilaku mereka untuk melindungi kesehatan dan kualitas udara yang mereka hirup — baik dalam menentukan waktu minum vitamin, memilih rute atau moda transportasi saat bepergian, maupun merencanakan waktu yang aman untuk beraktivitas di luar ruangan.

Kata Kunci:

Polusi udara
Sistem peringatan dini komunikasi
Pemantauan lingkungan kesehatan
masyarakat

Keywords:

Air pollution
Early warning system communication
Environmental monitoring public
health

Abstract

Previous research reported the negative effects of low ambient air quality. It is important for the general population, especially vulnerable groups, to be aware of the air quality in their area so that actions can be taken in the event of increased pollution. Policymakers must have a solid understanding of current air quality trends and anticipated future ones. This literature review focuses on providing real-time data and early warnings of potentially harmful events through proactive alert services and national air quality indexes. Several technical obstacles in designing these systems include the complexity of pollutant mixtures or specific exposure concentrations and how well individuals are aware of and receptive to these services. Cell phones with sensor applications could offer the public dynamic, precise exposure measures over time and space. The goal should be to enable people to change their behavior in a way that safeguards both their health and the quality of the air they breathe, regardless of when to increase medicine, the route/mode of transportation when traveling to work or school, or when is best for doing outdoor activities.



PENDAHULUAN

Kota-kota di dunia berkembang dengan cepat, yang mengarah pada peningkatan kuantitas konsumsi energi dan peningkatan emisi yang berasal dari operasi transportasi dan manufaktur. Akibatnya, individu yang tinggal di negara maju dan berkembang terpapar oleh polutan udara, yang mengandung berbagai macam zat berbahaya di wilayah perkotaan. Hasil yang diperoleh dari penyelidikan epidemiologi dan toksikologi yang berkaitan dengan pengaruh polusi udara ambien terhadap kesehatan masyarakat umum membuktikan konsekuensi yang merugikan pada jumlah kematian dan morbiditas jangka panjang dan jangka pendek yang terkait dengan penyakit kardiovaskular (Alahmad et al., 2023; Chen et al., 2022; Deng et al., 2023; Duan, Hao, & Yang, 2020; Hu et al., 2023; Santika et al., 2023; Wu et al., 2022). Selain itu, semakin banyak laporan penelitian yang saat ini meneliti tentang kemungkinan polusi udara juga menimbulkan risiko tinggi selain penyakit kardiovaskular, termasuk dampak buruknya terhadap reproduksi (Ardiyani, 2022) dan dampaknya terhadap gangguan sistem saraf (Milton & White, 2020b).

Selain dampak morbiditas yang diakibatkan oleh paparan terus menerus dari polusi udara di perkotaan, konsentrasi polutan udara luar ruangan yang meningkat dan berkepanjangan, dikaitkan dengan kematian dini. Hal ini muncul sebagai akibat dari lingkungan yang mengemisikan polutan udara berbahaya yang disebabkan oleh udara yang bergerak lambat atau emisi tinggi di atas ambang batas yang diakibatkan oleh peristiwa seperti kebakaran hutan, debu vulkanik, kemacetan lalu lintas, dan konstruksi, serta polusi udara lintas batas administrasi yang jaraknya jauh (≥ 1000 km). Karakteristik kualitas lingkungan pada kondisi musim panas di Indonesia biasanya ditandai dengan meningkatnya konsentrasi partikulat (PM), nitrogen dioksida (NO₂), dan sulfur dioksida (SO₂) (Budiyono, Hamdi, Komala, & Sumaryati, 2009). Berbeda dengan kondisi di Indonesia, di negara-negara yang memiliki musim dingin, peningkatan konsentrasi polutan terjadi pada musim dingin dimana masyarakat akan menggunakan penghangat ruangan untuk menormalkan suhu ruangan. Sebagai contoh, polusi udara di London pada tahun 1952 dan 1991, dan beberapa bagian dari Jerman Barat pada tahun 1985, merenggut nyawa sebelum waktunya dan meningkatkan angka kesakitan akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular (Logan, 1953; Wichmann, 2004a, 2004b). Selama musim panas, episode kabut asap akibat reaksi fotokimia dapat diamati, yang sebagian besar disebabkan oleh interaksi sinar matahari dengan nitrogen oksida (NO_x) dan hidrokarbon yang dipancarkan oleh kendaraan. Pada musim kemarau ditandai dengan peningkatan kadar ozon ambien (O₃), yang dikaitkan dengan tingkat kematian yang tinggi. Contoh ilustrasi dari fenomena ini adalah gelombang panas yang berdampak pada 31 kota di Cina antara tahun 2007 dan 2013 (Yang et al., 2019). Di banyak wilayah di luar Tiongkok, polusi udara berasal dari kebakaran hutan dan badai debu, yang mengakibatkan partikulat melintasi jarak yang sangat jauh hingga ribuan kilometer. Akibatnya, polutan ini berdampak buruk pada kesehatan masyarakat di daerah yang secara geografis

berada jauh dari sumber emisi udara tersebut. Hubungan antara partikulat akibat kebakaran hutan dan kematian (Roberts & Wooster, 2021), gangguan pernapasan (Aguilera, Corringham, Gershunov, & Benmarhnia, 2021; Zaini, Dwi Susanto, Samoedro, Bionika, & Antariksa, 2020), gangguan kardiovaskular (Jones Caitlin et al., 2020), gangguan pada sistem saraf (Milton & White, 2020a), kerusakan DNA dan gangguan pada hasil reproduksi (Ardiyani, Kelly, Phillips, Wooster, & Grosvernor, 2024), serta kemungkinan kanker akibat paparan partikel yang berasal dari kebakaran hutan (Yu et al., 2022) merupakan beberapa contoh dampak polusi udara yang dilaporkan.

Dampak konsentrasi polutan udara yang lebih tinggi di luar ruangan terhadap kesehatan tergantung pada variasi antar individu dan subkelompok di dalam masyarakat. Variabilitas ini muncul dari perbedaan kerentanan individu, yang dapat memengaruhi ambang batas di mana dampak kesehatan muncul dan kadar di mana gejala memburuk dengan meningkatnya konsentrasi polusi udara. Ada beberapa faktor yang berkontribusi terhadap kerentanan individu tertentu. Faktor-faktor ini dapat mencakup kecenderungan genetic (Zhu et al., 2023), adanya penyakit pernapasan atau kardiovaskular kronis (Qiu et al., 2015), terjadinya penyakit metabolik termasuk diabetes (So et al., 2022), atau asupan antioksidan yang tidak memadai dalam makanan (Chiarello et al., 2023). Usia juga merupakan faktor yang paling mungkin berdampak pada gangguan kesehatan. Hal ini karena anak-anak memiliki sistem paru-paru dan kekebalan tubuh yang masih dalam proses perkembangan, sedangkan lansia sering mengalami akumulasi penyakit kronis dan penurunan sistem tubuh yang berhubungan dengan penuaan (Wang et al., 2022). Karakteristik individu lainnya yang berpotensi meningkatkan kerentanan seseorang terhadap paparan polusi udara termasuk tingkat aktivitas fisik yang tinggi, yang dapat menyebabkan peningkatan ventilasi paru-paru (Guo et al., 2022). Selain itu, deprivation sosial, yang mungkin dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti peningkatan tingkat penyakit kronis, kebiasaan makan yang tidak optimal, dan paparan yang tinggi, juga dapat berkontribusi terhadap sensitivitas ini.

Dampak kualitas udara yang buruk terhadap kesehatan masyarakat sangat besar; namun, penelitian yang ada menunjukkan bahwa masyarakat memiliki tingkat pengetahuan yang rendah tentang hubungan antara polusi udara dan kesehatan, serta memiliki pemahaman yang tidak memadai tentang informasi kualitas udara (Hang, Lorn, Aun, Um, & Taing, 2023). Laporan penelitian lain, terutama survei tentang persepsi polusi udara dan kesehatan, menunjukkan kesadaran akan dampak polusi udara terhadap kesehatan dengan persentase yang tinggi, yaitu lebih dari 60%, namun tidak disertai dengan perubahan perilaku untuk menghindari paparan polusi udara (Lynch & Mirabelli, 2021). Bertentangan dengan temuan lain, beberapa penelitian menunjukkan bahwa terdapat tingkat dampak minimal karena paparan polusi udara. Selain itu, penting untuk disadari bahwa terdapat tingkat kepedulian masyarakat yang cukup besar terhadap masalah kualitas udara yang buruk. Selain itu, ada bukti empiris yang menunjukkan tingkat kesadaran mengenai peringatan kualitas udara, serta hubungan penting antara

kesadaran yang disebutkan sebelumnya dan perubahan selanjutnya pada aktivitas di luar. Untuk maju menuju lingkungan yang lebih berkelanjutan dan lebih hijau, yang ditandai dengan risiko minimal terhadap kesehatan masyarakat akibat polusi udara, sangat penting untuk meningkatkan pemahaman umum tentang masalah kualitas udara di berbagai segmen masyarakat. Misalnya, sangat penting bagi masyarakat umum, terutama mereka yang rentan, untuk memperhatikan kualitas udara di lingkungan mereka, karena pengetahuan ini memberdayakan diri mereka untuk merespons dengan tepat jika terjadi peningkatan konsentrasi pencemar. Agar pemerintah dapat secara efektif mengidentifikasi masalah, mengarahkan program, dan menilai kemajuan, pejabat pemerintah harus memiliki pemahaman yang luas tentang kondisi kualitas udara saat ini dan pola antisipasi di masa depan. Tingkat kesadaran masyarakat dapat ditingkatkan melalui penerapan sistem pemantauan, prediksi, dan pelaporan polusi udara yang efisien yang memenuhi kebutuhan semua pemangku kepentingan yang terlibat. Artikel ini memberikan gambaran umum tentang langkah-langkah pemantauan kualitas udara yang diperlukan yang dianggap penting untuk menjaga kesehatan masyarakat. Selain itu, artikel ini juga menyajikan ringkasan pendekatan yang direkomendasikan untuk memanfaatkan data yang dikumpulkan secara efektif. Penelitian ini berpusat pada pemanfaatan data kualitas udara untuk tujuan membuat indeks standar kualitas udara (ISPU) dan menerapkan layanan peringatan proaktif. Selanjutnya, penyelidikan terkait dengan sikap publik mengenai sistem ini dilakukan dan diikuti dengan eksplorasi potensi pengembangan yang bertujuan untuk meningkatkan keefektifan dan ketepatannya.

PEMODELAN KUALITAS UDARA

Banyak negara memiliki sistem jaringan pemantauan kualitas udara yang terintegrasi yang didedikasikan untuk mengukur konsentrasi berbagai kontaminan yang ada di atmosfer. Sistem ini dibuat terutama karena adanya tanggung jawab terhadap peraturan suatu negara untuk menyediakan data kualitas udara yang diamati dan pemodelan prediksi kualitas udara sesuai dengan mandat legislatif di tingkat nasional, regional, dan lokal. Sebagai contoh, arahan di negara Uni Eropa menetapkan polutan spesifik yang akan dinilai dan protokol penilaian untuk mengontrol kualitas udara, teknik pemantauan, dan kuantitas serta penempatan lokasi (yang mungkin berada di pinggir jalan, perkotaan, atau pedesaan) untuk pengukuran tersebut. Selain itu, terdapat juga berbagai sistem jaringan pemantauan yang memiliki tujuan, ruang lingkup, dan cakupan yang berbeda. Beberapa jaringan ini menyediakan informasi untuk masyarakat tentang kualitas udara di satu daerah, dan tambahan informasi lainnya yang berfokus pada penyediaan informasi mengenai zat kimia atau komposisi polutan. Selain itu, layanan lainnya menyediakan fitur pengukuran konsentrasi dalam jangka waktu yang lebih lama, seperti satu hari atau satu bulan, sehingga memberikan data penting untuk mengevaluasi tingkat dan dampak di wilayah geografis yang lebih luas.

Banyak negara memiliki sistem pemantauan kualitas udara terintegrasi untuk mengukur tingkat

berbagai macam polutan. Sistem ini pada dasarnya disusun dan dipasang sebagai kewajiban peraturan suatu negara untuk melaporkan data kualitas udara dan pemodelan prediksi sesuai dengan persyaratan nasional, dan undang-undang di tingkat regional maupun lokal. Sebagai contoh, di Eropa, terdapat arahan untuk memantau polutan udara, kontrol kualitas udara, teknik pemantauan, dan jumlah serta lokasinya (pinggir jalan, perkotaan, pedesaan). Di luar kerangka kerja peraturan ini, sistem jaringan pemantau udara yang dikembangkan oleh masing-masing negara berbeda-beda dan memiliki tujuan, cakupan, dan ruang lingkup yang spesifik, dengan beberapa di antaranya menyediakan data yang hampir secara langsung relevan dengan situasi saat ini dan dapat diakses secara langsung oleh masyarakat. Selain itu, sistem jaringan pemantauan ini dapat memberikan rincian bahan kimia atau komposisi polusi, sedangkan beberapa akan mengukur konsentrasi selama satu hari atau satu bulan, sehingga sistem pemantauan kualitas udara ini dapat memberikan data yang sangat berharga untuk menilai tingkat dan dampak polusi udara di setiap area yang lebih luas.

Sistem pemantauan kualitas udara saat ini diperlengkapi dengan layanan untuk memperkirakan konsentrasi polutan udara. Oleh karena itu, estimasi kualitas udara ini memungkinkan penilaian kualitas udara di wilayah geografis yang lebih luas dibandingkan dengan hanya mengandalkan kondisi nyata pemantauan di lokasi dimana alat ukur dipasang. Contoh dari konsep ini adalah kemampuan untuk memprediksi kualitas udara dalam jarak yang sangat jauh, yang memungkinkan identifikasi sumber polusi yang berada beberapa ratus kilometer jauhnya dari area yang diperkirakan. Sementara itu, di daerah metropolitan yang padat penduduk dengan tingkat lalu lintas yang tinggi, pemantauan dan pemodelan dapat digunakan untuk meningkatkan prakiraan kualitas udara. Ada beberapa metodologi untuk estimasi dengan tingkat kerumitan yang berbeda yang digunakan secara global. Metodologi yang disebutkan di atas dapat dikategorikan ke dalam dua kelompok utama: metodologi statistik dan model deterministik. Pemodelan dengan algoritma tertentu memanfaatkan keahlian manusia dan hubungan matematis antara data meteorologi dan data polusi udara. Sementara itu, ada juga pemodelan yang menggunakan informasi meteorologi dan emisi untuk memodelkan proses kimia dan fisika sehingga pada akhirnya dapat menentukan konsentrasi polutan. Model ini disebut sebagai model deterministic. Baru-baru ini, kemajuan teknologi memungkinkan pengembangan model deterministik yang lebih terkini seperti sistem *Prevair* yang beroperasi di Prancis dan sistem *AirNow* di AS. Sementara itu di Afrika Selatan di tahun 2024 mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor yang menggunakan *internet of things* (IoT) dan intelensia buatan (AI). Sistem tersebut dinamakan *Ai_r*. Biaya pembuatan *Ai_r* sekitar US\$100. Sensor yang dipasang di dalam kotak kecil dapat dipasang di ambang jendela bangunan mana pun, di mana mereka mengambil sampel udara dan mengirimkan data ini kembali ke cloud dalam waktu yang nyata. Pemodelan dan perkiraan dibuat dengan kecerdasan buatan yang terhubung ke cloud (The South African Consortium,

2024). Dalam konteks pemantauan kualitas udara, kecerdasan buatan akan memperoleh pengetahuan dari data kompleks yang dihasilkan oleh sensor-sensor ini dan kemudian menghasilkan prediksi. Misalnya, Ai_r akan mampu memberi tahu masyarakat tentang pengaruh perubahan meteorologi terhadap kualitas udara, sehingga memungkinkan masyarakat umum untuk mengidentifikasi daerah-daerah dengan udara paling tercemar. Ai_r berbentuk sebuah kotak berisi perangkat sensor polutan udara dilengkapi dengan laser kecil yang memancarkan cahaya ke atmosfer. Konsentrasi partikel dapat diperoleh dengan mengukur penyebaran dan refleksi cahaya tersebut. Pengukuran tersebut kemudian dikirimkan ke komputer kecil yang terletak di dalam kotak, yang berkomunikasi dengan sistem berbasis cloud melalui antena setiap lima menit, menggunakan teknologi IoT untuk menyimpan data. Oleh karena itu, tidak perlu ada orang yang hadir di lokasi untuk mengambil sampel kualitas udara.

INDEKS STANDAR PENCEMAR UDARA (ISPU)

Indeks Kualitas Udara (AQI) di Indonesia dikenal sebagai Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Pada artikel ini penulis menggunakan istilah ISPU sebagai alternatif kosakata. ISPU diberlakukan secara resmi di Indonesia sejak tahun 1997 dan mengalami perubahan peraturan hingga tahun 2020. ISPU adalah indikator tanpa satuan yang berasal dari analisis data pemantauan dan pemodelan, yang dihitung dengan menerapkan beberapa transformasi algoritmik, yang menghasilkan nilai numerik yang hilang dari unit tertentu. ISPU menggunakan metodologi komputasi untuk mengubah data kualitas udara terperinci menjadi kerangka kerja yang menyoroti tingkat polusi dan dampak kesehatan terkait yang diantisipasi akan terjadi baik pada hari ini atau dalam beberapa hari berikutnya (yaitu dalam jangka pendek). Agar informatif dan bermanfaat bagi masyarakat awam, pengelola ISPU perlu menyusun informasi ilmiah ke dalam format yang mudah diakses, dimengerti, dan ringkas dengan tetap mempertahankan konten substantifnya. Kemajuan teknologi memfasilitasi tersedianya berbagai platform media untuk menyebarkan informasi yang berkaitan dengan pengukuran kualitas udara, prakiraan polusi, dan peringatan mengenai peningkatan tingkat polusi. ISPU di Indonesia saat ini dapat diakses melalui situs web dan aplikasi berbasis Android ISPU Net. Karena target audiens yang berbeda-beda dengan metodologi yang berbeda pula, maka sangat penting untuk menyediakan berbagai cara bagi masyarakat untuk mendapatkan dan tetap mendapatkan informasi terbaru mengenai kualitas udara di daerah mereka.

Perumusan ISPU suatu negara didasarkan pada efek kesehatan akibat paparan polutan dalam jangka pendek, dengan mempertimbangkan beberapa aspek termasuk tingkat polutan saat ini, bukti ilmiah yang muncul dari penelitian toksikologi dan epidemiologi, perkembangan nilai ambang batas nasional dan sasaran kualitas udara, dan ISPU yang ada yang digunakan di berbagai negara. Tidak ada standar tunggal yang berlaku secara umum di seluruh dunia untuk kualitas udara, yang mengikutsertakan berbagai jenis polutan dari satu negara ke negara lain, jumlah kategori yang dibuat,

arti dari setiap kategori, nilai indeks maksimum, dan arti dari efek kesehatan (Tabel 1). Meskipun ISPU memiliki tujuan yang sama untuk mencegah dampak buruk terhadap kesehatan akibat paparan polusi udara dalam jangka pendek, beberapa ISPU menetapkan ambang batas yang lebih ketat daripada yang lain, sementara yang lain mungkin menunjukkan bias terhadap dampak kesehatan. Sebagai contoh, indeks yang dirancang di Amerika Serikat dan Inggris mencakup berbagai macam konsentrasi dan menggunakan informasi berdasarkan dampak kesehatan yang dirasakan, sementara di Prancis, indeks tersebut dikaitkan dengan Nilai Batas dan Ambang Batas Peringatan Uni Eropa.

Tabel 1 Perbandingan indeks kualitas udara di beberapa negara

Country	AQI	Category	CO	NO ₂	O ₃	HC	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
Indonesia* (KLHK, 2020)	≥ 300	 0 – 50: GOOD  51 – 100: MODERATE  101 – 200: UNHEALTHY  201 – 300: VERY UNHEALTHY  301+ : HAZARDOUS	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Australia ^s (GfW, 2026)	500	 0 – 50: GOOD  51 – 100: MODERATE  101 – 150: UNHEALTHY for SENSITIVE  151 – 200: UNHEALTHY  201 – 300: VERY UNHEALTHY  301 – 500: HAZARDOUS	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Canada [†] (Canada Gov., 2026)	10+	 1  2  3 1 – 3: LOW RISK  4  5  6 4 – 6: MODERATE RISK  7  8  9 7 – 10: HIGH RISK  10 + + : VERY HIGH RISK	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓
France [†] (Airparif, 2026)	10	 1 – 2: VERY GOOD  3 – 4: GOOD  5 : AVERAGE  6 – 7: MEDIOCRE  8 – 9: BAD  10: VERY BAD  	✗	✓					
			✓	✗	✓	✓	✓		
Beijing* (AQICN, 2026)	500	 0 – 50: GOOD  51 – 100: MODERATE  101 – 150: UNHEALTHY for SENSITIVE GROUP  151 – 200: UNHEALTHY  201 – 300: VERY UNHEALTHY  301 – 500: HAZARDOUS	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
UK [†] (DEFRA, 2026)	10	 1 – 3: LOW  4 – 6: MODERATE  7 – 9: HIGH  10 : VERY HIGH	✗	✓	✓	✗	✓	✓	
United States* (airNow, 2026)	500	 0 – 50: GOOD  51 – 100: MODERATE  101 – 150: UNHEALTHY for SENSITIVE GROUP  151 – 200: UNHEALTHY  201 – 300: HAZARDOUS  301 – 500: HAZARDOUS	✓	✓	✓	✗	✓	✓	

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) di Indonesia baru-baru ini menerapkan sebuah peraturan, yang dikenal dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 14 tahun 2020, berdasarkan ISPU. Peraturan ini mengadopsi Indeks Kualitas Udara (AQI) yang direkomendasikan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) pada tahun 2018. Menurut peraturan tersebut, ada lima indikator untuk polutan udara, yang termasuk dalam pemantauan dengan tujuan untuk menilai kepatuhan terhadap tingkat baku mutu (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1). Pemantauan kualitas udara di Indonesia dilakukan dengan menggunakan stasiun pemantau yang ditempatkan secara strategis di 39 area kritis di kota-kota besar di Indonesia. Terdapat dua masalah yang terkait dengan perangkat pemantauan kualitas udara yang dipasang di Indonesia. Isu pertama adalah memastikan komunikasi informasi ISPU yang konsisten kepada masyarakat secara umum. Isu kedua menyangkut kalibrasi instrumen yang digunakan untuk pemantauan kualitas udara, untuk menjaga validitas dan keandalan data yang diberikan. Penjelasan lebih lanjut mengenai aspek-aspek faktual dalam domain yang ditentukan disajikan pada bagian "Penerapan jaringan pemantauan kualitas udara selama kebakaran lahan gambut tahun 2019", di mana studi kasus yang melibatkan Palangka Raya akan dikaji.

FITUR-FITUR DALAM ISPU

ISPU terdiri dari karakteristik utama yang memberikan informasi mengenai kualitas udara kepada publik. Polutan yang termasuk dalam analisis indeks standar kualitas, yang berpotensi berdampak pada kesehatan manusia, meliputi karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), ozon (O₃), sulfur dioksida (SO₂), partikulat halus (PM_{2.5}), dan partikulat kasar (PM₁₀). Saat ini, kriteria karbon monoksida (CO) dihilangkan di sebagian besar negara, terutama di negara-negara industri, karena adanya penurunan konsentrasi CO. Di sisi lain, kriteria partikulat dengan diameter 2,5 mikrometer atau kurang (PM_{2.5}) dimasukkan dalam perhitungan sebagai parameter polutan yang signifikan dan memiliki tantangan dalam menanggulangnya selama satu dekade terakhir.

Kategori-kategori dalam ISPU memiliki arti penting dalam kaitannya dengan masalah kesehatan, dan kategori-kategori ini disusun berdasarkan angka yang diperoleh dari perhitungan ISPU dengan menggunakan formula tertentu. Indeks ISPU terdiri dari beragam kategori yang berbeda-beda di berbagai negara. Di Indonesia, kategorisasi ISPU untuk kualitas udara yang baik berada pada kisaran 1-50. Kisaran ini menandakan bahwa kualitas udara ambien selama periode tersebut baik dan tidak membahayakan manusia, hewan, dan tumbuhan, bahkan bagi individu dengan kondisi pernapasan dan kardiovaskular yang sudah ada sebelumnya yang sangat rentan terhadap polutan udara. Untuk sementara, klasifikasi partikulat tersuspensi dalam ruangan yang berbahaya yang melebihi ambang batas 300 menunjukkan bahwa kualitas udara ambien saat ini selama periode tersebut menimbulkan risiko yang signifikan bagi populasi umum. Tingkat konsentrasi udara yang tinggi dapat menyebabkan

kesehatan yang sangat buruk bagi individu dengan kerentanan yang sudah ada sebelumnya dan mereka yang sehat.

Setiap kategori memiliki spektrum yang menunjukkan kontinum konsentrasi polutan udara, sehingga memungkinkan penilaian terperinci tentang tingkat yang ada. Kisaran variabel ini menunjukkan variasi dan dicirikan oleh skala yang berbeda di berbagai negara. Di Indonesia, contoh-contoh yang ada sesuai dengan rentang yang membentang dari 0 hingga lebih dari 300. Perancis dan Inggris menggunakan skala numerik mulai dari 0 hingga 10, sedangkan Amerika Serikat menggunakan rentang yang lebih luas mulai dari 0 hingga 500 (Tabel 1). Metodologi ini memungkinkan individu yang dianggap berisiko lebih tinggi untuk menyesuaikan diri dengan tingkat sensitivitas mereka sendiri dalam kaitannya dengan skala tertentu, dan setelah itu menilai probabilitas terjadinya konsekuensi negatif pada hari tertentu secara individual. Pencantuman gradasi yang memadai sangat penting untuk menunjukkan keragaman konsentrasi polusi udara dan mengurangi rasa frustrasi yang mungkin timbul dari nilai indeks yang sama secara konsisten. Hal ini membantu menepis persepsi bahwa kualitas udara tetap stagnan atau bahwa sistem tidak cukup baik atau tidak berfungsi. Meningkatnya jumlah platform media yang mudah diakses untuk memberikan informasi terbaru secara berkala tentang kualitas udara diharapkan dapat berkontribusi pada semakin pentingnya fenomena ini. Kode warna sering kali disertakan dalam skala ini untuk memudahkan pemahaman, dan penggunaan warna yang konsisten pada peta yang ditampilkan di situs web ISPU memungkinkan masyarakat untuk segera menilai kualitas udara di sekitar mereka.

Selain indeks utama, rincian tambahan terkadang diberikan untuk memberikan rekomendasi kesehatan yang dapat diterapkan untuk mengurangi efek akibat paparan. Salah satu rekomendasi yang mungkin dilakukan adalah meminimalkan jumlah paparan polutan udara. Selain itu, individu harus menahan diri untuk tidak melakukan olahraga pada hari-hari dengan tingkat polusi yang tinggi. Penting juga untuk memastikan bahwa pengobatan diberikan sesuai dengan panduan yang diberikan oleh dokter. Tidak ada kesepakatan mengenai saran yang harus dilakukan oleh masyarakat akibat kualitas udara yang menurun. Beberapa indeks membedakan antara kelompok yang tidak berisiko dan berisiko, sementara yang lain memberikan saran yang berlaku untuk kedua kategori tersebut secara kolektif dan kelompok berisiko tertentu.

Selain itu, indeks tertentu dapat memberikan saran yang berbeda tergantung pada jenis polutannya. Pendekatan konvensional untuk menentukan ISPU secara keseluruhan adalah dengan memilih indeks polutan tertinggi. Misalnya, jika prakiraan atau pengukuran untuk O_3 menunjukkan tingkat sedang, tetapi untuk PM menunjukkan tingkat rendah, indeks akhir yang ditetapkan akan diklasifikasikan sebagai sedang.

Durasi rata-rata bervariasi antara polutan yang berbeda dan antara ISPU yang berbeda, karena sesuai dengan durasi paparan di mana efek berbahaya dapat terjadi. Klasifikasi $PM_{2.5}$, PM_{10} , dan O_3 dikaitkan

dengan periode rata-rata yang relatif panjang, yaitu 24 atau 8 jam. Akibatnya, terdapat kemungkinan kesenjangan waktu yang signifikan antara dimulainya peristiwa polusi dan pengalokasian klasifikasi pita tertentu. ISPU di Inggris yang baru-baru ini dievaluasi menunjukkan bahwa penerapan pengukuran per jam dapat menghasilkan konsekuensi kesehatan yang penting.

Demikian pula, penilaian ISPU dapat dilakukan dalam kondisi tertentu, dan modifikasi diterapkan pada kategori ISPU yang relevan. Pada kasus-kasus di mana terdapat kebakaran hutan, kategori standar yang ada tidak dapat mencakup kondisi-kondisi yang terkait dengan kejadian kebakaran hutan, yang mengakibatkan konsentrasi polutan udara yang sangat berbahaya. Perbedaan komposisi kimiawi antara polutan udara, seperti partikel, yang diemisikan dari kebakaran hutan dan yang berasal dari kendaraan bermotor, menghasilkan berbagai tingkat dampak buruk pada kesehatan manusia. Menurut Williams, Franzi, and Last (2013) partikel PM₁₀ yang berasal dari kebakaran hutan memiliki risiko toksisitas empat kali lipat lebih tinggi pada makrofag daripada partikel PM₁₀ yang berasal dari sumber yang tidak berhubungan dengan kebakaran. Penelitian yang dilakukan secara *in vitro* ini menunjukkan hubungan yang signifikan antara sitotoksitas dan tingkat stres oksidatif pada PM₁₀ yang berasal dari kebakaran hutan pada dosis tertentu.

Oleh karena itu, sangat penting untuk segera mengimplementasikan modifikasi terhadap ISPU yang ada. Selain pemerintah Inggris, pemerintah Kanada juga menerapkan kerangka kerja ISPU untuk area yang memiliki peluang tinggi untuk terjadi kebakaran hutan. ISPU ini diberi nama *Integrated Strategic Planning for Wildland Fire Suppression (AQI Plus)*, yang mencakup penggabungan kategori ISPU yang secara khusus dirancang untuk mengatasi kejadian kebakaran hutan dan lahan di Kanada. Modifikasi terhadap klasifikasi ISPU dilakukan pada tahun 2016, yang menghasilkan pengecualian tiga polutan setiap kali konsentrasi PM_{2.5} mencapai 60 µg/m³ selama periode pengukuran satu jam. Klasifikasi ISPU + ditetapkan ketika pengukuran 24 jam standar ISPU PM_{2.5} melebihi 25 µg/m³. ISPU, atau dampak terhadap kesehatan dari asap dan partikel di lingkungan perkotaan, digunakan dalam kasus kebakaran hutan atau lahan di Kanada. ISPU digunakan untuk menentukan tingkat dampak terhadap kesehatan, dengan ambang batas 60 µg/m³ yang mengindikasikan adanya dampak yang merugikan (Yao et al., 2020). Meningkatnya jumlah platform media untuk penyebaran informasi kualitas udara ambien yang tepat, dapat diandalkan, dan kondisi nyata di lapangan menghasilkan norma dalam masyarakat di mana mengakses informasi terkini tentang kualitas udara menjadi bagian integral dari kehidupan mereka. Biasanya, kisaran ISPU digambarkan secara visual menggunakan warna dalam hubungannya dengan peta, memberikan informasi kualitas udara spasial.

KETERBATASAN ISPU

Penetapan ISPU, yang dimaksudkan untuk mengkomunikasikan perubahan polusi udara untuk

digunakan dalam sistem penyebaran informasi publik, memiliki banyak kendala ilmiah yang muncul sebagai masalah teknologi dan komunikasi. Hal ini berbeda dengan parameter lainnya yang lebih mudah dimengerti seperti sinar ultraviolet (UV) dan indeks panas. Kehadiran sifat kompleks ini berpotensi berkontribusi pada gagasan bahwa konsep kualitas udara kurang mudah dipahami oleh masyarakat pada umumnya. Oleh karena itu, ada permintaan dari masyarakat untuk menyediakan panduan yang ringkas dan mudah diakses yang menghindari terminologi teknis. Di bawah ini adalah beberapa istilah yang terkait dengan ISPU.

Ambang batas

Karena variasi sensitivitas terhadap polutan yang berbeda-beda pada setiap orang, maka batas-batas antara ambang batas harus ditentukan. Memang, penelitian menunjukkan bahwa, pada tingkat populasi, tidak ada ambang batas efek yang dapat diidentifikasi untuk polutan udara yang umum; akibatnya, tingkat paparan yang rendah pun dapat berdampak pada beberapa individu.

Paparan terus menerus dan reaksi progresif

Efek kesehatan yang merugikan akibat paparan polutan udara dapat muncul dengan segera atau di kemudian hari. Artinya, jika seseorang terpapar oleh satu atau beberapa polutan udara dengan konsentrasi tinggi pada satu waktu, efeknya akut (akan terlihat pada hari yang sama) atau beberapa hari kemudian dan dapat diamati sebulan atau lebih kemudian (Zhu et al., 2023). Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya kasus kematian (Zhao, Liu, Hou, Sun, & Beazley, 2021) dan kunjungan ke rumah sakit (Park et al., 2020; Requia et al., 2023). Meskipun demikian, metode yang digunakan untuk memperkirakan efek paparan masih menjadi bahan perdebatan. Selain itu, paparan polusi udara konsentrasi tinggi setiap hari dapat menimbulkan risiko yang lebih besar untuk menimbulkan efek kesehatan yang merugikan akibat paparan polutan pada tingkat kualitas udara normal atau bahkan di bawah ambang batas (Demoury et al., 2022; Ibrahim et al., 2022). Mengingat indeks membutuhkan waktu sehari-hari sebagai peristiwa individual dan bukan sebagai rangkaian kumulatif, indeks ini tidak dapat memandu efek jangka panjang atau kumulatif karena keterbatasannya dalam memberikan informasi tentang tingkat polusi udara pada waktu nyata dan perkiraan dalam jangka pendek. Sebagai contoh, kebingungan akan terjadi jika indeks ditetapkan pada hari ketika nilai PM_{10} antara 50 dan 100 mg/m^3 berubah atau diperkirakan bervariasi berdasarkan konsentrasi hari sebelumnya.

Variabilitas spasial dan temporal

ISPU hanya dapat memberikan gambaran umum tentang tingkat polusi udara yang akan dialami seseorang, bukan konsentrasi yang tepat di alamat tertentu. Sebagai contoh, 1). ketika kebakaran hutan terjadi di daerah yang rawan kebakaran, konsentrasi akan lebih tinggi di daerah sekitar sumber kebakaran sementara daerah lain secara signifikan lebih terpengaruh oleh asap kebakaran lokal; 2). variasi akan terjadi jika orang melakukan perjalanan di daerah dengan tingkat polusi udara yang berbeda-beda; 3).

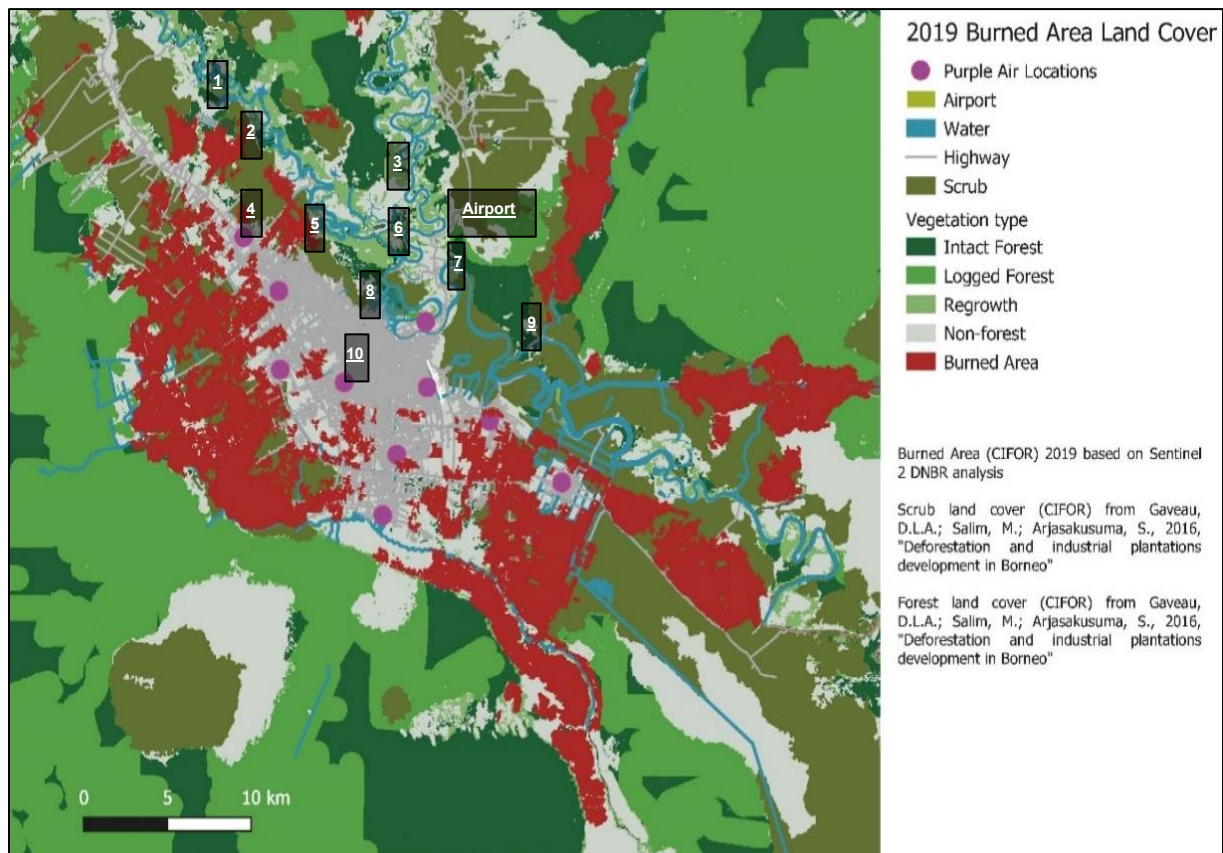
Konsentrasi polutan udara bervariasi berdasarkan tingkat spasial pengukuran di bumi. Polutan udara primer yang berasal dari kemacetan lalu lintas akan memiliki konsentrasi yang lebih tinggi di daerah yang dekat dengan kemacetan lalu lintas, sedangkan polutan udara seperti O_3 akan memiliki konsentrasi yang lebih rendah di daerah yang dekat dengan kemacetan lalu lintas dibandingkan dengan daerah pedesaan; 4). Konsentrasi polutan udara juga bervariasi menurut waktu (jam atau hari) tergantung pada pola temporal sumber polusi udara, misalnya kemacetan lalu lintas. Faktor meteorologi juga mempengaruhi dispersi polutan dan bahan kimia di udara.

Komposisi polutan udara yang kompleks

Udara yang tercemar tidak hanya disebabkan oleh satu polutan saja. Sebagai contoh, selama peristiwa fotokimia, emisi polutan dan proses kimiawi yang menyebabkan tingginya kadar O_3 menyebabkan tingginya konsentrasi PM_{10} dan NO_2 . Kelemahan dari ISPU adalah bahwa ISPU tidak dirancang untuk memantau konsentrasi udara yang disebabkan oleh lebih dari satu polutan. Jika ISPU menunjukkan NO_2 dan PM pada tingkat sedang, maka indeks kualitas udara secara keseluruhan akan disimpulkan sebagai sedang dan tidak menunjukkan efek penambahan atau interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, ISPU tidak dimaksudkan untuk memberikan informasi tentang efek sinergis antara kedua polutan udara yang diemisikan, sehingga tidak sesuai untuk digunakan dalam studi epidemiologi yang membutuhkan konsentrasi multi-polutan.

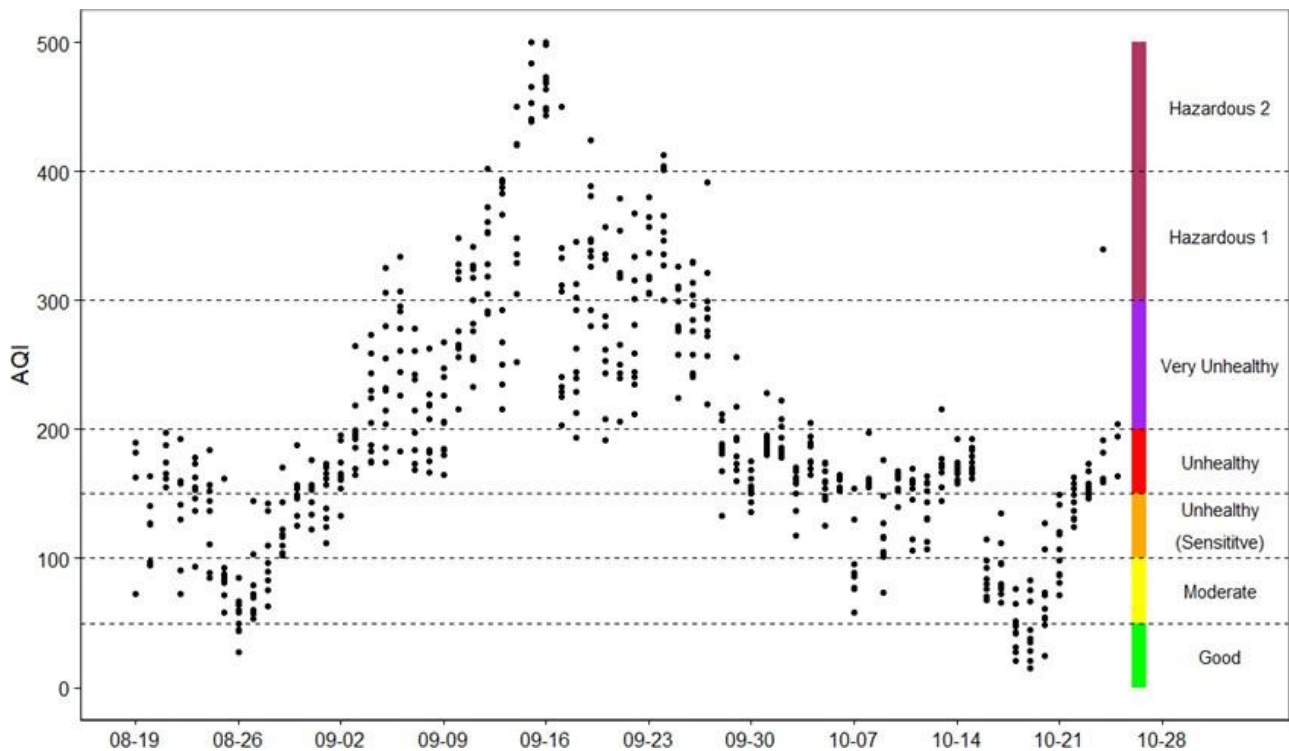
PENERAPAN SISTEM JARINGAN PEMANTAUAN KUALITAS UDARA SELAMA KEBAKARAN LAHAN GAMBUT TAHUN 2019

Selain memantau kualitas udara ambien di kota-kota besar (misalnya, Jabotabek) dengan sumber polutan utama seperti kendaraan bermotor, pembakaran batu bara, pembakaran terbuka, konstruksi, debu jalan, dan partikel tanah, pemantauan juga dapat dilakukan di daerah-daerah di mana kebakaran hutan dan lahan sering terjadi, (misalnya, Kalimantan dan Sumatera). Namun, alat pemantau kualitas udara di wilayah tersebut masih belum memadai. Mengingat situasi tersebut, pemantauan kualitas udara di Palangka Raya selama kebakaran hutan dan lahan pada tahun 2019 diukur dengan menggunakan sensor udara dengan merek *Purple Air* (PA - PurpleAir, Inc.) yang dipasang di 10 titik di kota Palangka Raya (Gambar 1). Lokasi pemasangan PA dipilih berdasarkan kedekatan area tersebut dengan sumber api dan rumah penduduk (Grosvenor et al., 2024). Inisiatif ini diambil karena Palangka Raya hanya memiliki satu unit stasiun pemantau udara yang hanya mencakup gambaran tingkat polusi udara di sekitar lokasi stasiun.



Gambar 1 Lokasi sensor PA yang terpasang di kota Palangka Raya

Sensor PA ditandai dengan titik yang berwarna ungu dengan nomor identifikasi (1-10) dan beroperasi selama 60 hari untuk memantau konsentrasi partikel debu (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}). Area abu-abu adalah tempat pemukiman penduduk. Konsentrasi rata-rata $PM_{2.5}$ per minggu yang tercatat dari bulan Agustus hingga Oktober digambarkan oleh konsentrasi $PM_{2.5}$ mingguan. Konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh satelit CAMS pada bulan Oktober 2019 bertepatan dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh sensor PA pada bulan Oktober 2019. Meskipun Palangka Raya bukan merupakan daerah industri dan kemacetan lalu lintas tidak sesering di Jakarta, kota ini sering terkena dampak kabut asap dari kebakaran hutan dan lahan. Menurut data dari *Copernicus Atmospheric Monitoring System* (CAMS), intensitas polusi dari kebakaran hutan pada tahun 2019 merupakan kualitas udara yang terburuk kedua setelah kebakaran hutan pada tahun 2015. Selama pengukuran, sensor PA beroperasi selama 60 hari, 24 jam per hari, dan merekam 93% data. AQI dapat dihitung dari nilai konsentrasi ini sehingga informasi yang disebarkan ke publik adalah indeks kualitas udara yang sesuai dengan US EPA. Gambar 2 menampilkan indeks kualitas udara yang diukur oleh sensor PA dari bulan Agustus hingga Oktober 2019.



Gambar 2 Indeks kualitas udara yang berasal dari sensor PM_{2.5} PA di 10 lokasi di Palangka Raya

Gambar 2 menunjukkan bahwa ISPU di Kota Palangka Raya melebihi 500 diklasifikasikan sebagai kategori sangat berbahaya. Pada bulan Agustus 2019, hanya ada satu hari dengan kualitas udara yang sangat baik di kota ini, sementara delapan hari diklasifikasikan sebagai berbahaya bagi kesehatan. Mayoritas 30 dari 60 hari pengukuran udara ambien menunjukkan bahwa Kota Palangka Raya tidak sehat, dan 15 dari 60 hari pengukuran tersebut menunjukkan bahwa ISPU sangat tidak sehat. Sensor PA berfungsi sebagai pengganti alat pemantau kualitas udara yang digunakan di Kantor Kelurahan Jekan Raya. Alat ini biasa disebut sebagai Telusur AQMS, yang merupakan singkatan dari Air Quality Monitoring System. Sayangnya, Sistem Pemantauan Kualitas Udara (AQMS) yang beroperasi selama kebakaran hutan dan lahan tahun 2019 menunjukkan pola yang tidak biasa (Gambar S1), berbeda dengan sensor PA. Selain itu, AQMS sering mengalami gangguan listrik, yang mengakibatkan banyak data yang hilang dalam pengukuran kualitas udara.

Ketika mempertimbangkan cara-cara meningkatkan pemantauan kualitas udara di Indonesia, penting untuk mempertimbangkan beberapa faktor kunci yang dapat dipelajari dari situasi ini. Faktor-faktor tersebut antara lain: Pertama, Pemerintah harus memprioritaskan masalah kualitas udara, terutama yang berkaitan dengan penerapan metode yang berkelanjutan untuk memantau kualitas udara ambien. Kedua, persyaratan penting di daerah dengan aktivitas kendaraan bermotor, daerah dengan frekuensi kebakaran hutan yang sering serta daerah dengan industri yang banyak adalah membangun

infrastruktur yang komprehensif untuk alat pemantauan kualitas udara yang terstandarisasi. Contoh alat tersebut antara lain *tapered element oscillating microbalance* (TEOM) dan *federal reference method* (FRM). Alat-alat ini berfungsi sebagai stasiun referensi untuk pemantauan udara dan dapat memberikan data yang akurat dan dapat diandalkan. Oleh karena itu, menempatkan stasiun pemantauan ini dalam jumlah yang cukup di lokasi yang tepat sangat penting untuk menilai dan memantau kualitas udara secara efektif. Ketiga, kalibrasi rutin diperlukan ketika teknologi sensor berbiaya rendah digunakan untuk pemantauan kualitas udara. Kalibrasi berkelanjutan diperlukan untuk sensor dengan harga terjangkau seperti *Purple Air* karena kerentanan sensor ini terhadap banyak faktor yang dapat memengaruhi keakuratan pembacaan pemantauan kualitas udara. Faktor-faktor ini termasuk perubahan cuaca yang ekstrem, seperti dari musim hujan ke musim kemarau atau selama musim kemarau yang panjang karena perubahan suhu dan kelembapan udara. Aspek lain yang berpengaruh adalah ukuran partikel, yang berdampak pada proses pembacaan karena teknologi hamburan cahaya yang tidak memadai ketika memeriksa konsentrasi partikel dengan berbagai ukuran (yaitu PM₁₀, PM_{2.5}, dan PM₁). Keterbatasan penggunaan sensor ini termasuk kurangnya mekanisme pembersihan secara otomatis, yang mengakibatkan peningkatan pengukuran konsentrasi ketika sensor terkena konsentrasi partikel yang tinggi (Wu et al., 2022).

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS UDARA AMBIEN

Di wilayah perkotaan besar di negara-negara maju, termasuk London, Paris, dan Beijing, terjadi kemajuan yang signifikan dalam hal prakiraan dan penilaian kualitas udara ambien. Inisiatif ini memperlihatkan pertumbuhan yang luar biasa, yang menghasilkan penyediaan informasi yang tepat dan dapat diandalkan. Kondisi yang disebutkan sebelumnya berdampak positif pada masyarakat, sehingga menumbuhkan tingkat kesadaran dan penggunaan sistem informasi yang tinggi. Penerapan sistem pemantauan kualitas udara saat ini, seperti TEOM, memiliki berbagai keterbatasan. Keterbatasan ini termasuk pemasangan yang terbatas pada lokasi tertentu, cakupan yang terbatas untuk menilai kualitas udara, dan potensi dampak kepadatan polutan udara terhadap keakuratan hasil pengukuran.

Akibatnya, penilaian yang akurat terhadap konsentrasi polutan di tingkat individu dapat melemah, sehingga membatasi kemampuan untuk memperkirakan kondisi nyata secara akurat. Kejadian ini sering dikenal sebagai kendala spasial pada penyebaran polutan di atmosfer. Meningkatkan sistem jaringan pemantauan kualitas udara pada akhirnya akan menghasilkan keandalan estimasi konsentrasi polutan. Sangat penting untuk memprioritaskan hal-hal tersebut dalam konteks Indonesia. Semua warga negara yang tinggal di lokasi dengan tingkat polusi tinggi harus memiliki akses ke data ISPU dan informasi mengenai potensi paparan publik. Tugas ini dapat diimplementasikan dengan mengembangkan sistem informasi kualitas udara yang dapat diakses dan diunduh melalui halaman aplikasi. Contoh fitur yang menarik dapat

dilihat pada Gambar S2.

Argumen utama untuk mengembangkan dan mengadopsi layanan ini terletak pada bukti empiris tentang hubungan antara perubahan jangka pendek dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, penyediaan informasi pencegahan melalui layanan tersebut dimaksudkan untuk memberdayakan individu, sehingga mereka dapat mengambil keputusan yang tepat untuk meningkatkan kesehatan mereka. Salah satu strategi yang paling nyata adalah meminimalkan paparan dan/atau memperkuat pengobatan untuk mengurangi atau mengantisipasi manifestasi gejala. Meminimalkan paparan dapat berupa penggunaan masker atau menyediakan alat pembersih udara di dalam gedung atau menyediakan tempat penampungan untuk layanan napas oksigen dan evakuasi. Dengan demikian, masyarakat dapat mengurangi jumlah pasien yang dirawat di rumah sakit dan kunjungan ke dokter umum, sehingga mengurangi beban pada sistem perawatan kesehatan dan mengurangi biaya yang harus dikeluarkan.

Daftar Pustaka

- Aguilera, R., Corringham, T., Gershunov, A., & Benmarhnia, T. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 12(1), 1493. doi:10.1038/s41467-021-21708-0
- airNow. (2026). Air Quality Index (AQI) US: US EPA. Retrieved from <https://www.airnow.gov/aqi/>
- Airparif. (2026). Association de surveillance de la qualité de l'air. Retrieved from <https://www.airparif.fr/>
- Alahmad, B., Khraisha, H., Althalji, K., Borchert, W., Al-Mulla, F., & Koutrakis, P. (2023). Connections Between Air Pollution, Climate Change & Cardiovascular Health. *Canadian Journal of Cardiology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.03.025>
- AQICN. (2026). A Beginner's Guide to Air Quality Instant-Cast and Now-Cast2007. Retrieved from <https://aqicn.org/faq/2015-03-15/air-quality-nowcast-a-beginners-guide/>
- Ardiyani, V. (2022). *The impact of 2018/2019 wildfire exposure on BaP-DNA adducts and birth weight in Indonesia*. (Doctoral dissertation). King's College London, London. Retrieved from https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/files/191302239/2022_Ardiyani_Vissia_Didin_1539648_ethesis.pdf
- Ardiyani, V., Kelly, F., Phillips, D., Wooster, M., & Grosvernor, M. (2024). *Reflection of prenatal exposure to wildfire smoke on reduced birth weight in 2015-2019*. Paper presented at the E3S Web of Conferences, Bali.
- Budiyono, A., Hamdi, S., Komala, N., & Sumaryati. (2009). Analisis Variasi Diurnal Ozon dan Precursornya Pada Musim Kemarau dan Musim Hujan Di Bandung. *Sains Dirgantara*, 7, 165-175. Retrieved from https://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_sains/article/viewFile/357/309
- Canada Gov. (2026). Air Quality Health Index. Retrieved from <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-quality-health-index.html>
- Chen, H., Zhang, S., Yu, B., Xu, Y., Rappold, A. G., Diaz-Sanchez, D., . . . Tong, H. (2022). Circulating microRNAs as putative mediators in the association between short-term exposure to ambient air pollution and cardiovascular biomarkers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113604. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113604>
- Chiarello, D. I., Ustariz, J., Marin, R., Carrasco-Wong, I., Farias, M., Giordano, A., . . . Gutierrez, J. (2023). Cellular mechanisms linking to outdoor and indoor air pollution damage during pregnancy. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 14, 1084986. doi:10.3389/fendo.2023.1084986

- DEFRA. (2026). What is the Daily Air Quality Index? Retrieved from <https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/daq?view=more-info>
- Demoury, C., De Troeyer, K., Berete, F., Aerts, R., Van Schaeybroeck, B., Van der Heyden, J., & De Clercq, E. M. (2022). Association between temperature and natural mortality in Belgium: Effect modification by individual characteristics and residential environment. *Sci Total Environ*, 851(Pt 2), 158336. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158336
- Deng, X., Zou, B., Li, S., Wu, J., Yao, C., Shen, M., . . . Li, S. (2023). Disease specific air quality health index (AQHI) for spatiotemporal health risk assessment of multi-air pollutants. *Environmental Research*, 231, 115943. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115943>
- Duan, R. R., Hao, K., & Yang, T. (2020). Air pollution and chronic obstructive pulmonary disease. *Chronic Dis Transl Med*, 6(4), 260-269. doi:10.1016/j.cdtm.2020.05.004
- GfW, A. (2026). Air Quality Index Australia: Western Australia. Retrieved from <https://www.der.wa.gov.au/your-environment/air/air-quality-index>
- Grosvenor, M. J., Ardiyani, V., Wooster, M. J., Gillott, S., Green, D. C., Lestari, P., & Suri, W. (2024). Catastrophic impact of extreme 2019 Indonesian peatland fires on urban air quality and health. *Commun Earth Environ*, 5(1), 649. doi:10.1038/s43247-024-01813-w
- Guo, Q., Zhao, Y., Zhao, J., Qian, L., Bian, M., Xue, T., . . . Duan, X. (2022). Identifying the threshold of outdoor PM_{2.5} reversing the beneficial association between physical activity and lung function: A national longitudinal study in China. *Science of The Total Environment*, 839, 156138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156138>
- Hang, L., Lorn, S., Aun, S., Um, D., & Taing, C. (2023). Assessment of people's perception of air quality in Phnom Penh, the capital city of Cambodia. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.255>
- Hu, X., Nie, Z., Ou, Y., Lin, L., Qian, Z., Vaughn, M. G., . . . Dong, H. (2023). Long-term exposure to ambient air pollution, circadian syndrome and cardiovascular disease: A nationwide study in China. *Sci Total Environ*, 868, 161696. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.161696
- Ibrahim, M. F., Hod, R., Ahmad Tajudin, M. A. B., Wan Mahiyuddin, W. R., Mohammed Nawi, A., & Sahani, M. (2022). Children's exposure to air pollution in a natural gas industrial area and their risk of hospital admission for respiratory diseases. *Environ Res*, 210, 112966. doi:10.1016/j.envres.2022.112966
- Jones Caitlin, G., Rappold Ana, G., Vargo, J., Cascio Wayne, E., Kharrazi, M., McNally, B., . . . null, n. (2020). Out-of-Hospital Cardiac Arrests and Wildfire-Related Particulate Matter During 2015–2017 California Wildfires. *Journal of the American Heart Association*, 9(8), e014125. doi:10.1161/JAHA.119.014125
- KLHK. (2020). *Perpu Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan R.I. tentang Indeks Pencemar Udara*. Jakarta: Kemen LHK Retrieved from https://ditppu.menlhk.go.id/portal/uploads/news/1600940556_P_14_2020_ISPU_menlhk_07302_020074834.pdf
- Logan, W. P. D. (1953). Mortality in The London fog Incident, 1952 *The Lancet*, 261(6755), 336-338. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(53\)91012-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(53)91012-5)
- Lynch, K. M., & Mirabelli, M. C. (2021). Outdoor Air Quality Awareness, Perceptions, and Behaviors Among U.S. Children Aged 12-17 Years, 2015-2018. *J Adolesc Health*, 68(5), 882-887. doi:10.1016/j.jadohealth.2020.07.040
- Milton, L. A., & White, A. R. (2020a). The potential impact of bushfire smoke on brain health. *Neurochemistry International* 139(1872-9754 (Electronic)).
- Milton, L. A., & White, A. R. (2020b). The potential impact of bushfire smoke on brain health. *Neurochem Int*, 139, 104796. doi:10.1016/j.neuint.2020.104796
- Park, J., Sohn, J. H., Cho, S. J., Seo, H. Y., Hwang, I. U., Hong, Y. C., & Kim, K. N. (2020). Association between short-term air pollution exposure and attention-deficit/hyperactivity disorder-related hospital admissions among adolescents: A nationwide time-series study. *Environ Pollut*, 266(Pt 1), 115369. doi:10.1016/j.envpol.2020.115369

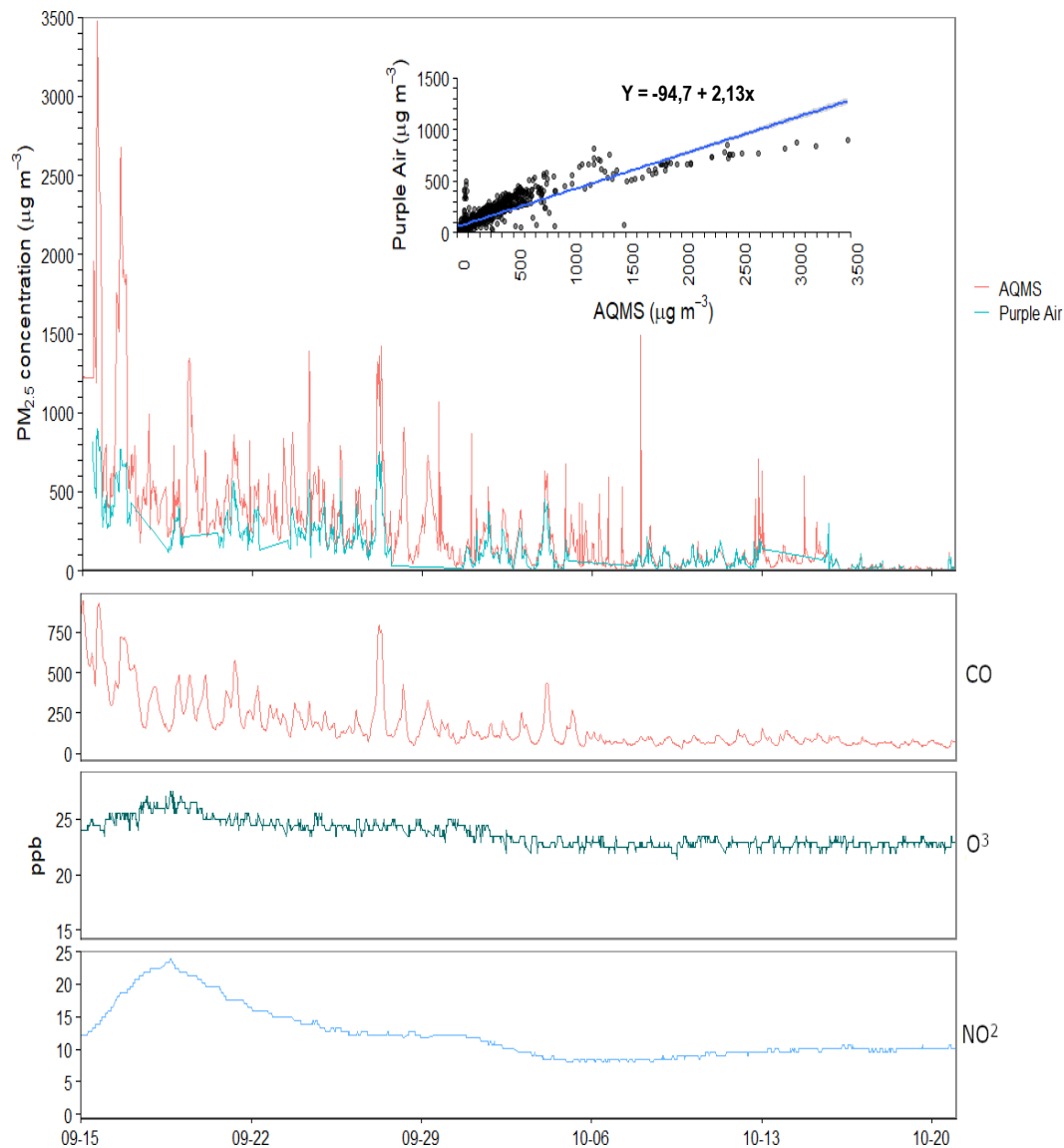
- Qiu, H., Tian, L., Ho, K. F., Pun, V. C., Wang, X., & Yu, I. T. (2015). Air pollution and mortality: effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a case-only study. *Environ Pollut*, 199, 192-197. doi:10.1016/j.envpol.2015.02.002
- Requia, W. J., Vicedo-Cabrera, A. M., Amini, H., da Silva, G. L., Schwartz, J. D., & Koutrakis, P. (2023). Short-term air pollution exposure and hospital admissions for cardiorespiratory diseases in Brazil: A nationwide time-series study between 2008 and 2018. *Environmental Research*, 217. doi:10.1016/j.envres.2022.114794
- Roberts, G., & Wooster, M. J. (2021). Global impact of landscape fire emissions on surface level PM_{2.5} concentrations, air quality exposure and population mortality. *Atmospheric Environment*, 252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118210>
- Santika, T., Muhidin, S., Budiharta, S., Haryanto, B., Agus, F., Wilson, K. A., . . . Po, J. Y. T. (2023). Deterioration of respiratory health following changes to land cover and climate in Indonesia. *One Earth*, 6(3), 290-302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.02.012>
- So, R., Andersen, Z. J., Chen, J., Stafoggia, M., de Hoogh, K., Katsouyanni, K., . . . Mehta, A. J. (2022). Long-term exposure to air pollution and mortality in a Danish nationwide administrative cohort study: Beyond mortality from cardiopulmonary disease and lung cancer. *Environment International*, 164, 107241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107241>
- The South African Consortium. (2024). AI_r South Africa 2024. Retrieved from <https://www.sacaqm.org/ai-r>
- Wang, Z. H., Zhao, W. H., Wang, B., Liu, J., Xu, S. L., Zhang, B., . . . Guan, D. B. (2022). Environmentally vulnerable or sensitive groups exhibiting varying concerns toward air pollution can drive government response to improve air quality. *iScience*, 25(6), 104460. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104460>
- Wichmann, H. E. (2004a). 20 years after the winter smog episode 1985--the particle problem then and today. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 207(1438-4639 (Print)), 489-491.
- Wichmann, H. E. (2004b). What can we learn today from the Central European smog episode of 1985 (and earlier episodes)? *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206(1438-4639 (Print)), 505-520.
- Williams, K. M., Franzi, L. M., & Last, J. A. (2013). Cell-specific oxidative stress and cytotoxicity after wildfire coarse particulate matter instillation into mouse lung. *Toxicol Appl Pharmacol*, 266(1), 48-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.taap.2012.10.017>
- Wu, D., Zhang, G., Liu, J., Shen, S., Yang, Z., Pan, Y., . . . Cai, L. (2022). Influence of particle properties and environmental factors on the performance of typical particle monitors and low-cost particle sensors in the market of China. *Atmospheric Environment*, 268. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118825
- Yang, J., Yin, P., Sun, J., Wang, B., Zhou, M., Li, M., . . . Liu, Q. (2019). Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: Definition, vulnerability and implications. *Sci Total Environ*, 649, 695-702. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.332
- Yu, P., Xu, R., Li, S., Yue, X., Chen, G., Ye, T., . . . Guo, Y. (2022). Associations between long-term exposure to wildfire-related particulate matter and site-specific cancer mortality: a national study in Brazil, 2010-16. *The Lancet Oncology*, 23. doi:10.1016/s1470-2045(22)00405-3
- Zaini, J., Dwi Susanto, A., Samoedro, E., Bionika, V. C., & Antariksa, B. (2020). Health consequences of thick forest fire smoke to healthy residents in Riau, Indonesia: a cross-sectional study. *Medical Journal of Indonesia*, 29(1), 58-63. doi:<https://doi.org/10.13181/mji.oa.204321>
- Zhao, S., Liu, S., Hou, X., Sun, Y., & Beazley, R. (2021). Air pollution and cause-specific mortality: A comparative study of urban and rural areas in China. *Chemosphere*, 262, 127884. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127884
- Zhu, K., Hou, Z., Huang, C., Xu, M., Mu, L., Yu, G., . . . Lu, B. (2023). Assessing the timing and the duration of exposure to air pollution on cardiometabolic biomarkers in patients suspected of coronary artery disease. *Environmental Research*, 232. doi:10.1016/j.envres.2023.116334

Lampiran

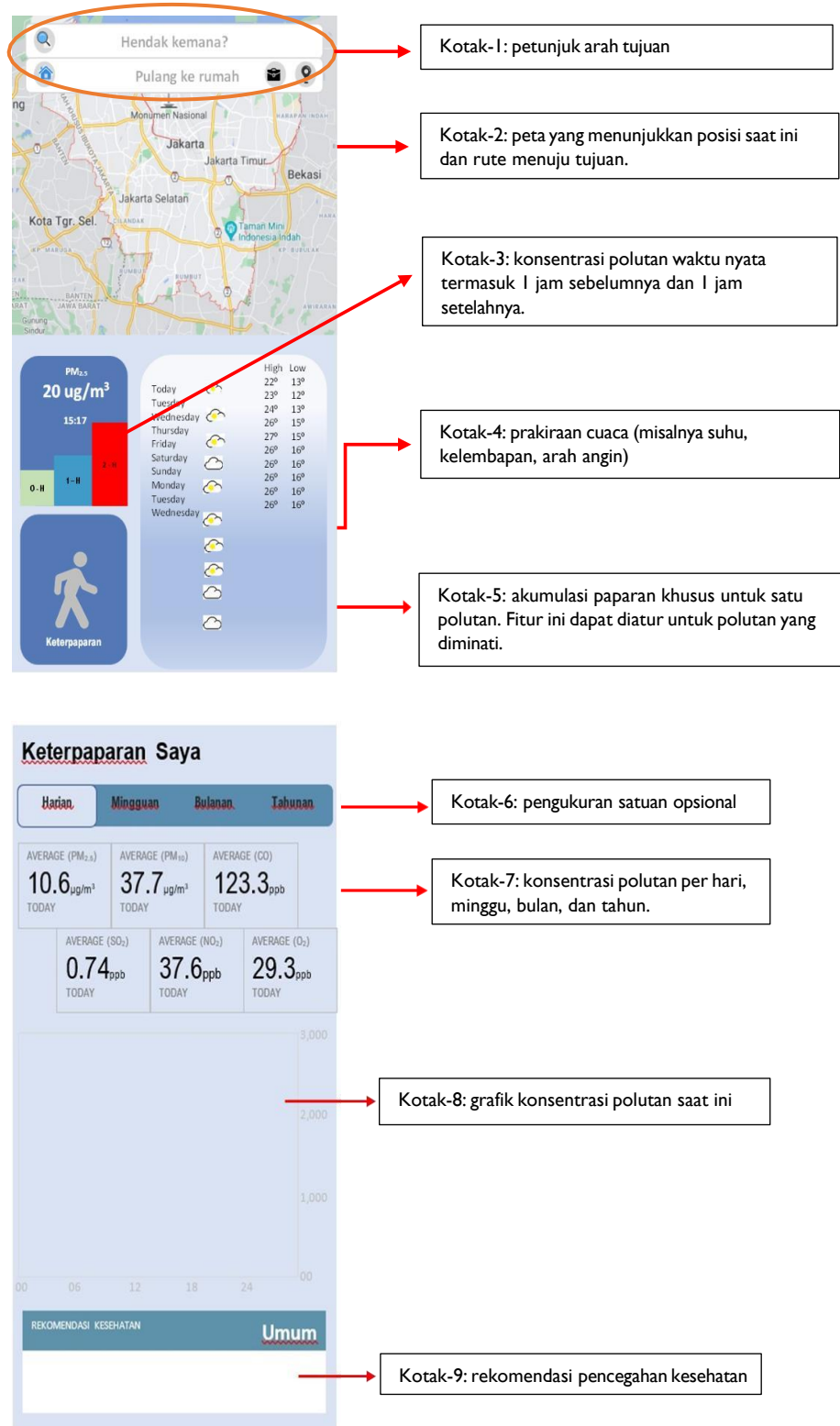
Di lokasi 4 (Bukit Tunggal 3), di mana terdapat alat pemantauan Sistem Manajemen Kualitas Udara (AQMS), analisis perbandingan dilakukan antara konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diperoleh dari sensor PA dan AQMS. Menurut data yang disajikan pada **Gambar S1** dapat dilihat bahwa AQMS cenderung lebih-lebihkan konsentrasi $PM_{2.5}$. Namun, perlu dicatat bahwa pola temporal konsentrasi $PM_{2.5}$ konsisten antara kedua instrumen. Koefisien korelasi (R^2) antara kedua instrumen tersebut adalah 0,79, yang menunjukkan hubungan positif yang cukup kuat. Persamaan regresi linier untuk hubungan ini adalah $Y = -94.7 + 2.13x$, dimana Y menunjukkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh AQMS dan x menunjukkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh instrumen lainnya. Pengamatan ini mengindikasikan kemungkinan kalibrasi yang tidak memadai. Pada pemeriksaan pengukuran gas, khususnya karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO_2), terlihat bahwa pembacaan CO menunjukkan hubungan yang cukup dan positif ($R^2 = 0,65$) dengan konsentrasi $PM_{2.5}$. Pembacaan CO mencapai nilai maksimum 934 bagian per miliar (ppb). Senyawa NO_2 memiliki pola yang sangat stabil, dengan konsentrasi maksimum 23,9 bagian per miliar (ppb). Namun demikian, tidak ada korelasi yang signifikan antara kadar NO_2 dan konsentrasi $PM_{2.5}$, seperti yang ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,15.

Demikian pula, hubungan antara O_3 dan variabel yang dimaksud sangat kecil, seperti yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi yang rendah ($R^2=0,002$). Tingkat karbon monoksida (CO) yang tercatat ditemukan meningkat selama jangka waktu 2019. Selain itu, pengukuran nitrogen dioksida (NO_2) yang diperoleh dari Sistem Pemantauan Kualitas Udara (AQMS) menunjukkan besaran yang sebanding dengan temuan yang dilaporkan oleh Hayasaka dkk. pada tahun 2014. Perbandingan ini mungkin masuk akal, mengingat Hayasaka menggunakan alat yang sebanding. Penting untuk diketahui bahwa dataset ini terbatas pada tanggal 15 September dan 21 Oktober 2019, karena instrumen tersebut menjalani kalibrasi ulang pada tanggal 14 September 2019.

Salah satu keterbatasan yang signifikan dalam menggunakan sensor optik permanen di area di mana sumber partikulat yang konsentrasinya bervariasi di sepanjang musim adalah potensi lebih-lebihkan atau mengurangi estimasi bacaan konsentrasi partikulat. Selain itu, penyelesaian masalah dapat dicapai dengan menerapkan berbagai faktor penyesuaian atau menetapkan kerangka waktu yang jelas untuk transisi di antara berbagai faktor penyesuaian. Terjadinya hal yang terakhir ini mungkin disebabkan oleh variabilitas dalam perubahan sumber daya dari tahun ke tahun, yang mungkin menyebabkan kesalahpahaman terhadap data. Salah satu rekomendasi untuk pemerintah daerah adalah untuk mempertimbangkan penerapan kerangka kerja operasional yang menggunakan analisis metode massa untuk menilai sumber partikulat luar ruangan (PM), terutama ketika sumber non-kebakaran mungkin banyak ditemukan.



Gambar S1 Konsentrasi $PM_{2.5}$, CO, O_3 , dan NO_2 pada tahun 2019 dikumpulkan dari Sistem Pemantauan Kualitas Udara Palangka Raya (AQMS). Sumbu x menunjukkan bulan dan hari, sedangkan sumbu y menunjukkan konsentrasi.



Gambar S2 Aplikasi udara biru. (a) Peta termasuk lokasi saya, konsentrasi polutan udara, fitur meteorologi. (b) Peringatan notifikasi ketika tingkat polusi meningkat, rekomendasi pencegahan Kesehatan