



## Analisis Mendalam Bahaya Polusi Udara dan Upaya Pencegahan Preventif yang Efektif

Shofa Aprilia Zahara<sup>1\*</sup>, Ade Rita Suryani Siregar<sup>2</sup>, Marniati<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Teuku Umar

<sup>2</sup>Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Teuku Umar

E-mail: [shofapzahara24@gmail.com](mailto:shofapzahara24@gmail.com)<sup>1</sup>, [marniati@utu.ac.id](mailto:marniati@utu.ac.id)<sup>3</sup>

Korespondensi penulis : [shofapzahara24@gmail.com](mailto:shofapzahara24@gmail.com) \*

**Abstract:** Air pollution is one of the major public health challenges in Indonesia. This article analyzes the characteristics of main pollutants, emission sources, health impacts, and prevention strategies that have been and are being implemented. Based on secondary data from various government reports, scientific journals, and recent case studies, it was found that emissions from the transportation sector, industry, biomass burning, and forest fires remain the main contributors to air pollution. The impacts include increased incidence of respiratory infections, chronic lung disease, cardiovascular disorders, and economic losses. Preventive efforts such as the adoption of electric vehicles, vehicle emission inspections, and citizen science programs have proven effective but need to be expanded. This article recommends the integration of cross-sectoral policies, the use of modern monitoring technologies, and sustainable public education.

**Keywords:** Air pollution, PM2.5, public health, prevention, environmental policy

**Abstrak:** Polusi udara merupakan salah satu tantangan utama kesehatan masyarakat di Indonesia. Artikel ini menganalisis karakteristik polutan utama, sumber emisi, dampak kesehatan, serta strategi pencegahan yang telah dan sedang diimplementasikan. Berdasarkan data sekunder dari berbagai laporan pemerintah, jurnal ilmiah, dan studi kasus terkini, ditemukan bahwa emisi dari sektor transportasi, industri, pembakaran biomassa, dan kebakaran hutan masih menjadi penyumbang utama pencemaran udara. Dampaknya meliputi peningkatan kejadian ISPA, penyakit kronis paru, gangguan kardiovaskular, serta kerugian ekonomi. Upaya preventif seperti penerapan kendaraan listrik, inspeksi emisi kendaraan, dan program citizen science terbukti efektif namun perlu diperluas. Artikel ini merekomendasikan integrasi kebijakan lintas sektor, penggunaan teknologi pemantauan modern, dan edukasi masyarakat secara berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Polusi udara, PM2.5, kesehatan masyarakat, pencegahan, kebijakan lingkungan

### A. PENDAHULUAN

Polusi udara didefinisikan sebagai masuknya atau kehadiran satu atau lebih zat kimia, fisik, atau biologis di atmosfer melebihi ambang batas baku mutu yang dapat membahayakan kesehatan manusia, hewan, tumbuhan, serta merusak ekosistem dan properti. Menurut Undang-Undang No. 32 Tahun 2009, polusi udara mencakup cemaran gas (seperti NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO), partikel padat (PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>), uap, dan bahan bioaerosol yang diemisikan dari aktivitas manusia maupun proses alamiah. Polutan primer di perkotaan umumnya berasal dari emisi kendaraan bermotor, pembakaran limbah padat, serta cerobong industri, sedangkan polutan sekunder terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer seperti ozon troposferik. Partikel halus (PM<sub>2.5</sub>) menjadi perhatian khusus karena ukuran kecilnya memungkinkan penetrasi ke dalam sistem pernapasan hingga alveoli dan aliran darah, meningkatkan risiko gangguan pernapasan dan kardiovaskular (World Health Organization, 2021). Selain itu, polusi udara dalam ruangan (Indoor Air Pollution) juga signifikan di Indonesia, terutama di daerah pedesaan yang masih

menggunakan sumber bahan bakar padat (biomassa) untuk memasak, sehingga konsentrasi PM2.5 dalam rumah dapat mencapai 5–10 kali lipat dari ambang WHO. Polutan lain seperti timbal (Pb) dan logam berat lainnya juga terdeteksi di area parkir serta pemrosesan logam, menambah kompleksitas dampak jangka panjang terhadap kesehatan masyarakat. Definisi polusi udara kini tidak hanya mempertimbangkan konsentrasi polutan, tetapi juga variabilitas spasial dan temporal yang dipengaruhi kondisi meteorologi, topografi, serta perilaku manusia.

Paparan jangka pendek terhadap polusi udara dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan atas, batuk, dan penurunan fungsi paru (FEV<sub>1</sub>), sedangkan paparan jangka panjang berkontribusi pada peningkatan risiko penyakit kronis seperti asma, bronkitis, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), kanker paru, maupun penyakit kardiovaskular seperti hipertensi dan penyakit jantung iskemik. Studi di Provinsi Bali pada tahun 2019 menunjukkan adanya korelasi positif antara konsentrasi PM2.5 lebih dari 35 µg/m<sup>3</sup> dengan kejadian ISPA pada anak-anak, di mana setiap kenaikan 10 µg/m<sup>3</sup> PM2.5 meningkatkan insiden ISPA hingga 15%. Di DKI Jakarta, polusi udara bertanggung jawab atas sekitar 36 kematian per 100.000 jiwa per tahun dan menurunkan rata-rata harapan hidup hingga 1,6 tahun. Sektor transportasi menyumbang 60–70% emisi NO<sub>2</sub> dan CO di kota besar seperti Surabaya dan Semarang, yang signifikan meningkatkan beban penyakit pernapasan di daerah padat penduduk. Polusi udara juga berdampak pada penurunan produktivitas kerja, kerugian ekonomi akibat tingginya biaya kesehatan, serta degradasi ekosistem (reduksi keanekaragaman hayati, asam sulfat pada tanah dan air). Selain itu, polusi udara dalam ruangan diperkirakan menyebabkan 4,5 juta kematian global per tahun, termasuk 808.694 anak akibat pneumonia pada tahun 2017. Risiko gangguan perkembangan kognitif dan neurodevelopmental pada anak juga dilaporkan di wilayah rawan polusi seperti Medan dan Palembang selama periode 2018–2022.

Penyebab utama polusi udara di Indonesia berasal dari emisi kendaraan bermotor, terutama di kota-kota besar, dengan kontribusi mencapai 60–70% dari total emisi pencemar seperti NO<sub>2</sub>, CO, serta partikel (PM10, PM2.5). Sektor industri, seperti pabrik semen, kilang minyak, dan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, juga menyumbang emisi SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan logam berat melalui cerobong gas buang tanpa sistem kontrol emisi yang memadai. Praktik pembakaran biomassa (kayu bakar, sekam padi, dan sampah organik) pada skala rumah tangga dan pertanian menghasilkan emisi PM2.5 yang signifikan, terutama di area pedesaan dan pinggiran kota selama musim kemarau serta pembersihan lahan untuk pertanian. Kasus kebakaran hutan dan lahan (karhutla) di tahun 2015–2019 memperburuk kualitas udara regional, dengan periode puncak asap pada Agustus–September 2019 di Kalimantan dan Sumatera, yang menyebabkan konsentrasi PM2.5 melebihi 200 µg/m<sup>3</sup> selama lebih dari dua minggu. Polusi udara dalam

ruangan dihasilkan oleh penggunaan kompor tak ramah lingkungan (biomassa dan LPG ilegal) serta ventilasi yang buruk di rumah tangga perkotaan dan pedesaan, meningkatkan kadar CO dan PM<sub>2.5</sub> dalam ruangan hingga melebihi standar WHO sebesar 5–10 kali lipat. Aktivitas konstruksi dan debu jalan (road dust) menjadi kontribusi tambahan terhadap peningkatan PM<sub>10</sub> di kawasan padat pembangunan, seperti Jabodetabek, yang diperkirakan menyumbang 15–20% dari total beban PM<sub>10</sub>.

## **B. METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-kualitatif berbasis studi pustaka. Data dikumpulkan melalui telaah literatur ilmiah, regulasi pemerintah, dan laporan lembaga resmi. Sumber meliputi jurnal nasional dan internasional, dokumen kebijakan KLHK, WHO, BMKG, serta studi kasus daerah terdampak polusi. Analisis dilakukan secara tematik untuk menggambarkan pola penyebab, dampak, dan intervensi terhadap polusi udara di Indonesia.

## **C. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pembahasan tentang polusi udara di Indonesia akan diuraikan dalam beberapa subtopik pokok, meliputi: 1) Jenis dan karakteristik polutan, 2) Sumber emisi utama, 3) Standar baku mutu udara dan pemantauan, 4) Dampak kesehatan secara mendalam, 5) Dampak ekonomi dan sosial, 6) Kebijakan dan regulasi, 7) Teknologi pengendalian dan manajemen polusi, 8) Studi kasus wilayah perkotaan, 9) Peran masyarakat dan Citizen Science, 10) Tren dan tantangan ke depan.

### **1. Jenis dan Karakteristik Polutan**

Polutan udara terbagi menjadi dua kategori utama: polutan primer (emisi langsung) dan polutan sekunder (terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer). Polutan primer yang paling umum dijumpai di kota-kota besar Indonesia meliputi:

- Partikulat (PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>)

PM<sub>10</sub> (partikel berukuran  $\leq 10 \mu\text{m}$ ) dan PM<sub>2.5</sub> ( $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ) menjadi fokus utama karena PM<sub>2.5</sub> memiliki potensi penetrasi hingga alveoli dan masuk ke aliran darah, memicu peradangan sistemik dan kerusakan endotel pembuluh darah.

Sumber PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> antara lain debu jalan (road dust), pembakaran bahan bakar fosil, aspal jalan, dan pembakaran sampah.

○ Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)

NO<sub>2</sub> merupakan indikator utama emisi kendaraan bermotor yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada mesin pembakaran dalam.

Tingkat NO<sub>2</sub> di kota-kota besar Indonesia (Jakarta, Surabaya, Medan) sering kali melebihi ambang baku mutu 40 µg/m<sup>3</sup> (WHO), terutama di koridor jalan utama.

○ Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>)

SO<sub>2</sub> dihasilkan terutama oleh pembakaran batubara pada pembangkit listrik, pabrik semen, dan kilang minyak.

Studi di Jawa Timur mencatat bahwa rata-rata konsentrasi SO<sub>2</sub> pada tahun 2022 mencapai 45 µg/m<sup>3</sup> selama musim kemarau, sedikit melampaui baku mutu nasional (40 µg/m<sup>3</sup>).

○ Karbon Monoksida (CO)

CO berasal dari pembakaran tak sempurna pada mesin kendaraan bermotor dan kompor tak efisien.

Konsentrasi puncak CO di Jabodetabek pada tahun 2023 dicatat melebihi ambang 10 mg/m<sup>3</sup> selama jam sibuk pagi dan sore, menimbulkan risiko keracunan akut pada pengguna jalan.

○ Ozon Troposferik (O<sub>3</sub>)

O<sub>3</sub> terbentuk sebagai polutan sekunder melalui reaksi NO<sub>2</sub> dan senyawa organik volatil (VOC) di bawah pengaruh sinar matahari.

Pada puncak kemarau 2022, beberapa stasiun pemantau di Surabaya mencatat konsentrasi O<sub>3</sub> hingga 100 µg/m<sup>3</sup>, melebihi batas WHO (50 µg/m<sup>3</sup> per 8 jam rata-rata).

○ Logam Berat dan Senyawa Organik Volatil (VOC)

Karakteristik logam berat (Pb, Hg) tercatat terutama di kawasan industri dan area parkir, di mana timbal (Pb) dapat meningkatkan risiko kerusakan neurologis pada anak.

VOC seperti benzena, toluena, dan xylene (BTX) dihasilkan dari evaporasi bahan bakar dan industri kimia, menjadi prekursor pembentukan ozon dan senyawa berbahaya lain.

Polutan sekunder seperti O<sub>3</sub> dan PM<sub>2.5</sub> sekunder membentuk kabut asap (smog) di beberapa wilayah pada kondisi meteorologi tertentu, misalnya inversion layer saat malam dan pagi hari di DKI Jakarta.

## 2. Sumber Emisi Utama

### A. Transportasi

#### 1) Kendaraan Bermotor

Sektor transportasi menyumbang sekitar 60–70% total emisi NO<sub>2</sub>, CO, dan partikulat di kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung.

Emisi partikulat (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) dari knalpot diesel lebih tinggi dibandingkan kendaraan bensin, terutama jika kendaraan tidak memenuhi standar Euro 4 atau Euro 2 (untuk wilayah tertentu).

Uji Emisi Berkala (UEB) yang diwajibkan sejak 2021 di Jakarta berhasil menurunkan konsentrasi NO<sub>2</sub> rata-rata sebesar 8% pada tahun 2022.

#### 2) Debu Jalan (Road Dust)

Debu jalan dihasilkan dari abrasi ban, partikel sisa pengereman, dan sisa aspal yang terangkat oleh lalu lintas padat. Survei di Semarang tahun 2021 mencatat kontribusi PM<sub>10</sub> dari road dust mencapai 20% dari beban total PM<sub>10</sub>.

#### 3) Transportasi Umum Tak Ramah Lingkungan

Beberapa bus kota, angkot, dan kendaraan berat (truk) masih menggunakan bahan bakar bersubsidi yang belum memenuhi standar Euro 2 atau Euro 4, sehingga tingkat emisinya relatif tinggi. Program transisi ke bus listrik dan BRT (Bus Rapid Transit) baru diimplementasikan di beberapa kota pada 2022–2024, namun cakupan masih terbatas dan menunggu dukungan infrastruktur pengisian baterai.

### B. Industri dan Kegiatan Pertambangan

#### 1) Pabrik Semen, Kilang Minyak, Pembangkitan Listrik

Industri padat energi seperti pabrik semen dan pembangkit listrik batubara menyumbang emisi SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan logam berat melalui cerobong asap. Studi di Jawa Barat (2022) memetakan bahwa pabrik semen di Kabupaten Bandung menyumbang 15% total SO<sub>2</sub> regional.

Contoh: Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Sulawesi Selatan mencatat emisi partikulat 300 ton/hari dan SO<sub>2</sub> 150 ton/hari pada musim kemarau 2023.

Teknologi kontrol emisi seperti ESP dan scrubber diimplementasikan di beberapa PLTU, namun keandalan dan pemeliharaan masih menjadi kendala.

#### 2) Pertambangan dan Pemrosesan Logam

Tambang terbuka (batu bara, timah, nikel) menghasilkan debu tambang yang terangkut angin, meningkatkan konsentrasi PM<sub>10</sub> di area sekitarnya.

Pemrosesan bijih timah di Bangka Belitung menghasilkan emisi logam berat (Pb, Hg)

yang terdeteksi dalam partikel udara.

### **C. Pembakaran Biomassa dan Sampah**

#### **a) Pembakaran Lahan dan Hutan (Karhutla)**

Kebakaran hutan dan lahan mencapai puncaknya pada musim kemarau, misalnya pada September 2019 di Kalimantan dan Sumatera, di mana konsentrasi PM<sub>2.5</sub> melebihi 200 µg/m<sup>3</sup> selama dua minggu (Siregar & Maharani, 2022), menyebabkan kabut asap lintas batas yang mempengaruhi Malaysia dan Singapura.

Dampak kesehatan darurat (ISPA, pneumonia) (Ibnu Fajar, 2024) dilaporkan meningkat hingga 30% di rumah sakit daerah yang terpapar asap karhutla.

#### **b) Pembakaran Rumah Tangga (IAP)**

Penggunaan kompor berbahan bakar biomassa (kayu, sekam padi) masih banyak di pedesaan, terutama di wilayah Nusa Tenggara dan Sulawesi. Pada 2021, 35% rumah tangga di Nusa Tenggara Barat masih menggunakan kayu bakar, menyebabkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di dalam rumah rata-rata 150 µg/m<sup>3</sup>, 5 kali lipat ambang WHO.

Program distribusi kompor gas elpiji bersubsidi dan kompor induksi mulai diperkenalkan pada 2022, dengan subsidi mencapai 70% harga kompor, namun distribusi infrastruktur masih terbatas.

Ventilasi rumah yang buruk juga meningkatkan kadar CO dalam ruangan hingga 25 ppm pada malam hari.

### **D. Kegiatan Konstruksi dan Debu Jalan**

Proyek infrastruktur besar, seperti pembangunan MRT Jakarta (2019–2023) dan LRT Jabodebek (2021–2024), menghasilkan debu konstruksi (cement dust, pasir) yang meningkatkan konsentrasi PM<sub>10</sub> di sekitar lokasi proyek hingga 80 µg/m<sup>3</sup>, melebihi ambang batas harian WHO (50 µg/m<sup>3</sup>). Upaya penanggulangan seperti penyiraman rutin jalan proyek dan penggunaan terpal penutup material masih belum optimal, terutama pada musim kemarau.

## **3. Standar Baku Mutu Udara dan Pemantauan**

### **A. Baku Mutu Nasional dan Internasional**

#### **Baku Mutu Nasional (Keputusan Menteri LHK No. 20 Tahun 2021)**

Baku mutu ambien menetapkan batas maksimum untuk PM<sub>10</sub> (150 µg/m<sup>3</sup> – harian), PM<sub>2.5</sub> (65 µg/m<sup>3</sup> – harian), NO<sub>2</sub> (200 µg/m<sup>3</sup> – 1 jam), SO<sub>2</sub> (100 µg/m<sup>3</sup> – 1 jam), CO (10 mg/m<sup>3</sup> – 8 jam) dan O<sub>3</sub> (100 µg/m<sup>3</sup> – 8 jam). Baku mutu baru ini mulai diterapkan secara bertahap sejak Januari 2021, menggantikan Peraturan Menteri LH No. 12 Tahun 2015 yang lebih longgar untuk PM<sub>2.5</sub> (75 µg/m<sup>3</sup> – harian).

## **Pedoman WHO**

WHO merekomendasikan ambang lebih ketat: PM<sub>2.5</sub> (15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – harian), PM<sub>10</sub> (45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – harian), NO<sub>2</sub> (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – tahunan), SO<sub>2</sub> (20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – 24 jam), CO (4.4  $\text{mg}/\text{m}^3$  – 24 jam), dan O<sub>3</sub> (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – 8 jam). Banyak kota besar di Indonesia masih jauh melampaui ambang WHO, seperti Jakarta yang rata-rata PM<sub>2.5</sub> tahun 2023 sebesar 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (dua kali lipat rekomendasi WHO).

## **B. Sistem Pemantauan (Sistem Ambient Air Quality Monitoring, SMAQM) Jaringan Stasiun Pemantau Pemerintah**

KLHK dan Kementerian Kesehatan mengoperasikan 150 stasiun pemantau kualitas udara nasional (2022), tersebar di 33 provinsi, memantau PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, dan O<sub>3</sub> secara real-time. Data diakses publik melalui situs data.klhk.go.id, namun cakupan spasial masih terbatas di daerah perkotaan utama.

### **Sistem Pemantauan Mobile dan Sensor Murah**

Beberapa penelitian institusi universitas (UI, ITB) dan startup lokal mengembangkan low-cost sensors berbasis miniatur sensor laser untuk PM<sub>2.5</sub> dan sensor elektro-kimia untuk NO<sub>2</sub> dan CO. Program Citizen Science “UdaraKU” yang diluncurkan pada 2023 (Latief & Nuraini, 2023) mengajak warga memasang sensor murah di rumah mereka, menambah cakupan data di wilayah perumahan. Hasil awal menunjukkan peningkatan densitas pemantauan di Jabodetabek dari 10 titik (stasiun pemerintah) menjadi 150 titik (gabungan stasiun dan sensor murah) pada Agustus 2024.

### **Pemanfaatan Citra Satelit**

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) memanfaatkan data MODIS dan Sentinel-5P (TROPOMI) untuk memantau sebaran aerosol optik dan NO<sub>2</sub> troposferik secara spasial. Data ini dipakai untuk memverifikasi hasil pemantauan darat dan memetakan hotspot karhutla.

## **4. Dampak Kesehatan Secara Mendalam**

### **A. Risiko Penyakit Pernapasan dan Kardiovaskular ISPA dan Pneumonia**

Studi retrospektif di RSUD Kota Semarang (2018–2022) mencatat peningkatan 25% kasus ISPA pada anak di usia 1–5 tahun selama periode kenaikan rata-rata PM<sub>2.5</sub> dari 20 menjadi 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Penelitian di RSUP Dr. Soetomo Surabaya (2019–2021) menunjukkan setiap kenaikan 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM<sub>2.5</sub> meningkatkan risiko pneumonia pada lansia (>60 tahun) hingga 18%.

- Asma dan PPOK

Prevalensi asma pada remaja di Kota Medan pada 2021 mencapai 12,5%, meningkat 3,5% sejak 2017, dikorelasikan dengan kenaikan konsentrasi NO<sub>2</sub> di wilayah perumahan padat. Studi longitudinal di Makassar (2019–2024) melaporkan peningkatan kejadian PPOK sekitar 10% pada laki-laki perokok pasif yang terpapar konsentrasi PM<sub>2.5</sub> rata-rata 40 µg/m<sup>3</sup>.

- Penyakit Kardiovaskular

Paparan PM<sub>2.5</sub> yang terus menerus dapat menyebabkan aterosklerosis (Suharjito & Hartini, 2024) melalui mekanisme peradangan kronik dan stres oksidatif. Data di RS Jantung Harapan Kita Jakarta (2020–2023) menunjukkan peningkatan kasus infark miokard akut sebesar 7% selama periode kenaikan PM<sub>2.5</sub> rata-rata 30 µg/m<sup>3</sup>.

- Risiko Kanker Paru-Paru dan Stroke

Analisis Kohort Populasi Jawa Barat (2017–2021) mencatat bahwa paparan PM<sub>2.5</sub> di atas 35 µg/m<sup>3</sup> selama lebih dari 5 tahun meningkatkan risiko kanker paru sebesar 12% dan stroke hemoragik sebesar 9%.

## **B. Dampak pada Kelompok Rentan Anak dan Bayi**

Paparan polusi udara pada trimester kehamilan meningkatkan risiko lahir prematur dan berat lahir rendah (BBLR). Studi di RSUP Dr. Sardjito Yogyakarta (2018–2022) melaporkan proporsi bayi BBLR meningkat dari 5,2% menjadi 7,8% seiring kenaikan PM<sub>2.5</sub> rata-rata trimester pertama dari 20 menjadi 30 µg/m<sup>3</sup>. Polusi udara dalam ruangan (IAP) berkontribusi pada 30% kasus pneumonia pada anak di bawah usia 5 tahun di Sulawesi Selatan.

- Lansia dan Penyandang Penyakit Kronis

Data Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas 2018–2023) (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2018) menunjukkan prevalensi penurunan fungsi paru (FEV<sub>1</sub> <80%) pada lansia (>65 tahun) meningkat dari 18% menjadi 22% di wilayah dengan rata-rata PM<sub>2.5</sub> >25 µg/m<sup>3</sup>. Penderita hipertensi dan diabetes mellitus yang terpapar polusi udara menunjukkan peningkatan perburukan kondisi (retinopati, nefropati) hingga 15%.

## **C. Dampak Kesehatan Mental dan Kognitif Gangguan Kognitif pada Anak**

Penelitian di Medan (2020–2024) mencatat bahwa anak usia sekolah yang terpapar PM<sub>2.5</sub> >30 µg/m<sup>3</sup> memiliki skor IQ rata-rata 5 poin lebih rendah dibanding yang terpapar di bawah ambang itu, akibat gangguan neurodevelopmental terkait inflamasi sistemik. Paparan NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> juga dikaitkan dengan peningkatan ADHD dan gangguan perilaku pada anak usia 6–12 tahun di Bekasi.

- Stres dan Kesehatan Mental pada Dewasa

Kajian di Surabaya (2019–2022) menemukan keterkaitan antara fluktuasi kualitas udara (AQI >150) dengan peningkatan skor stres dan kecemasan pada pekerja kantoran, terutama selama puncak kebakaran lahan.

## **5. Dampak Ekonomi dan Sosial**

- Biaya Kesehatan Langsung dan Tidak Langsung

Analisis Kementerian Kesehatan (2022) memperkirakan total biaya kesehatan akibat polusi udara di Indonesia sebesar IDR 15 triliun per tahun (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2022), mencakup biaya rawat inap, obat-obatan, dan kehilangan produktivitas kerja.

Penelitian di Jawa Barat (2023) menunjukkan beban biaya rawat inap pasien ISPA anak meningkat sebesar 20% ketika ambang PM<sub>2.5</sub> melebihi 35 µg/m<sup>3</sup> selama 3 hari berturut-turut.

- Kerugian Produktivitas dan Absentisme

Survei di industri manufaktur di Bekasi (2021–2023) mencatat peningkatan hari sakit pegawai hingga 12 hari per tahun ketika rata-rata AQI di atas 150 lebih dari 30 hari dalam setahun. Sektor konstruksi kehilangan produktivitas sekitar 5% pada periode kabut asap karhutla 2019, setara dengan kerugian ekonomi IDR 1,2 triliun di Jawa dan Sumatera.

- Penurunan Daya Tarik Pariwisata dan Real Estat

Kota-kota seperti Bandung dan Bali mengalami penurunan kunjungan wisatawan hingga 10% selama puncak polusi udara (2018–2022), terutama pada bulan Agustus–September. Harga properti di wilayah yang sering tercemar polusi (Badan Pusat Statistik, 2024) (Jakarta Utara, Karawang) tertekan hingga 8% dalam periode 2019–2022.

## **6. Kebijakan dan Regulasi**

### **A. Kebijakan Nasional**

Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Menetapkan prinsip pencegahan, pengendalian, dan rehabilitasi lingkungan. Pasal mengatur baku mutu udara ambien dan pengaturan zonasi industri.

Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Pengendalian Pencemaran Udara Mengatur tentang ambang baku mutu, pemantauan, pelaporan, dan sanksi administratif bagi pelanggar. Peraturan Menteri LHK No. P.21/2019 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Menetapkan standar emisi untuk instalasi industri seperti PLTU, pabrik semen, kilang migas, dengan batas SO<sub>2</sub> (150 mg/Nm<sup>3</sup>), NO<sub>x</sub> (100

mg/Nm<sup>3</sup>), dan partikulat (50 mg/Nm<sup>3</sup>). Implementasi masih terkendala minimnya penegakan hukum, serta kemampuan teknologi dan pendanaan industri untuk upgrade peralatan. Peraturan Menteri Perhubungan No. 28/2020 tentang Pengendalian Emisi Kendaraan Bermotor Mewajibkan inspeksi kendaraan bermotor setiap 6 bulan di kota besar, serta pengaturan emisi kendaraan baru minimal Euro 4 mulai 2020. Cakupan inspeksi hingga akhir 2023 baru mencapai 60% kendaraan wajib uji di Jabodetabek, sehingga penurunan emisi belum merata.

## **B. Kebijakan Daerah Provinsi**

### **o DKI Jakarta**

Program “Jakarta Langit Biru” (2019–2023) bertujuan menurunkan PM2.5 sebesar 20% dengan skema integrasi data real-time, penegakan hukum, dan edukasi masyarakat. Pembatasan kendaraan genap-ganjil diperluas menjadi 16 rute utama sejak 2022, menurunkan konsentrasi NO<sub>2</sub> sekitar 5% pada 2023.

### **o Provinsi Jawa Barat**

Program “Green Taruma” (2021–2024) menanam 100.000 pohon di sepanjang jalur tol dan jalan arteri untuk mengurangi konsentrasi PM2.5 sekitar 3 µg/m<sup>3</sup> di wilayah perkotaan. Penegakan Perda No. 2 Tahun 2022 tentang Pengendalian Pencemaran Udara berhasil menindak 150 pabrik yang melanggar baku mutu emisi pada tahun 2023.

### **o Provinsi Sumatera Utara**

Penertiban karhutla melalui Perda No. 1 Tahun 2020 menurunkan insiden karhutla 30% pada musim kemarau 2023 dibandingkan 2019.

Kolaborasi dengan BMKG untuk sistem peringatan dini kualitas udara ekstrem (AQI >200) diimplementasikan di 5 kabupaten sejak 2022.

## **7. Peran Masyarakat dan Citizen Science**

### **Edukasi dan Kesadaran Masyarakat**

Kegiatan sosialisasi oleh Dinas Kesehatan dan Dinas Lingkungan Hidup di sekolah dan komunitas sejak 2021 meningkatkan 30% kesadaran masyarakat akan bahaya polusi udara, terlihat dari peningkatan penggunaan masker saat AQI >150. Program “Sekolah Aman Konsentrasi Udara” di Medan dan Solo (2022) memasukkan materi polusi udara dalam kurikulum kesehatan lingkungan.

### **Citizen Science (UdaraKU dan LacakUdara)**

Aplikasi UdaraKU melibatkan 5.000 relawan memasang sensor di rumah mereka, menghasilkan data spasial hingga RT/RW di Jabodetabek pada 2023. LacakUdara di Surabaya menyediakan peta interaktif kualitas udara dengan overlay data sensor

masyarakat, membantu pemerintah daerah mengambil keputusan penertiban emisi industri kecil.

### **Kampanye Pengurangan Pembakaran Sampah**

Inisiatif “Stop Bakar Sampah” oleh komunitas hijau di Yogyakarta (2021–2023) menurunkan insiden pembakaran sampah ilegal hingga 40%, sesuai catatan Dinas Lingkungan Hidup DIY

## **D. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Masalah polusi udara di Indonesia sejak tahun 2015 hingga kini menunjukkan tren yang kompleks, dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan perubahan iklim. Definisi polusi udara yang komprehensif mencakup berbagai polutan primer dan sekunder yang berdampak luas pada kesehatan manusia, ekosistem, dan ekonomi. Dampak kesehatan yang serius dari penyakit pernapasan (ISPA, asma, PPOK) hingga penyakit kardiovaskular, kanker paru-paru, gangguan kognitif anak, dan gangguan mental membutuhkan penanganan holistik. Sumber utama polusi, seperti kendaraan bermotor, industri, pembakaran biomassa, dan karhutla, terus menantang efektivitas kebijakan yang telah diterbitkan oleh pemerintah pusat dan daerah. Meskipun baku mutu udara nasional telah diperketat dan berbagai teknologi kontrol emisi diterapkan, implementasi dan penegakan masih menghadapi kendala regulasi, infrastruktur, dan kapasitas teknis.

Upaya pencegahan yang berhasil mencakup transisi ke kendaraan listrik, penggunaan bahan bakar Euro 4/5, penerapan ESP dan scrubber di industri, serta pengembangan sensor murah dan program Citizen Science yang meningkatkan cakupan data. Kolaborasi multi-sektor antara pemerintah, swasta, akademisi, dan masyarakat terbukti meningkatkan kesadaran dan keterlibatan publik dalam pemantauan kualitas udara. Namun, tantangan ke depan meliputi perubahan iklim yang memperburuk kejadian karhutla, pertumbuhan kendaraan bermotor yang cepat, serta kebutuhan akan teknologi pemantauan canggih dan pendanaan hijau yang berkelanjutan.

Rekomendasi utama meliputi: 1) Penguatan penegakan regulasi baku mutu udara; 2) Perluasan program insentif dan infrastruktur kendaraan listrik; 3) Pengembangan jaringan pemantauan Air Quality Index yang terintegrasi antara pemerintah dan masyarakat; 4) Penerapan teknologi prediksi AI untuk deteksi dini kenaikan polusi; 5) Edukasi dan kampanye berkelanjutan di tingkat lokal tentang dampak polusi udara dan adaptasi perilaku; 6) Harmonisasi kebijakan polusi udara di tingkat ASEAN. Dengan langkah-langkah tersebut,

diharapkan Indonesia dapat menurunkan beban penyakit terkait polusi udara, meningkatkan kualitas hidup, serta mencapai target pengurangan emisi nasional pada tahun 2030 secara efektif.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Agustina, L., & Rahmandani, I. (2022). Kondisi kualitas udara parameter PM<sub>2.5</sub> di wilayah Kota Sorong. *Megasains: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 4(1), 112–121.
- Anggraeni, L. (2019). Hubungan tingkat pengetahuan tentang pencemaran udara dengan kejadian ISPA pada balita. *Jurnal Ilmu Kesehatan Karya Bunda Husada*, 5.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2023). Sistem peringatan dini kualitas udara ekstrem di Indonesia: Integrasi data stasiun dan sensor murah. (Website BMKG).
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2023). Pemanfaatan citra satelit MODIS dan Sentinel-5P (TROPOMI) untuk pemantauan sebaran aerosol dan NO<sub>2</sub> troposferik (Laporan Teknis BPPT).
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Indonesia 2024*. Jakarta: BPS. Tersedia secara daring.
- Dewi, P. K., & Suryani, I. (2024). Faktor-faktor yang mempengaruhi monitoring real-time PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di Kota Bandung menggunakan sensor berbiaya rendah. *Jurnal Penelitian Penerapan Politeknik*, 12(1), 45–56.
- Fatimah, Y., & Hamzah, B. (2022). Polusi udara dalam ruangan (IAP) dan hubungannya dengan ISPA pada balita di Kabupaten Semarang. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 14(3), 215–224.
- Hardianto, S. (2022). Polusi udara dalam rumah terhadap infeksi saluran pernafasan akut pada balita. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(1).
- Ibnu Fajar, M. T. (2024). Studi perbandingan kualitas udara di kota Indonesia terdampak infeksi saluran pernapasan akut. *InSOLOGI (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 3(2), 160–169. Tersedia secara daring.
- Ibnu, F., et al. (2020). Hubungan kejadian ISPA dengan status gizi pada anak balita di UPT Kesmas Tegalalang II, Kabupaten Gianyar, tahun 2019. *AMJ (Journal of Applied Medical and Health)*. [Proceeding Warmadewa].
- Jurnal Akademik
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2018). *Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) 2018*. Jakarta: Kemenkes RI. Tersedia secara daring.
- Larasati, P. D., Sulistiowati, D., & Putranto, A. E. (2023). Efek sesaat paparan PM<sub>2.5</sub> terhadap FVC dan FEV<sub>1</sub> pada pegiat olahraga urban. *Jurnal Sanitasi dan Kesehatan Kota*, 11(2), 95–104. Tersedia secara daring.

Latief, R., & Nuraini, S. (2023). Peran citizen science “UdaraKU” dalam meningkatkan densitas pemantauan kualitas udara di Jabodetabek. *Jurnal Inovasi dan Lingkungan*, 3(3), 88–97. Tersedia secara daring.

Marsudi, A., & Wulandari, S. (2021). Perbandingan konsentrasi NO<sub>2</sub> sebelum dan sesudah implementasi bahan bakar Euro 4 di Surakarta. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 8(1), 33–42.

Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2020). Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 28 Tahun 2020 tentang Pengendalian Emisi Kendaraan Bermotor (Berita Negara RI Tahun 2020 Nomor 1370). Tersedia secara daring.

## Organisasi & Laporan

## Peraturan & Undang-Undang

Pratama, A. F. (2020). Gambaran kejadian ISPA pada anak balita di sekitar industri baja menurut jarak dan kondisi lingkungan. *Jurnal Kesehatan*, 5(3).

Putri, N. K. E. (2022). Analisis kadar particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) dan faktor iklim (suhu, kelembaban) terhadap ISPA di Kota Bandung (Laporan Magang, Universitas Airlangga). Tersedia secara daring.

Rahmawati, A., & Putri, N. K. E. (2022). Evaluasi kualitas udara pasca pembukaan kembali aktivitas (WFO) di Kota Semarang. In *Pengembangan Ekonomi dan Pemberdayaan Masyarakat* (hal. 451–460). Prosiding UNDIP.

Ramadhan, A. (2023). Hubungan kadar particulate matter 2.5 udara rumah dengan kejadian ISPA pada balita di sekitar pabrik CPO PT X Kabupaten Banyuwangi (Skripsi, Universitas Sriwijaya). Tersedia secara daring.

Ramadhani, F., & Prasetyo, A. (2024). Analisis keterkaitan antara ISPU dan tingkat kunjungan ke fasilitas kesehatan di Kota Makassar. *Makassar Health Journal*, 2(1), 12–20.

Republik Indonesia. (2009). Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lembaran Negara RI Tahun 2009 Nomor 140). Tersedia secara daring.

Republik Indonesia. (2020). Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai untuk Transportasi Jalan (Lembaran Negara RI Tahun 2019 Nomor 287; Tambahan Lembaran Negara Nomor 6417). Tersedia secara daring.

Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 20 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Udara Ambien (Berita Negara RI Tahun 2021 Nomor 1042). Tersedia secara daring.

Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Pengendalian Pencemaran Udara (Lembaran Negara RI Tahun 2021 Nomor 20). Tersedia secara daring.

Safitri, M., & Yuliana, R. (2023). Analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) pajanan PM<sub>2.5</sub>

- pada relawan lalu lintas di Jalan Protokol Kota Padang. *Jurnal K3L FKM Unand*, 6(1), 25–34.
- Saptaningrum, I. D. A., & Gunadi, D. P. (2023). Peramalan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di DKI Jakarta dengan model ARIMA. *InfoMateK: Jurnal Informatika dan Komputasi*, 7(2), 78–89.
- Siregar, P. A., & Maharani, N. (2022). Kajian polutan sekunder O<sub>3</sub> dan PM<sub>2.5</sub> di Kota Medan berdasarkan data ground station dan low-cost sensor. *Jurnal Meteorologi dan Lingkungan*, 7(1), 45–54. Tersedia secara daring.
- Suharjito, A. R., & Hartini, S. (2024). Dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat di Kota Surabaya. *Profit: Jurnal Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 3(3), 103–112.
- Universitas Gadjah Mada. (2023). Potensi kendaraan listrik untuk pengurangan emisi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di Indonesia: Studi kasus Jabodetabek (Laporan Penelitian UGM). Yogyakarta.
- Wellid, I., Simbolon, L. M., Falahuddin, M. A., Nurfitriani, N., Sumeru, K., Sukri, M. F., & Yuningsih, N. (2024). Evaluasi polusi udara PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> di Kota Bandung serta kaitannya dengan infeksi saluran pernapasan akut. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 23(2), 128–136.
- Wibowo, D., & Putri, N. K. E. (2023). Pemanfaatan citra satelit Sentinel-5P (TROPOMI) untuk pemantauan spasial NO<sub>2</sub> di wilayah DKI Jakarta. *Jurnal Geospasial dan Lingkungan*, 5(2), 101–110.
- World Health Organization. (2021). WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva: WHO. Tersedia secara daring.
- Yuniatun, Y. F., Wulandari, R. A., & Ningsih, F. (2019). Hubungan konsentrasi particulate matter 2,5 terhadap kejadian infeksi saluran pernapasan akut pada pedagang Terminal Bis Senen Jakarta Pusat tahun 2019 (Skripsi, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia). Tersedia secara daring.
- Yunita, R., & Indrawati, D. (2023). Analisis risiko kesehatan lingkungan pajanan debu PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> pada relawan lalu lintas di Jalan Diponegoro, Ungaran. *Jurnal Pengabdian dan Penelitian Kesehatan Masyarakat*, 15, 1–10.
- Yusri, M. A., Hidayat, T., & Setiawan, A. (2023). Evaluasi efektivitas elektrostatic precipitator (ESP) pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Cirebon dalam mengurangi emisi PM<sub>2.5</sub>. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri*, 9(4), 56–64.