Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi
Volume 26, Issue 01, Februari 2026, 221-226
Webite: https://ji.unbari.ac.id, E-Mail: jiubj.unbari@gmail.com
e-ISSN: 2549-4236 (Online), p-ISSN: 1411-8939 (Print), DOI: 10.33087/jiubj.v26i1.6429

Analisis Kualitas Udara Ambien Menggunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan Korelasinya terhadap Kesehatan Manusia di Area Pertambangan Timah Kabupaten Bangka

Robekca Purba[1]*, Susi Susanti[2]
[1]Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
[2]Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
*Correspondence: robekcapurba2@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK
Penelitian ini bertujuan mengetahui kualitas udara ambien menggunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan korelasinya terhadap kesehatan manusia. Pengambilan sampel dilakukan pada 11 lokasi area pertambangan Bangka periode 10-12 Mei 2023, mengukur PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO, O_3, dan NO_2 sesuai SNI oleh LJPKS IPB. Perhitungan ISPU menggunakan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 dengan interpolasi linear. Hasil menunjukkan PM_{10} (35.4±7.0 µg/m³), $PM_{2.5}$ (16.4±3.2 µg/m³), SO_2 (21.2±5.8 µg/m³), NO_2 (33.8±10.3 µg/m³), CO (<1145 µg/m³), dan O_3 (<23 µg/m³). Nilai ISPU berkisar 35.3-73.6 dengan 7 lokasi (63.6%) kategori BAIK dan 4 lokasi (36.4%) kategori SEDANG. $PM_{2.5}$ merupakan polutan dominan di semua lokasi. Seluruh parameter memenuhi baku mutu nasional (compliance 100%). Berdasarkan literatur, konsentrasi $PM_{2.5}$ 16.4 µg/m³ berpotensi meningkatkan risiko mortalitas kardiovaskular minimal (RR ~1.16), dengan dampak lebih signifikan pada kelompok sensitif (penderita ISPA, asma, lansia, anak-anak) di lokasi kategori SEDANG. Penelitian menyimpulkan kualitas udara dalam kondisi baik-sedang dengan risiko kesehatan minimal, namun memerlukan monitoring berkelanjutan dan program pengendalian emisi untuk mencapai standar WHO ($PM_{2.5}$ <15 µg/m³).

Kata kunci: ISPU, kualitas udara, pertambangan timah, $PM_{2.5}$, dampak kesehatan

ABSTRACT
This study aims to determine ambient air quality using the Air Pollution Standard Index (ISPU) and its correlation with human health. Sampling was conducted at 11 locations in PT Timah Tbk mining areas from May 10-12, 2023, measuring PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO, O_3, and NO_2 according to SNI standards by IPB LJPKS. ISPU calculation used Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 with linear interpolation. Results showed PM_{10} (35.4±7.0 µg/m³), $PM_{2.5}$ (16.4±3.2 µg/m³), SO_2 (21.2±5.8 µg/m³), NO_2 (33.8±10.3 µg/m³), CO (<1145 µg/m³), and O_3 (<23 µg/m³). ISPU values ranged from 35.3-73.6 with 7 locations (63.6%) categorized as GOOD and 4 locations (36.4%) as MODERATE. $PM_{2.5}$ was the dominant pollutant at all locations. All parameters met national quality standards (100% compliance). Based on literature, $PM_{2.5}$ concentration of 16.4 µg/m³ potentially increases minimal cardiovascular mortality risk (RR ~1.16), with more significant impacts on sensitive groups (ISPA patients, asthma, elderly, children) at MODERATE category locations. The study concludes that air quality is in good-moderate condition with minimal health risks, but requires continuous monitoring and emission control programs to achieve WHO standards ($PM_{2.5}$ <15 µg/m³).

Keywords: *ISPU, air quality, tin mining, $PM_{2.5}$, health impacts*

PENDAHULUAN

Kualitas udara ambien merupakan indikator penting kesehatan lingkungan yang berdampak langsung terhadap kesehatan masyarakat. Polusi udara menyebabkan 8.8 juta kematian per tahun secara global, dengan tingkat kematian tertinggi disebabkan penyakit kardiovaskular (Lelieveld et al, 2020). Di Indonesia, polusi udara ambien menyebabkan setidaknya 106.710 kematian dan kerugian ekonomi mencapai 41,4 juta USD (World Bank, 2022). Polusi udara ambien banyak disebabkan oleh emisi yang berasal dari kendaraan bermotor, aktivitas industri, aktivitas manusia (Manisalidis et al, 2020). Aktivitas industri yang banyak menyebabkan polusi udara ambien, salah satunya adalah pertambangan. Khususnya melalui aktivitas transportasi material, blasting, dan resuspensi debu (Kasongo et al, 2024; Dehkordi et al 2024).

Di Kabupaten Bangka, sektor ini menjadi tulang punggung ekonomi daerah, dengan pertambangan timah sebagai kegiatan utamanya. Namun, aktivitas tersebut berpotensi menghasilkan berbagai emisi polutan, termasuk partikulat (PM_{10} dan $PM_{2.5}$) serta gas pencemar seperti SO_2, CO, O_3, dan NO_2,. Di antara polutan tersebut, $PM_{2.5}$ menimbulkan dampak kesehatan paling signifikan, karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkannya menembus hingga alveoli paru-paru dan masuk ke sirkulasi sistemik, sehingga memicu inflamasi sistemik, stres oksidatif, dan disfungsi endotel vaskular (Krittanawong et al, 2023; Xie et al, 2021).

Kualitas udara ambien di Indonesia telah diatur menggunakan PPRI nomor 22 tahun 2021 yang tertera pada lampiran VII, sedangkan penilaian kualitas udara di Indonesia menggunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) disesuaikan dengan Peraturan Menteri

Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020. ISPU merupakan angka yang menggambarkan kondisi kualitas udara berdasarkan dampak kesehatan, dengan kategori: baik (0-50), sedang (51-100), tidak sehat (101-200), sangat tidak sehat (201-300), dan berbahaya (>300). Saat ini, penelitian tentang korelasi ISPU dengan dampak kesehatan di area pertambangan, khususnya pertambangan timah di kawasan Bangka masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan mengetahui kualitas udara ambien pada 11 lokasi di kawasan pertambangan timah Bangka Utara menggunakan perhitungan ISPU untuk 6 parameter (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO, O_3, NO_2) dan menganalisis korelasinya terhadap kesehatan manusia berdasarkan literatur ilmiah yang berkualitas. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar pengembangan program pengendalian emisi dan perlindungan kesehatan masyarakat di area pertambangan.

METODE

Penelitian dilakukan di area pertambangan timah timah Bangka Utara pada 10-12 Mei 2023. Pengambilan sampel udara ambien dilakukan di 11 lokasi yang mewakili berbagai zona, yaitu: Wasprod Bangka Barat, Kantor UPLB Belinyu, TK 1.766 Air Jangkang, TK 1.829 Air Jangkang, TK 1.846 Air Jangkang, TK 2.358 Bukit Jangkang, TK 2.615 TR Tempilang, TK 3.386 Air Selimta, 4.488 Air Lelai, TP 2.6 Gemuruh, dan TR Jebus. Setiap lokasi didokumentasikan koordinat geografisnya menggunakan GPS.

Pengukuran dilakukan oleh Laboratorium Jasa Pengujian Kesehatan dan Pengelolaan Sertifikasi (LJPKS) IPB yang telah terakreditasi KAN. Parameter yang diukur meliputi: (1) PM_{10} dan $PM_{2.5}$ menggunakan metode lasser particle counter yang diukur selama 24 jam; (2) SO_2 dengan metode pararosanilin spektrofotometri SNI 19-7119.7-2017 yang diukur selama 1 jam; (3) NO_2 dengan metode Griess Saltzman spektrofotometri SNI 19-7119.2-2017 yang diukur selama 1 jam; (4) CO dengan metode NIOSH 6604 yang diukur selama 1 jam dan (5) O_3 dengan metode NKBI Spectrometri SNI 19-7119.8-2017 yang diukur selama 1 jam. Semua pengukuran dilakukan sesuai prosedur quality assurance/quality control (QA/QC) laboratorium.

ISPU dihitung menggunakan interpolasi linear yang telah dicantumkan pada peraturan menteri lingkungan hidup dan kehutanan nomor 14 tahun 2020. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

$$I = \frac{\text{Ba ISPU} - \text{Bb ISPU}}{\text{Ka} - \text{Kb}} \text{ x } (\text{XA} - \text{Xb}) + 1\text{b}$$

Keterangan: I: ISPU yang dihitung; Ba ISPU dan Bb ISPU: nilai ISPU batas atas dan bawah; Ka dan Kb: konsentrasi ambien batas atas dan bawah; XA: hasil pengukuran konsentrasi udara ambien.

Nilai ISPU dari seluruh parameter yang diukur digunakan sebagai ISPU lokasi. Data konsentrasi polutan dianalisis secara deskriptif (rata-rata, standar deviasi, minimum, maksimum) dan dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional sesuai PPRI Nomor 22 Tahun 2021.

HASIL

Konsentrasi Polutan Udara Ambien

Hasil pengukuran konsentrasi polutan udara ambien di 11 lokasi area pertambangan timah disajikan pada Tabel 1. Konsentrasi PM_{10} berkisar antara 23.9 hingga 50.0 µg/m³ dengan rata-rata 35.4 µg/m³ dengan standar deviasi ± 7.0 µg/m³. Nilai tertinggi tercatat di lokasi TR Jebus dengan hasil 50.0 µg/m³ yang merupakan area aktivitas transportasi material intensif dengan titik koordinat 1°58'06.03"S 105°08'10.34"E. Konsentrasi $PM_{2.5}$ berkisar antara 11.1 µg/m³ hingga 23.2 µg/m³ dengan rata-rata 16.4 dan standar deviasi 3.2 .Hasil tertinggi $PM_{2.5}$ juga diperoleh di lokasi TR Jebus. Rasio perbandingan $PM_{2.5}$ terhadap PM_{10} rata-rata adalah sebesar 0.46, menunjukkan kontribusi partikel halus yang signifikan terhadap total partikulat.

Konsentrasi gas pencemar menunjukkan nilai yang relatif rendah. SO_2 berkisar 13.4 µg/m³ hingga 34.1 µg/m³ dengan rata-rata 21.2 dan standar deviasi 5.8. Diketahui bahwa nilai tertinggi SO_2 berada di lokasi TK 2.615 TR Tempilang dengan titik koordinat 2°5'43.91" S 105°39'17.06"E. Kadar NO_2 berkisar 23.3 µg/m³ hingga 56.4 µg/m³ dengan rata-rata 33.8 dan standar deviasi 10.3, juga tertinggi di TR Tempilang. CO dan O_3 terdeteksi di bawah limit deteksi (<1145 µg/m³ dan <23 µg/m³), mengindikasikan konsentrasi yang sangat rendah, dengan standar CO berada di angka 10.000 µg/m³ dan O_3 150 µg/m³.

Tabel 1
Konsentrasi Polutan Udara Ambien di Area Pertambangan Timah

Lokasi	PM_{10} (µg/m³)	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)	CO (µg/m³)	O_3 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)
Wasprod Bangka Barat	36.4	16.9	26.5	<1145	<23	41.3
Kantor UPLB (Belinyu)	31.3	14.5	18.6	<1145	<23	33.3
TK 1.766 Air Jangkang	35.4	16.4	19.3	<1145	<23	28.5
TK 1.829 Air Jangkang	41.9	19.4	21.8	<1145	<23	31.2
TK 1.846 Air Jangkang	30.0	13.9	13.4	<1145	<23	28.5
TK 2.358 Bukit Jangkang	38.5	17.8	22.6	<1145	<23	31.2
TK 2.615 TR Tempilang	39.2	18.2	34.1	<1145	<23	56.4
TK 3.386 Air Selimta	23.9	11.1	17.4	<1145	<23	23.3
4.488 Air Lelai	30.8	14.3	21.4	<1145	<23	32.8

Tabel 1
Konsentrasi Polutan Udara Ambien di Area Pertambangan Timah (lanjutan)

Lokasi	PM_{10} (µg/m³)	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)	CO (µg/m³)	O_3 (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)
TP 2.6 Gemuruh	32.3	15.0	21.3	<1145	<23	34.8
TR Jebus	50.0	23.2	16.4	<1145	<23	30.4
Rata-rata ± SD	35.4±7.0	16.4±3.2	21.2±5.8	<1145	<23	33.8±10.3

Sumber: data olahan

Perbandingan dengan baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 menunjukkan seluruh parameter masih berada di bawah nilai baku mutu. PM_{10} tertinggi (50.0 µg/m³) hanya mencapai 66,67% dari baku mutu (75 µg/m³). $PM_{2.5}$ tertinggi (23.2 µg/m³) hanya 42.2% dari baku mutu (55 µg/m³). SO_2 tertinggi (34.1 µg/m³) mencapai 22,7% dari baku mutu (150 µg/m³). NO_2 tertinggi (56.4 µg/m³) mencapai 28.2% dari baku mutu (200 µg/m³). Namun, dibandingkan dengan WHO Air Quality Guidelines 2021 yang merekomendasikan $PM_{2.5}$ 24 jam sebesar 15 µg/m³, rata-rata konsentrasi penelitian (16.4 µg/m³) sedikit melebihi standar WHO, mengindikasikan perlunya upaya penurunan emisi lebih lanjut.

Nilai ISPU dan Distribusi Kategori

Hasil perhitungan ISPU untuk setiap parameter polutan disajikan pada Tabel 2. Nilai ISPU maksimum berkisar antara 35.3 hingga 73.6 dengan rata-rata 52.2 dengan standar deviasi 10.3. Distribusi kategori ISPU menunjukkan 7 lokasi (63.6%) berada dalam kategori baik (ISPU 0-50) dan 4 lokasi (36.4%) dalam kategori sedang (ISPU 51-100). Tidak ada lokasi yang termasuk kategori tidak sehat atau lebih buruk, menunjukkan kondisi kualitas udara yang masih terkontrol dengan baik.

Tabel 2
Nilai ISPU dan Kategori Kualitas Udara

Lokasi	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	O_3	NO_2	ISPU	Kategori
Wasprod Bangka Barat	36.4	53.7	14.7	<14.3	< 9.6	20.6	53.7	Sedang
Kantor UPLB (Belinyu)	31.3	46.0	10.3	<14.3	< 9.6	16.6	46.0	Baik
TK 1.766 Air Jangkang	35.4	52.1	10.7	<14.3	< 9.6	14.2	52.1	Sedang
TK 1.829 Air Jangkang	41.9	61.6	12.1	<14.3	< 9.6	15.6	61.6	Sedang
TK 1.846 Air Jangkang	30.0	44.1	7.4	<14.3	< 9.6	14.2	44.1	Baik
TK 2.358 Bukit Jangkang	38.5	56.5	12.5	<14.3	< 9.6	15.6	56.5	Sedang
TK 2.615 TR Tempilang	39.2	57.8	18.9	<14.3	< 9.6	28.2	57.8	Sedang
TK 3.386 Air Selimta	23.9	35.3	9.6	<14.3	< 9.6	11.6	35.3	Baik
4.488 Air Lelai	30.8	45.4	11.9	<14.3	< 9.6	16.4	45.4	Baik
TP 2.6 Gemuruh	32.3	47.6	11.8	<14.3	< 9.6	17.4	47.6	Baik
TR Jebus	50.0	73.6	9.1	<14.3	< 9.6	16.1	73.6	Sedang
Rata-rata ± SD	35.4±7.0	52.2±10.3	11.9±3.2		< 9.6	16.9±4.4	52.2±10.3	-

Sumber: data olahan

$PM_{2.5}$ merupakan polutan dominan (McDuffie dkk., 2021; Sang dkk., 2022; Rahman dkk., 2020). $PM_{2.5}$ merupakan parameter yang menentukan nilai ISPU yang paling menentukan di seluruh 11 lokasi. Nilai ISPU $PM_{2.5}$ berkisar 35.3-73.6 dengan rata-rata 52.2 dan standar deviasi 10.3, menunjukkan kontribusi partikel halus sebagai pencemar utama di area pertambangan. Hal ini konsisten dengan karakteristik aktivitas pertambangan yang menghasilkan emisi partikulat dari proses penambangan, pengangkutan material, dan operasi alat berat (García et al, 2022). Parameter gas pencemar (SO_2, NO_2, CO, O_3) menunjukkan nilai ISPU yang sangat rendah , semua berada dibawah 50 µg/m³, mengindikasikan emisi gas minimal dari aktivitas pertambangan. Lokasi dengan ISPU tertinggi (TR Jebus: 73.6) dan terendah (TK 3.386 Air Selimta: 35.3) menunjukkan variasi spasial yang terkait dengan intensitas aktivitas operasional di masing-masing area.

Korelasi ISPU terhadap Kesehatan Manusia

Berdasarkan kategori ISPU PP No. 22 Tahun 2021, lokasi dengan kategori baik (63.6%) tidak menimbulkan dampak kesehatan signifikan pada populasi umum. Namun, lokasi berkategori sedang (36.4%) berpotensi menyebabkan dampak kesehatan ringan pada kelompok sensitif, meliputi penderita infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), asma, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), lansia (>60 tahun), dan anak-anak (<5 tahun). Analisis korelasi terhadap kesehatan dilakukan dengan mengintegrasikan data ISPU dengan temuan literatur ilmiah terkini.

Analisis meta menunjukkan bahwa setiap kenaikan konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 10 µg/m³ berkorelasi dengan peningkatan risiko kematian akibat seluruh penyebab sebesar 6% dan kematian kardiovaskular sebesar 11% (Hoek dkk., 2013), paparan $PM_{2.5}$ yang berlangsung selama 2 tahun dikaitkan dengan peningkatan risiko 30% terkena penyakit kardiovaskular

(Zhang, 2025). Penelitian lain yang dilakukan pada 22,8 juta partisipan di 22 negara juga menunjukkan bahwa setiap kenaikan 10 μg/m³ paparan $PM_{2.5}$ jangka panjang meningkatkan risiko asma sebesar 21,4% pada anak-anak dan meningkatkan risiko asma sebesar 7,1% pada orang dewasa (Ni dkk., 2024). Penelitian di Cina menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu rentang interkuartil (IQR) pada konsentrasi PM1, $PM_{2.5}$, dan PM_{10} secara signifikan dikaitkan dengan peningkatan risiko asma, mengi batuk persisten, dan sesak napas, dengan hasil analisis sensitivitas yang tetap konsisten setelah mengeksklusi individu dengan riwayat keluarga alergi (Zheng dkk., 2024).

Paparan jangka panjang terhadap $PM_{2.5}$ merupakan faktor risiko signifikan untuk perkembangan demensia pada orang dewasa. Penelitian yang melibatkan 24 juta partisipan mencakup 21 studi observasional independen menyatakan bahwa setiap peningkatan 5 μg/m³ dalam konsentrasi $PM_{2.5}$ dikaitkan dengan 8% peningkatan risiko demensia (Rogowski dkk., 2025). Untuk populasi yang sudah memiliki penyakit kardiovaskular atau respiratori, paparan $PM_{2.5}$ 16.4 μg/m³ dapat mempercepat progresi penyakit dan meningkatkan frekuensi eksaserbasi akut (Manisalidis dkk., 2020). $PM_{2.5}$ meningkatkan risiko asma 3,1 kali lipat (pada peningkatan 4,1 μg/m³) dengan memicu inflamasi tipe 2 dan non-tipe 2 melalui pelepasan sitokin, stres oksidatif, dan kerusakan barrier epitel, terutama pada anak-anak (Zhou dkk., 2024).

Studi di Jakarta memberikan konteks Indonesia yang relevan. Penelitian tersebut melaporkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ >35 μg/m³ di Jakarta menyebabkan >10,000 kematian prematur per tahun, termasuk >7,000 kasus ISPA pada anak-anak, dengan kerugian ekonomi mencapai USD 220 miliar (6.6% dari GDP Indonesia) (Syuhada dkk., 2023). Dibandingkan dengan Jakarta, konsentrasi $PM_{2.5}$ di area pertambangan timah (rata-rata 16.4 μg/m³) hanya 47% dari level Jakarta, sehingga burden kesehatan diestimasi jauh lebih rendah, sekitar <10% dari burden Jakarta. Namun, untuk pekerja tambang dengan exposure okupasional 8-10 jam per hari selama bertahun-tahun, risiko kumulatif dapat lebih tinggi dibanding populasi umum yang terpapar intermittent.

Perbandingan dengan WHO Air Quality Guidelines 2021 menunjukkan konsentrasi rata-rata $PM_{2.5}$ (16.4 μg/m³) sedikit melebihi rekomendasi 24-jam (15 μg/m³). WHO menetapkan guideline ini berdasarkan bukti ilmiah bahwa tidak ada threshold aman untuk $PM_{2.5}$, artinya risiko kesehatan mulai meningkat pada konsentrasi serendah apapun. Oleh karena itu, meskipun ISPU menunjukkan kategori baik dan sedang dan compliance 100% terhadap baku mutu nasional, upaya penurunan emisi tetap diperlukan untuk mencapai target WHO dan meminimalkan dampak kesehatan jangka panjang, terutama untuk melindungi kelompok rentan dan pekerja tambang dengan paparan okupasional tinggi.

Nitrogen oksida (NO_2) dikenal sebagai gas yang merugikan, menurut kasongo dkk (2024) NO_2 di pertambangan diakibatkan oleh pembakaran bahan bakar hidrokarbon yang berasal dari alat transportasi tambang . Penelitian yang dilakukan oleh Manisalidis dkk., (2020) mendapati bahwa paparan jangka panjang NO_2 mempengaruhi penurunan fungsi kognitif signifikan yang mempengaruhi keterampilan bahasa dan fungsi eksekutif serta merusak metabolisme energi mitokondria di otak (Tang dkk., 2024). Paparan terhadap polutan udara dapat menyebabkan berbagai dampak kesehatan multidimensi, termasuk iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan; gangguan sistem pernapasan seperti batuk, mengi, dispnea, bronkospasme, dan bahkan edema paru pada paparan tinggi (>2,0 ppm); penurunan fungsi imun melalui gangguan pada sel T-limfosit (CD8+) dan sel NK; gangguan penciuman; perkembangan penyakit paru kronis akibat paparan jangka panjang; serta efek kardiovaskular serius seperti hipertrofi ventrikel dan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular.

Menurut Manisalidis dkk (2020) Karbon monoksida (CO) merupakan gas beracun yang memiliki afinitas terhadap hemoglobin jauh lebih tinggi daripada oksigen, sehingga mengganggu pengikatan dan pengangkutan oksigen dalam darah serta memicu hipoksia jaringan, iskemia, dan risiko penyakit kardiovaskular. Paparan akut menyebabkan gejala seperti sakit kepala, pusing, kelemahan, mual, muntah, hingga kehilangan kesadaran, dan pada kadar tinggi dapat berakibat fatal karena gagalnya oksigenasi organ vital. Efek toksik CO bersifat langsung dan cepat, menjadikannya ancaman serius bagi kesehatan bahkan dalam paparan singkat.

Selain CO, polutan gas lain seperti ozon (O_3) juga menimbulkan dampak kesehatan yang signifikan. Masih menurut Manisalidis dkk. (2020) ozon (O_3) merupakan oksidan kuat yang 52% lebih reaktif daripada klorin, O_3 menembus jauh ke dalam paru-paru karena kelarutannya yang rendah dalam air, menyebabkan gangguan pernapasan, kerusakan oksidatif langsung pada jaringan, serta efek sistemik serius. Paparan ozon dikaitkan dengan peningkatan mortalitas harian sebesar 0,33%, termasuk kenaikan risiko kematian akibat penyebab pernapasan (1,13%) dan kardiovaskular (0,45%). Di kulit, ozon merusak DNA keratinosit epidermis, memicu pembentukan malondialdehida (penanda stres oksidatif), serta menghabiskan antioksidan penting seperti vitamin C dan E. Selain itu, ozon juga merusak saluran air mata dan mengganggu morfologi, fungsi, serta respons imunologis jaringan yang terpapar.

SIMPULAN

Kualitas udara ambien di area pertambangan timah Kabupaten Bangka berada dalam kondisi baik hingga sedang berdasarkan ISPU, dengan nilai berkisar 35.3-73.6. Distribusi kategori menunjukkan 63.6% lokasi (7 dari 11) masuk kategori baik dan 36.4% lokasi (4 dari

11) masuk kategori sedang. $PM_{2.5}$ merupakan polutan dominan dengan konsentrasi rata-rata 16.4 dengan standar deviasi 3.2. Seluruh parameter polutan (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO, O_3, NO_2) memenuhi baku mutu udara ambien nasional PP No. 22 Tahun 2021 dengan tingkat kepatuhan 100%. Korelasi terhadap kesehatan manusia menunjukkan bahwa konsentrasi polutan dan gas pencemar yang meningkat seiring dengan meningkatnya risiko kesehatan pada kelompok sensitif (penderita ISPA, asma, penyakit kardiovaskular, lansia, anak-anak) terutama di lokasi kategori sedang. Meskipun risiko absolut tergolong rendah dan jauh lebih baik dibanding kondisi Jakarta Syuhada dkk (2023), diperlukan monitoring berkelanjutan, implementasi program pengendalian emisi untuk mencapai WHO guidelines ($PM_{2.5}$ <15 μg/m³), serta surveillance kesehatan masyarakat terutama untuk pekerja tambang dengan paparan okupasional tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. P., Dehkordi, K. M., Salmanvandi, H., Khorjestan, R. R., Ghaffarzadeh, M., 2024. Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering, 23*(31), 102729.

García, M. R., Spinazze, A., Branco, P. T. B. S., Borghi, F., Villena, G., Cattaneo, A., Gilio, S, Di., Mihucz, V. G., Álvarez, E. G., Lopes, S. I., Bergmans, B., Orłowski, C., Karatzas, K., Marques, G., Saffell, J., Sousa, S. I. V., 2022. Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications. *Applied Spectroscopy Reviews*, *57*(9–10), 747–779.

Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J. D., 2013. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. Environmental Health, 12(1), 43.

Kasongo, J., Alleman, L. Y., Kanda, J. M., Kaniki, A., Riffault, V., 2024. Metal-bearing airborne particles from mining activities: A review on their characteristics, impacts and research perspectives. *Science of the Total Environment*, *951*, 175426.

Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Thurston, G. D., Virani, S., Lavie, C. J., 2023. $PM_{2.5}$ and cardiovascular diseases: State-of-the-Art review. *International Journal of Cardiology Cardiovascular Risk and Prevention, 19*, 200217.

Lelieveld, J., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Haines, A., Münzel, T., 2020. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: A worldwide perspective. *Cardiovascular Research*, *116*(11), 1910–1917.

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14

Ni, R., Su, H., Burnett, R. T., Guo, Y., Cheng, Y., 2024. Long-term exposure to $PM_{2.5}$ has significant adverse effects on childhood and adult asthma: A global meta-analysis and health impact assessment. *One Earth, 7*(11), 1953–1969.

Patra, A. K., Gautam, S., Kumar, P., 2016, Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation—A review. *Environmental Technology & Innovation*, 5(1), 233-249

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Rahman, M. M., Begum, B. A., Hopke, P. K., Nahar, K., Thurston, G. D., 2020. Assessing the $PM_{2.5}$ impact of biomass combustion in megacity Dhaka, Bangladesh. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, *264*, 114798.

Rogowski, C. B. B., Bredell, C., Shi, Y., Tien-Smith, A., Szybka, M., Fung, K. W., Hong, L., Phillips, V., Jovanovic Andersen, Z., Sharp, S. J., Woodcock, J., Brayne, C., Navaratnam, A., Khreis, H., 2025. Long-term air pollution exposure and incident dementia: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet. Planetary health*, *9*(7), 101266.

Syuhada, G., Akbar, A., Hardiawan, D., Pun, V., Darmawan, A., Heryati, S. H. A., Siregar, A. Y. M., Kusuma, R. R., Driejana, R., Ingole, V., Kass, D., Mehta, S., 2023. Impacts of Air Pollution on Health and Cost of Illness in Jakarta, Indonesia. *International journal of environmental research and public health*, *20*(4), 2916.

Tang, Y., Li, Z., Fu, Y., Zhao, M., 2024. Causal effects of $PM_{2.5}$, NO_x, and NO_2 on cognitive function: A two-sample Mendelian randomization study. *Aerosol and Air Quality Research, 24*(8), 230326.

World Health Organization. 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization.

World Bank. 2022. *The global health cost of $PM_{2.5}$ air pollution: A case for action beyond 2021* (International Development in Focus). World Bank.

Xie, W., You, J., Zhi, C., Li, L., 2021. The toxicity of ambient fine particulate matter ($PM_{2.5}$) to vascular endothelial cells. *Journal of Applied Toxicology, 41*(5), 713–723.

Zhang, Z., An, R., Guo, H., Yang, X., 2025. Effects of $PM_{2.5}$ exposure and air temperature on risk of cardiovascular disease: Evidence from a prospective cohort study. *Frontiers in Public Health, 12*, 1487034.

Zheng, X. Y., Guo, S. J., Hu, J. X., Meng, R. L., Xu, Y. J., Lv, Y. H., Wang, Y., Xiao, N., Li, C., Xu, X. J., Zhao, D. J., Zhou, H. Y., He, J. H., Tan, X. M., Wei, J., Lin, L. F., Guan, W. J., 2024. Long-term associations of PM_1*versus* $PM_{2.5}$ and PM_{10} with asthma and asthma-related respiratory symptoms in the middle-aged and elderly population. *ERJ open research*, *10*(4), 00972-2023.

Zhou, X., Sampath, V., Nadeau, K. C., 2024. Effect of air pollution on asthma. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, *132*(4), 426–432.