

Karakteristik Risiko Kesehatan Non Karsinogenik Akibat Paparan Gas SO₂ dan NO₂ pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang

Lina Nur Qolifah*, Nur Endah Wahyuningsih, Yusniar Hanani Darundiati

Bagian Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Diponegoro, Indonesia

*Corresponding author: linanurqolifah@students.undip.ac.id

Info Artikel: Diterima 23 Juni 2023 ; Direvisi 11 September 2023 ; Disetujui 24 September 2023

Tersedia online : 11 Oktober 2023 ; Diterbitkan secara teratur : Februari 2024

Cara sitasi: Qolifah LN, Wahyuningsih NE, Darundiati YH. Karakteristik Risiko Kesehatan Non Karsinogenik Akibat Paparan Gas SO₂ dan NO₂ pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2024 Feb;23(1):50-58. <https://doi.org/10.14710/jkli.23.1.50-58>.

ABSTRAK

Latar belakang: Timbulan sampah di TPA Jatibarang Kota Semarang tahun 2022 didominasi sampah sisa makanan dengan persentase sebesar 60,79%. Dekomposisi anaerob menghasilkan gas berbahaya seperti CH₄, CO₂, NH₃, N₂O, SO₂ dan NO₂ yang dapat mencemari udara dan mengganggu sistem pernapasan. Pemulung yang bekerja dan bertempat tinggal di area TPA Jatibarang menjadi kelompok berisiko mengalami gangguan sistem pernapasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kesehatan lingkungan paparan gas SO₂ dan NO₂ pada pemulung di TPA Jatibarang.

Metode: Penelitian ini merupakan observasional analitik dengan pendekatan ARKL. Populasi subjek berjumlah 250 pemulung dan sampel subjek sebanyak 77 pemulung dengan pengambilan sampel secara *system random sampling*. Sampel objek yaitu udara ambien pada 5 titik di TPA Jatibarang yang didapatkan dari arah mata angin dominan. Analisis data yang dilakukan adalah analisis univariat dan analisis risiko kesehatan lingkungan.

Hasil: Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi gas SO₂ memiliki rata-rata 49,78 µg/Nm³, minimal 47,1 µg/Nm³, maksimal 53,6 µg/Nm³, dan standar deviasi 2,37. Konsentrasi gas NO₂ memiliki rata-rata 70,66 µg/Nm³, minimal 69,2 µg/Nm³, maksimal 71,6 µg/Nm³, dan standar deviasi 1,09. Rata-rata lama paparan 8,78 jam/hari, frekuensi paparan 325,71 hari/tahun, durasi paparan 11 tahun, dan berat badan 57,05 kg. *Intake* akibat paparan gas SO₂ pada pemulung memiliki rata-rata 0,0070 mg/kg/hari (*realtime*) dan 0,0161 mg/kg/hari (*lifetime*), untuk paparan gas NO₂ memiliki rata-rata 0,0099 mg/kg/hari (*realtime*) dan 0,0228 mg/kg/hari (*lifetime*).

Simpulan: Karakteristik risiko kumulatif non karsinogenik proyeksi *realtime* menunjukkan sebanyak 27 (35,06%) pemulung memiliki RQ_{kum} >1 dan proyeksi *lifetime* 76 (98,70%) pemulung memiliki RQ_{kum} >1 berarti terdapat risiko gangguan kesehatan non karsinogenik akibat paparan gas SO₂ dan NO₂.

Kata kunci: SO₂; NO₂; pemulung; TPA Jatibarang

ABSTRACT

Title: Health Risk Assessment for Non-Carcinogenic SO₂ and NO₂ Exposure to Scavengers at Jatibarang Landfill Semarang City

Background: Waste generation at the Jatibarang Landfill Semarang City in 2022 is dominated by food waste with a percentage of 60.79%. Anaerobic decomposition produces dangerous gases such as CH₄, CO₂, NH₃, N₂O, SO₂, and NO₂ which can pollute the air and disrupt the respiratory system. Scavengers who work and live in the Jatibarang landfill area are at risk of experiencing respiratory system problems. This study aims to analyze the environmental health risks of exposure to SO₂ and NO₂ gases among scavengers at the Jatibarang landfill.

Methods: This research is an analytical observational research using the EHRA approach. The subject population was 250 scavengers and 77 scavengers as subjects using a system random sampling. The object samples are ambient air at 5 points at the Jatibarang Landfill obtained from the dominant cardinal direction. The data analysis carried out was univariate analysis and environmental health risk analysis.

Results: The measurement results show that the SO₂ gas concentration averages 49.78 µg/Nm³, a minimum of 47.1 µg/Nm³, a maximum of 53.6 µg/Nm³, and a standard deviation of 2.37. NO₂ gas concentration has an average of 70.66 µg/Nm³, a minimum of 69.2 µg/Nm³, a maximum of 71.6 µg/Nm³, and a standard deviation of 1.09. The average duration of exposure was 8.78 hours/day, frequency of exposure 325.71 days/year, duration of exposure 11 years, and body weight 57.05 kg. Intake due to exposure to SO₂ gas in scavengers has an average of 0.0070 mg/kg/day (real-time) and 0.0161 mg/kg/day (lifetime), for exposure to NO₂ gas has an average of 0.0099 mg/kg/day (realtime) and 0.0228 mg/kg/day (lifetime).

Conclusion: The cumulative non-carcinogenic risk characteristics for realtime projections show that as many as 27 scavengers (35.06%) have an $RQ_{cum} > 1$ and for a lifetime projection 76 (98.70%) scavengers have an $RQ_{cum} > 1$, which means there is a risk of non-carcinogenic health problems due to exposure SO₂ and NO₂ gases.

Keywords: SO₂; NO₂; scavengers; Jatibarang Landfill

PENDAHULUAN

Sumber pencemar SO_x berasal dari berbagai sumber seperti proses industri (73,5%), pembakaran stasioner (22%), transportasi (2,4%), pembuangan limbah padat (0,3%), dan lainnya (1,8%). Sedangkan sumber pencemar NO_x berasal dari pembakaran stasioner (48,5%), transportasi (39,3%), pembuangan limbah padat (2,9%), proses industri (1%), dan lainnya (8,3%).¹ Tahun 2022 timbulan sampah di Indonesia mencapai 18,64 juta ton/tahun dan Provinsi Jawa Tengah menjadi provinsi dengan timbulan sampah terbesar di Indonesia. Salah satu penyumbang peningkatan timbulan sampah terjadi di Kota Semarang yang memproduksi sampah tertinggi di Provinsi Jawa Tengah. Tahun 2021 timbulan sampah harian di Kota Semarang mencapai 1,180.14 ton dengan timbulan sampah tahunan 430,749.75 ton, pada tahun 2022 meningkat menjadi 1,181.06 ton untuk timbulan sampah harian dan 431,085.22 ton untuk timbulan sampah tahunan. Sampah yang masuk di TPA Jatibarang didominasi oleh sampah sisa makanan dengan peresentase sebesar 60,79%.² Beberapa kegiatan yang dilakukan di TPA Jatibarang antara lain pemrosesan sampah, pembuatan pupuk, pengolahan lindi, pemilahan sampah, dan pemanfaatan gas metan.³

Pemrosesan sampah menghasilkan berbagai gas yang berbahaya seperti CH₄, NH₃, N₂O, H₂S, CO₂, SO₂, dan NO₂ yang mampu mencemari udara dan mengakibatkan gangguan kesehatan.⁴⁻⁶ Komposisi gas yang dihasilkan dari dekomposisi sampah didominasi gas NH₄ dan CO₂ sebesar 90-98% dan 2-10% diusung oleh nitrogen, oksigen, sulfida, amonia, hidrogen, dan berbagai gas lainnya. Jumlah gas yang dihasilkan bergantung dengan jenis pengelolaan sampah, desain dan teknologi TPA, kandungan oksigen, kelembapan, suhu, jaringan pipa pompa gas, dan kontrol perpindahan panas pada penghalang tanah vertikal.⁷⁻¹¹ Pencemaran udara yang terjadi di TPA berasal dari pelepasan gas TPA atau sering disebut dengan *Landfill Gas* (LFG) yang dihasilkan dari dekomposisi anaerob timbulan sampah padat yang dihasilkan oleh penduduk. Dekomposisi sampah organik juga akan

menghasilkan gas rumah kaca atau *Greenhouse Gases* (GHG).¹² Dekomposisi anaerob mengubah bahan organik menjadi gas CO₂, CH₄, berbagai alkohol dan asam volatil lemak. Senyawa nitrogen kompleks dikonversi menjadi NH₃ dan berubah menjadi NO₂, serta senyawa sulfur dikonversi menjadi gas H₂S yang juga akan berubah menjadi SO₂.¹³

Sulfur dioksida memiliki karakteristik berbau tajam, berwarna, bersifat iritan, tidak mudah meledak, dan tidak mudah terbakar.¹⁴ Paparan SO₂ dalam jangka waktu singkat berkaitan dengan penyakit pernapasan pada anak-anak dan usia dewasa, terutama pada penderita asma dan lansia.¹⁵ Pada konsentrasi 20 ppm gas SO₂ mampu mengakibatkan timbulnya iritasi pada tenggorokan, hidung, mata, edema paru, sinus, hingga kematian. Efek lainnya yaitu mengakibatkan iritasi pada bagian saluran pernapasan serta menurunkan kinerja paru-paru yang mengakibatkan batuk dan sesak napas.^{16,17} Nitrogen dioksida juga memiliki karakteristik bau yang sangat menyengat dan mudah diamati karena memiliki warna kemerahan.^{14,18} Paparan NO₂ pada manusia dengan konsentrasi 5 ppm selama 10 menit mampu mengakibatkan kesulitan bernapas. Efek lain dari NO₂ yaitu batuk, mudah lelah, mual, dan sakit kepala.¹⁹

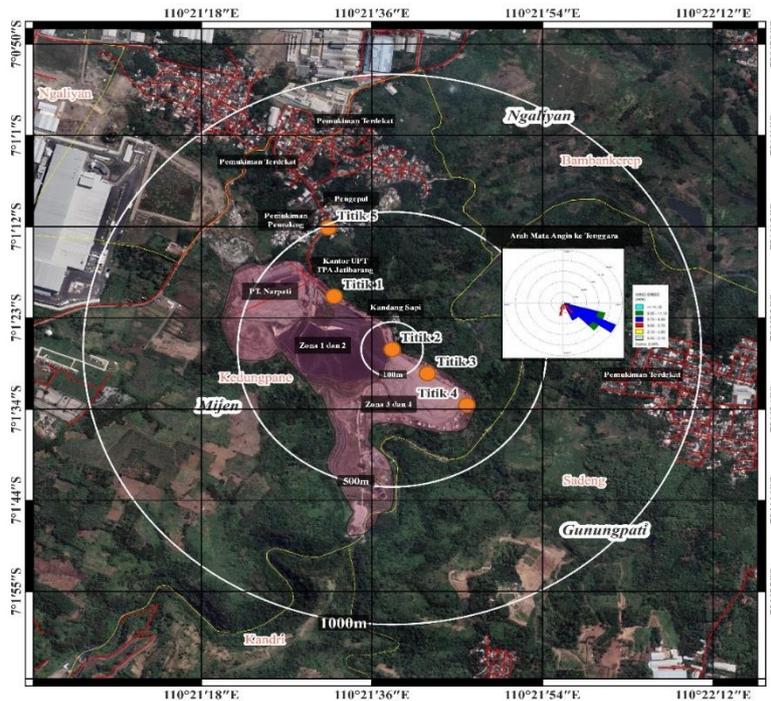
Pemulung adalah salah satu pekerja yang banyak ditemukan di TPA Jatibarang dengan jumlah kurang lebih 250 orang. Bertempat tinggal di area TPA Jatibarang dan bekerja setiap hari dalam waktu yang lama dengan menghirup udara yang tercemar menjadikan pemulung kelompok rentan yang dapat terkena gangguan kesehatan akibat paparan gas SO₂ dan NO₂. Paparan SO₂ dalam jangka pendek mampu menyebabkan peradangan saluran pernapasan serta gangguan asma terutama bagi anak-anak dan orang tua dengan usia > 65 tahun. Paparan jangka panjang mampu menyebabkan asma, bronktis, dan gejala pernapasan hingga menyebabkan kematian.²⁰ Paparan NO₂ dalam jangka pendek dan panjang mampu meningkatkan kematian dengan menyebabkan penyakit kardiovaskular dan pernapasan.^{21,22} Pada penelitian Putri *et al* (2017) menunjukkan sebanyak

80% dari pemulung di TPA Jatibarang mengeluhkan mengalami gangguan pernapasan.²³ Berdasarkan uraian tersebut perlu dilakukan analisis risiko kesehatan lingkungan akibat pajanan gas SO₂ dan NO₂ pada pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini merupakan observasional analitik melalui pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dengan tujuan yaitu untuk menilai risiko yang disebabkan oleh pajanan gas SO₂ dan NO₂ pada pemulung di TPA Jatibarang. Populasi pada penelitian ini yaitu 250 pemulung yang bekerja dan bertempat tinggal di area TPA Jatibarang dengan sampel sebanyak 77 pemulung yang dihitung dengan rumus Lameshow dengan teknik pengambilan sampel melalui *sistem random sampling*. Pengumpulan data mengenai karakteristik responden dan pola pajanan dilakukan dengan wawancara dan observasi langsung kepada pemulung dengan bantuan lembar kuesioner dan lembar observasi. Pengukuran berat badan

menggunakan timbangan injak dan tinggi badan menggunakan *microtoise*. Pengukuran konsentrasi SO₂, NO₂, dan faktor meteorologis dilakukan pada 5 titik di TPA Jatibarang dimana banyak ditemukan pemulung beraktivitas. Pengukuran SO₂, NO₂, dan faktor meteorologis dilakukan oleh Laboratorium Kesehatan dan Pengujian Alat Kesehatan Provinsi Jawa Tengah. Pengukuran SO₂ sesuai dengan SNI 7119-7:2017 metode Pararosanilin menggunakan spektrofotometer, pengukuran NO₂ sesuai SNI 7119-2:2017 metode *Griess-Saltzman* menggunakan spektrofotometer, pengukuran suhu dan kelembangan udara dengan *thermohyrometer*, serta pengukuran arah dan kecepatan angin dengan anemometer dengan masing-masing titik dilakukan pengukuran selama 1 jam pada hari Rabu, 8 April 2023 pukul 08.40-13.45 WIB. Teknik analisis data yang digunakan yaitu analisis univariat untuk mendeskripsikan karakteristik responden dan analisis risiko kesehatan lingkungan untuk melakukan perhitungan estimasi risiko kesehatan akibat pajanan gas SO₂ dan NO₂.



Gambar 1. Titik *Sampling* Penelitian di TPA Jatibarang Kota Semarang

Berikut rumus dalam metode ARKL yang digunakan dalam penelitian ini :
Intake:

$$I_{nk} = \frac{C \times R \times t \times f \times D}{W_b \times t_{avg}}$$

Tingkat risiko non karsinogenik:

$$RQ = \frac{I_{nk}}{RfC}$$

Tingkat risiko non karsinogenik kumulatif

$$RQ_{kum} = RQ_{SO_2} + RQ_{NO_2}$$

Keterangan:

- Ink : intake (mg/kg/hari)
- C` : konsentrasi agen risiko (mg/m³)
- R` : laju asupan (m³/jam)
- tE : lama pajanan harian (jam/hari)
- fE : frekuensi pajanan (hari/tahun)
- Dt : durasi pajanan (tahun)
- Wb : berat badan (kg)

Karakteristik risiko digunakan untuk menentukan pajanan konsentrasi SO₂ dan NO₂ yang dapat menimbulkan risiko gangguan kesehatan pada pemulung. Penentuan *risk quotient* atau tingkat risiko

dilakukan dengan membandingkan nilai *intake* dengan dosis referensi. Nilai dosis referensi untuk jalur paparan inhalasi SO₂ dan NO₂ secara berturut-turut sebesar 0,026 mg/kg/hari dan 0,02 mg/kg/hari dengan efek krisis gangguan sistem pernapasan yang didapatkan dari *Integrated Risk Information System* (IRIS) US-EPA. Laju inhalasi menggunakan nilai *default* untuk usia dewasa yaitu 0,83 m³/jam. Karakteristik risiko dihitung untuk dua kondisi yaitu *realtime* dan *lifetime*. Kondisi *realtime* merupakan kondisi saat ini atau saat penelitian berlangsung dan kondisi *lifetime* merupakan kondisi 30 tahun kedepan setelah penelitian berlangsung. Pengambilan kesimpulan untuk karakteristik risiko dapat disebut aman bagi kesehatan jika nilai $RQ_{kum} \leq 1$ dan tidak aman apabila $RQ_{kum} > 1$. Penelitian ini telah mendapatkan *ethical clearance* yang dirilis oleh Komisi Etik Penelitian Kesehatan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Diponegoro No:164/EA/KEPK-FKM/2023.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Responden

Hasil pengukuran penelitian mengenai konsentrasi gas SO₂ dan NO₂, faktor meteorologis, karakteristik responden, antropometri, pola pajanan pemulung, analisis asupan, dan karakteristik tingkat risiko dapat dilihat pada masing-masing tabel berikut.

Tabel 1. Distribusi Karakteristik Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang Tahun 2023

No.	Karakteristik	f	%
1.	Jenis Kelamin		
	Laki-Laki	48	62,34
	Perempuan	29	37,66
2.	Umur		
	16-30	5	6,49
	31-45	36	46,75
	46-60	31	40,26
	>60	5	6,49
3.	Indeks Massa Tubuh		
	Kekurangan Berat Badan Tingkat Berat	4	5,19
	Kekurangan Berat Badan Tingkat Ringan	4	5,19
	Normal	51	66,23
	Kelebihan Berat Badan Tingkat Ringan	7	9,09
	Kelebihan Berat Badan Tingkat Berat	11	14,29
4.	Penggunaan APD		
	Ya	37	48,05
	Tidak	40	51,95
5.	Kebiasaan Merokok		
	Ya	35	45,45
	Tidak	42	54,55

Karakteristik individu seperti jenis kelamin, usia, berat badan, dan *life style* mampu menjadi faktor yang mempengaruhi pajanan dan efek toksikan pada tubuh setiap individu.²⁴ Berdasarkan tabel 1 dapat diketahui bahwa jenis kelamin laki-laki lebih dominan daripada perempuan sejumlah jumlah 48 (62,34%). Terdapat perbedaan anatomi paru-paru laki-laki dan perempuan yaitu kapasitas dan volume paru-paru laki-laki yang lebih besar 20-25% daripada perempuan. Gangguan pernapasan lebih banyak terjadi kepada laki-laki dibandingkan perempuan karena laki-laki membutuhkan lebih banyak udara sehingga menyebabkan udara ambien yang mengandung polutan seperti gas SO₂ dan NO₂ akan lebih banyak terhirup oleh laki-laki daripada perempuan.²⁵ Usia pemulung paling banyak pada kelompok 31-45 tahun sebanyak 36 (46,75%) pemulung. Usia berpengaruh terhadap toksisitas suatu zat kimia ke dalam tubuh, pada umur di atas 45 tahun terjadi penurunan fungsi organ tubuh yang berkaitan dengan sistem metabolisme manusia. Nilai faal paru menurun sesuai dengan bertambahnya usia sehingga tingkat kerentanan terhadap penyakit semakin bertambah sejalan dengan bertambahnya umur.²⁶ Sebanyak 18 (23,38%) pemulung memiliki IMT yang masuk ke dalam kategori kelebihan berat badan. Pada kondisi kelebihan berat badan meningkatkan kerja otot-otot pernapasan dan peningkatan jumlah lemak dinding dada dan abdomen menunjukkan perubahan fungsi pernapasan dengan menurunnya volume paru.²⁷

Penggunaan APD dan merokok merupakan bagian dari gaya hidup yang juga mampu mempengaruhi efek toksikan. Masih ditemukan banyak pemulung yang tidak menggunakan APD dalam bentuk masker atau penutup hidung yaitu sebanyak 40 (51,95%) pemulung. Penggunaan masker berpengaruh terhadap saluran pernapasan dan gangguan fungsi paru, karena masker dapat menghalangi partikel udara yang dihirup.²⁸ Sebanyak 35 (45,45%) pemulung memiliki kebiasaan merokok dan semua pemulung yang memiliki kebiasaan merokok berjenis kelamin laki-laki. Perilaku merokok mampu memperberat kinerja paru-paru serta mampu menyebabkan terganggunya ventilasi paru akibat sekresi mukus yang berlebihan serta iritasi pada bronkus sehingga meningkatkan kerentanan terhadap penyakit pernapasan.²⁹

Konsentrasi SO₂, NO₂, dan Faktor Meteorologis

Tabel 2. Hasil Pengukuran SO₂, NO₂, dan Faktor Meteorologis di TPA Jatibarang Kota Semarang Tahun 2023

Lokasi	Konsentrasi SO ₂	Konsentrasi NO ₂	Suhu °C	Kelembapan % RH	Kecepatan Angin m/det	Arah Angin °
	Baku Mutu* 632 µg/Nm ³	Baku Mutu* 316 µg/Nm ³				
Depan Kantor TPA	53,6	71,4	34,0	52,4	0,9	172
Zona 1 dan 2	49,7	69,8	33,6	55,0	1,2	103
Zona 3 dan 4	49	71,6	35,0	51,8	1,7	85
Zona 5	47,1	69,2	35,6	44,4	0,9	150
Pemukiman Pemulung	49,5	71,3	38,4	44,3	0,9	75

*Keputusan Gubernur Jawa Tengah No. 8 Tahun 2001 tentang Baku Mutu Udara Ambien

Pengukuran untuk konsentrasi SO₂ dan NO₂ dilakukan masing-masing satu kali selama 1 jam pada setiap titik dengan waktu yang berbeda-beda pada setiap titik pengukuran dengan rincian sebagai berikut, zona 5 (08.40-09.40), zona 1-2 (10.18-11.18), depan kantor TPA Jatibarang (10.30-11.30), Zona 3-4 (11.30-12.30), dan pemukiman pemulung (12.45-13.45). Perbedaan waktu pengukuran mampu mempengaruhi konsentrasi pengukuran karena adanya perbedaan aktivitas di TPA Jatibarang dan faktor meteorologis seperti suhu, kelembapan, arah angin, dan kecepatan angin.

Kadar SO₂ paling tinggi ditemukan di depan kantor TPA Jatibarang yaitu sebesar 53,6 µg/Nm³ pukul 10.30-11.30 WIB. Konsentrasi SO₂ yang tinggi diakibatkan dari lokasi yang tidak jauh dari zona 3 dan 4 sebagai zona aktif pembuangan sampah dan depan kantor TPA merupakan tempat untuk menimbang sampah yang dibawa oleh truk-truk pengangkut sampah. Pengambilan sampel bertepatan dengan proses loading sampah yang menyebabkan antrian truk-truk pengangkut sampah yang menghasilkan emisi SO₂ sehingga konsentrasi gas SO₂ semakin tinggi. Kadar NO₂ paling tinggi ditemukan di zona 3 dan 4 yaitu sebesar 71,6 µg/Nm³ pada pukul 11.30-12.30 WIB. Zona 3-4 merupakan zona aktif untuk membuang sampah sehingga dan terdapat tumpukan sampah yang sangat tinggi dengan ukuran 8-10 meter. Tumpukan sampah terutama sampah organik mampu menghasilkan gas NO₂ melalui proses pembusukan secara anaerob.

Kadar gas SO₂ dan NO₂ paling rendah ditemukan di zona 5 yaitu sebesar 47,1 dan 69,2 µg/Nm³ pada pukul 08.40-09.40 WIB. Pada zona ini sering digunakan sebagai tempat peristirahatan. Zona 5 ini bukan merupakan zona aktif pembuangan sampah, sehingga sampah yang berada di zona lima hanya sampah-sampah dari zona 3-4 yang sudah lama dan dipindahkan ke zona 5. Selain bukan zona aktif, zona 5 juga berbatasan langsung dengan pohon-pohon yang memungkinkan adanya absorpsi gas SO₂ dan NO₂ melalui tumbuhan. Truk-truk pengangkut sampah juga tidak ada yang sampai pada zona ini sehingga mengurangi kemungkinan adanya peningkatan kadar gas SO₂ dan NO₂ akibat emisi kendaraan

Pada 5 titik di TPA Jatibarang Kota Semarang didapatkan suhu rerata 35,32 °C. Pengukuran suhu dilaksanakan ketika musim kemarau sehingga didapatkan data suhu udara cukup tinggi. Suhu yang tinggi akan mempercepat terjadinya penguraian gas SO₂ dan NO₂ sehingga peningkatan suhu mampu meningkatkan konsentrasi gas SO₂ dan NO₂.³⁰ Hasil dari penelitian ini menunjukkan suhu yang meningkat tidak berpengaruh pada meningkatnya konsentrasi gas SO₂ dan NO₂ yang sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Annisa *et al* (2017) di TPA Jatibarang Kota Semarang menunjukkan konsentrasi gas SO₂ dan NO₂ tidak dipengaruhi oleh suhu karena suhu selama

pengukuran konstan dengan suhu terendah 27,9 °C dan suhu tertinggi 38,02 °C.⁵

Pengukuran kelembapan menunjukkan rerata 49,58% RH dengan kelembapan tertinggi pada zona 1-2 yaitu 55% RH serta terendah pada pemukiman pemulung 44,3% RH. Saat kondisi udara memiliki kelembapan yang tinggi, maka polutan gas SO₂ dan NO₂ yang ada di udara akan terperangkap di dalam droplet atau tetesan air, sehingga menyebabkan penurunan konsentrasi dari gas SO₂ dan NO₂.³⁰ Namun dalam penelitian ini titik dengan kelembapan tertinggi tidak memiliki konsentrasi SO₂ dan NO₂ terendah begitupun sebaliknya. Penelitian ini tidak sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Istantinova *et al* (2013) yang menunjukkan kelembapan berbanding terbalik dengan konsentrasi polutan yang berarti semakin tinggi kelembapan konsentrasi polutan akan semakin rendah.³⁰

Pengukuran kecepatan angin pada 5 titik di TPA Jatibarang menunjukkan rata-rata sebesar 1,12 m/det dengan kecepatan tertinggi pada zona 3-4 sebesar 1,7 dan kecepatan terendah terdapat pada ketiga titik yaitu depan kantor TPA, zona 5, dan pemukiman pemulung. Pengukuran arah mata angin pada 5 titik di TPA Jatibarang menunjukkan arah mata angin bertiup ke timur-tenggara. Kecepatan angin berperan dalam dispersi gas SO₂ dan NO₂ dari sumber emisi. Apabila kecepatan angin rendah maka gas SO₂ dan NO₂ akan menumpuk pada satu tempat sehingga meningkatkan konsentrasi gas SO₂ dan NO₂. Jika kecepatan angin tinggi maka gas SO₂ dan NO₂ akan bergerak dan mengalami penurunan melalui dispersi. Gas SO₂ dan NO₂ akan menyebar di udara sesuai dengan arah angin. Arah angin menentukan laju penyebaran pencemar ketika terbawa oleh angin.⁵ Hasil penelitian ini menunjukkan titik yang memiliki konsentrasi SO₂ tertinggi dan terendah memiliki kecepatan angin yang sama. Kondisi ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sarwono *et al* (2022) yang menunjukkan kecepatan angin tidak berpengaruh terhadap persebaran polutan SO₂ dan NO₂.³¹

Identifikasi Bahaya

Tabel 3. Distribusi Keluhan Kesehatan Gangguan Sistem Pernapasan pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang Tahun 2023

No.	Jenis Keluhan	Frekuensi	Presentase (%)
1	Batuk Ya	34	44,16
	Tidak	43	55,84
2	Flu Ya	32	41,56
	Tidak	45	58,44
3	Sesak Nafas Ya	8	10,39
	Tidak	69	89,61
4	Nyeri Dada Ya	27	35,06
	Tidak	50	64,94

No.	Jenis Keluhan	Frekuensi	Presentase (%)
5	Mengi Ya	8	10,39
	Tidak	69	89,61
6	Batuk Berdahak Ya	11	14,29
	Tidak	66	85,71

Masuknya gas SO₂ dan NO₂ ke dalam tubuh manusia mampu mengakibatkan gangguan kesehatan terutama pada sistem pernapasan. Hasil penelitian pada tabel 3 menunjukkan bahwa terdapat beberapa gangguan kesehatan berkaitan dengan sistem pernapasan yang dikeluhkan oleh pemulung seperti batuk, flu, sesak napas, nyeri dada, mengi, dan batuk berdahak. Ditemukannya keluhan gangguan sistem pernapasan menunjukkan ada bahaya dari gas SO₂ dan NO₂ yang menimpa pemulung. Sebanyak 34 responden (44,16 %) mengeluhkan batuk, 32 responden (51,56%) mengeluhkan flu, 8 responden (10,39%) mengeluhkan sesak napas, 27 responden (35,06%) mengeluhkan nyeri dada, 8 responden (10,39%) mengeluhkan mengi, dan 11 responden (14,29%) mengeluhkan batuk berdahak.

Pada konsentrasi 20 ppm gas SO₂ mampu mengakibatkan iritasi, tenggorokan, mata, hidung, sinus, edema paru hingga kematian. Efek lainnya yaitu iritasi pada saluran pernapasan serta menurunnya fungsi paru-paru yang mengakibatkan sesak napas dan batuk.^{16,17} Peningkatan SO₂ sebesar 10 µg/Nm³ mampu meningkatkan angka kematian akibat gangguan sistem pernapasan sebesar 0,7%.³² Paparan NO₂ pada manusia dengan konsentrasi 5 ppm selama 10 menit mampu mengakibatkan kesulitan bernapas. Efek lain dari NO₂ yaitu batuk, mudah lelah, mual, dan sakit kepala. Selain mengganggu sistem pernapasan, NO₂ dalam konsentrasi yang tinggi juga mampu menyerang sistem kardiovaskular yang mengakibatkan gangguan fungsi jantung dan pembuluh darah.¹⁹

Penelitian ini sejalan dengan penelitian lainnya yang dilakukan di TPA Kedungsari Kabupaten Jombang didapatkan kadar SO₂ dan NO₂ masing-masing 230,70 µg/Nm³ dan 235,10 µg/Nm³. Sebanyak 40% pemulung mengalami gangguan sesak napas.³³ Penelitian di TPA Blondo Kabupaten Semarang menunjukkan rerata konsentrasi SO₂ dan NO₂ yang dihasilkan dari dekomposisi sampah secara berurutan yaitu 26,576 µg/Nm³ dan 20,008 µg/Nm³ dan sebanyak 32% pemulung mengeluhkan sesak napas.¹⁴

Analisis Paparan dan Karakteristik Risiko

Variabel pola paparan dan berat badan mempengaruhi perhitungan asupan atau *intake*. Lama paparan pemulung merupakan lama paparan maksimal di kehidupan dalam satu hari yaitu 24 jam/hari dikarenakan pemulung bekerja dan bertempat tinggal di dalam area TPA Jatibarang. Rata-rata pola paparan lainnya pada pemulung di TPA Jatibarang menunjukkan 325,71 hari/tahun untuk frekuensi

paparan dan 13,5 tahun untuk durasi paparan. Berat badan pemulung di TPA Jatibarang memiliki nilai rata-rata 57,05 kg.

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Intake* dan *Risk Quotient* Gas SO₂ dan NO₂ Proyeksi *Realtime* dan *Lifetime* pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang Tahun 2023

Gas	Proyeksi	Nilai <i>Intake</i> (mg/kg/hari)		
		Min	Rata-rata	SD
		Maks	Median	Varian
SO ₂	<i>Realtime</i>	0,0004	0,0070	0,0052
		0,0186	0,0062	0,0000
	<i>Lifetime</i>	0,0076	0,0161	0,0034
		0,0264	0,0158	0,0000
NO ₂	<i>Realtime</i>	0,0005	0,0099	0,0073
		0,0264	0,0087	0,0001
	<i>Lifetime</i>	0,0108	0,0228	0,0049
		0,0375	0,0225	0,0000
Nilai <i>Risk Quotient</i>				
SO ₂	<i>Realtime</i>	0,0197	0,3535	0,2565
		0,9287	0,3087	0,0658
	<i>Lifetime</i>	0,2921	0,6212	0,1310
		1,0168	0,6096	0,0171
NO ₂	<i>Realtime</i>	0,0255	0,4956	0,3658
		1,3183	0,4366	0,1338
	<i>Lifetime</i>	0,5390	1,1414	0,2441
		1,8763	1,1244	0,0596
Kumulatif	<i>Realtime</i>	0,0434	0,8448	0,6235
		2,2471	0,7442	0,3887
	<i>Lifetime</i>	0,8311	1,7600	0,3763
		2,8931	1,7338	0,1416

Tabel 5. Distribusi Karakteristik Risiko Paparan Gas SO₂ dan NO₂ Proyeksi *Realtime* dan *Lifetime* pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang Tahun 2023

Gas	Proyeksi	RQ	Jumlah		Jumlah (orang)
			f	%	
SO ₂	<i>Realtime</i>	RQ < 1	77	100,00	77
		RQ > 1	0	0,00	
	<i>Lifetime</i>	RQ < 1	76	98,70	77
		RQ > 1	1	1,30	
NO ₂	<i>Realtime</i>	RQ < 1	69	89,61	77
		RQ > 1	8	10,39	
	<i>Lifetime</i>	RQ < 1	23	29,87	77
		RQ > 1	54	70,13	
Kumulatif	<i>Realtime</i>	RQ _{kum} < 1	50	64,94	77
		RQ _{kum} > 1	27	35,06	
	<i>Lifetime</i>	RQ _{kum} < 1	1	1,30	77
		RQ _{kum} > 1	76	98,70	

Pada tabel 4 menunjukkan perhitungan *intake* non karsinogenik untuk gas SO₂ pada pemulung di TPA Jatibarang memiliki rata-rata sebesar 0,0070 mg/kg/hari (*realtime*) dan 0,0161 mg/kg/hari (*lifetime*). *Intake* non karsinogenik gas NO₂ pada pemulung di TPA Jatibarang memiliki rata-rata sebagai berikut 0,0099 mg/kg/hari (*realtime*) dan 0,0228 mg/kg/hari (*lifetime*). Nilai karakteristik risiko didapatkan dari membandingkan nilai *intake* dengan *reference concentration* (RfC) untuk jalur paparan inhalasi SO₂ dan NO₂ secara berturut-turut sebesar 0,026 dan 0,02 mg/kg/hari didapatkan dari *Integrated Risk Information System* (IRIS) US-EPA. Nilai RQ_{kum} *realtime* memiliki nilai minimal 0,0434 dan maksimal 2,2471 dengan rata-rata 0,8448. Nilai RQ_{kum} *lifetime*

memiliki nilai minimal 0,8311 dan maksimal 2,8931 dengan rata-rata 1,7600. Selanjutnya dari nilai ini akan dikategorikan menjadi kelompok berisiko terkena gangguan kesehatan non karsinogenik apabila $RQ_{kum} > 1$ akibat pajanan gas SO_2 dan NO_2 dan tidak berisiko jika didapatkan $RQ_{kum} \leq 1$.

Tabel 5 menunjukkan bahwa pada kondisi *realtime* dan *lifetime* terdapat risiko non karsinogenik akibat pajanan gas SO_2 dan NO_2 pada pemulung di TPA Jatibarang. Pada kondisi *realtime* sebanyak 27(35,06%) pemulung dan proyeksi *lifetime* menunjukkan sebanyak 76 (98,70%) pemulung di TPA Jatibarang memiliki risiko kesehatan non karsinogenik akibat pajanan gas SO_2 dan NO_2 .

Tingkat risiko gangguan kesehatan dalam penelitian ini merupakan nilai prediktif dan keadaan sesungguhnya yang diterima setiap individu pemulung dapat lebih besar ataupun lebih kecil karena dipengaruhi oleh banyak faktor. *Intake* atau asupan dalam penelitian ini merupakan jumlah konsentrasi gas SO_2 dan NO_2 yang terpajan pada manusia melalui inhalasi atau dosis sebelum absorpsi, gangguan kesehatan sistem pernapasan akan muncul apabila gas SO_2 dan NO_2 dengan dosis tertentu mampu menembus organ target.^{21,31} Faktor-faktor yang mempengaruhi pajanan dan efek toksikan pada tubuh seperti aktivitas toksikan, pola pajanan, faktor meteorologi, sensitivitas dan variasi setiap individu.^{24,34} Faktor-faktor ini dapat berubah seiring dengan perjalanan waktu sehingga tingkat risiko untuk proyeksi *lifetime* serta gangguan kesehatan yang akan muncul pada setiap individu sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut.

Aktivitas toksikan menunjukkan semakin tinggi konsentrasi toksikan potensi gangguan kesehatan pada tubuh semakin tinggi.²⁴ Konsentrasi SO_2 dan NO_2 dapat meningkat seiring dengan meningkatnya produksi sampah di Kota Semarang yang dibuang di TPA Jatibarang. Pada tahun 2025 diprediksi meningkat menjadi 1437 ton/hari dan pada tahun 2046 mencapai 2000 ton/hari.³⁵ Pada Pemulung terpapar gas SO_2 dan NO_2 selama 24 jam sehari atau paparan maksimal karena bekerja dan bertempat tinggal di area TPA Jatibarang. Pola pajanan seperti lama, frekuensi, dan durasi pajanan berhubungan erat dengan efek toksik yang akan dialami oleh pemulung.²⁴ Gaya hidup pemulung yang kurang baik seperti merokok mampu memperburuk status kesehatan sehingga risiko kesehatan yang ditimbulkan dapat lebih berat.²⁴ Penelitian yang dilakukan oleh Katanoda et al (2011) menunjukkan adanya peningkatan risiko pada laki-laki perokok terhadap gangguan sistem pernapasan akibat polusi udara.³⁶

Manajemen Risiko

Manajemen risiko merupakan salah satu usaha untuk mengendalikan dan mengurangi risiko kesehatan yang didapatkan dari pajanan gas SO_2 dan NO_2 terhadap tubuh. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan konsentrasi SO_2 dan NO_2 aman

yang boleh terpajan oleh pemulung di TPA Jatibarang dalam waktu pajanan sepanjang hayat atau *lifetime* secara berturut-turut yaitu $83,3 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan $64,1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Jika dibandingkan dengan konsentrasi rata-rata gas SO_2 $49,78 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan NO_2 $70,66 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ yang didapatkan dari pengukuran pada 5 titik di TPA Jatibarang dinyatakan bahwa konsentrasi NO_2 di atas dari konsentrasi aman.

Strategi manajemen risiko yang dapat dilakukan dengan pengelolaan teknologi untuk mengurangi sumber pencemar. Pengelolaan teknologi yang dapat dilakukan antara lain menerapkan sistem pembuangan *sanitary landfill* karena selama ini dalam pelaksanaannya menggunakan metode *open dumping*, memaksimalkan pengelolaan sampah organik menjadi pupuk kompos dengan kapasitas maksimal sebanyak 350 ton per hari yang bekerja sama dengan PT Narpati, dan memaksimalkan pengelolaan PLTSa (Pembangkit Listrik Tenaga Sampah) yang mampu mengubah 1 ton sampah organik menjadi 33,8 kWh yang berarti dengan produksi sampah organik di TPA Jatibarang tahun 2021 sebanyak 717,97 ton mampu menghasilkan listrik sebanyak 24.267 kWh.^{2,37} Apabila timbulan sampah organik di TPA Jatibarang mampu dimanfaatkan secara optimal menjadi pupuk kompos dan diubah menjadi energi listrik melalui PLTSa maka tidak ada produksi gas SO_2 dan NO_2 dari dekomposisi anaerob sehingga mampu mengurangi risiko kesehatan akibat pajanan gas SO_2 dan NO_2 pada pemulung di TPA Jatibarang.

Sosialisasi serta edukasi kepada pemulung terkait bahaya polusi udara dan cara mengurangi pajanan risiko juga sangat diperlukan. Secara personal strategi mengurangi pajanan yang paling mudah dapat dilakukan dengan menggunakan masker bagi pemulung. Strategi manajemen risiko lainnya yang juga dapat dilakukan yaitu dengan relokasi pemukiman pemulung yang semula berada di area TPA Jatibarang ke area dengan jarak aman dari sumber polutan karena selama ini pemulung 24 jam dalam sehari terpapar polutan yang berbahaya karena bekerja dan bertempat tinggal di area TPA Jatibarang.

SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa simpulan, antara lain: 1) Konsentrasi rata-rata SO_2 dan NO_2 pada 5 titik di TPA Jatibarang secara berturut-turut yaitu $49,78 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan $70,66 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ yang menunjukkan masih di bawah baku mutu yang ditetapkan Keputusan Gubernur Jawa Tengah No. 8 Tahun 2001 tentang Baku Mutu Udara Ambien yaitu $632 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk SO_2 dan $316 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk NO_2 . Karakteristik risiko kumulatif (RQ_{kum}) untuk efek non karsinogenik untuk proyeksi *realtime* menunjukkan sebanyak 27 (35,06%) pemulung memiliki $RQ_{kum} > 1$ dan untuk proyeksi *lifetime* 76 (98,70%) pemulung memiliki $RQ_{kum} > 1$ yang berarti terdapat risiko gangguan kesehatan non karsinogenik akibat paparan gas SO_2 dan NO_2 . Nilai konsentrasi aman di udara ambien untuk keadaan selama 30 tahun kedepan adalah $83,3 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk

SO₂ dan 64,1 µg/Nm³ untuk NO₂. 2) Pengelolaan risiko dengan strategi yang tepat baik berupa kebijakan serta implementasinya sangat diperlukan agar kualitas hidup masyarakat terutama pemulung di TPA Jatibarang meningkat dengan menurunnya risiko gangguan kesehatan akibat pajanan polutan udara. 3) Hasil penelitian ini dapat dikembangkan dengan memperkirakan tingkat risiko dari beberapa parameter udara lainnya yang dihasilkan di TPA Jatibarang seperti CH₄, CO₂, NH₃, N₂O dan memperluas jangkauan kelompok rentan seperti masyarakat yang bertempat tinggal di sekitar TPA Jatibarang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Wardhana WA. Dampak Pencemaran Lingkungan. Yogyakarta: Penerbit Arya; 2004.
2. SIPSN. Data Pengelolaan Sampah dan Ruang Terbuka Hijau [Internet]. Jakarta; 2021. Available from: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
3. Saptogiri G. Landfill Management in Kota Semarang. Kemenko Kemaritiman dan Investasi RI [Internet]. 2017;1–20. Available from: https://maritim.go.id/konten/unggahan/2017/09/Gunawan_Saptogiri_Env_Agency_of_Semarang.pdf
4. Sekar Harjanti W, Hanani D Y, Astorina Y. D N. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pajanan Gas Amonia (Nh3) Pada Pemulung Di Tpa Jatibarang, Semarang. J Kesehat Masy [Internet]. 2016;4:2356–3346. Available from: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm/article/download/13698/13252>
5. Annisa N, Budiharjo MA, Sutrisno E. Pengukuran dan Pemetaan Konsentrasi Gas SO₂ dan NO₂ di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) Studi Kasus: TPA Jatibarang Semarang. J Tek Lingkung [Internet]. 2017;2(2):1–11. Available from: http://eprints.undip.ac.id/56467/1/NURUL_AN_NISA_21080113120046_JURNAL.pdf
6. Akbar RA. Pengaruh Paparan CH₄ Dan H₂S terhadap Keluhan Gangguan Pernapasan Pemulung di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo. J Ind Hyg Occup Heal. 2016;1(1):1. <https://doi.org/10.21111/jihoh.v1i1.603>
7. Bavutti M, Guidetti L, Allesina G, Libbra A, Muscio A, Pedrazzi S. Thermal Stabilization of Digesters of Biogas Plants by Means of Optimization of the Surface Radiative Properties of The Gasometer Domes. Energy Procedia [Internet]. 2014;45(February):1344–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.141>
8. Bockreis A, Steinberg I. Influence of Mechanical-Biological Waste Pre-treatment Methods on the Gas Formation in Landfills. Waste Manag J. 2005;25(4):337–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.004>
9. Koliopoulos TC, Koliopoulou G. Evaluation of optimum landfill design: Mid Auchencarroch experimental landfill emissions. WIT Trans Built Environ. 2007;91(April 2007):231–9. <https://doi.org/10.2495/OP070221>
10. Koliopoulos KT. Environmental Energy Designs Eco Health Policy and Economy. Berlin: Lap Lambert Academic Publishing; 2019.
11. Tchobanoglous G, Theisen H, Samuel V. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. New York: McGraw-Hill Book Company; 1993.
12. Im J, Lee SW, Bodrossy L, Barcelona MJ, Semrau JD. Field Application of Nitrogen and Phenylacetylene to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from Landfill Cover Soils: Effects on Microbial Community Structure. Appl Microbiol Biotechnol. 2011;89(1):189–200. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2811-0>
13. O'Brien K. Compost Operator: Best Management Practices for Commercial Scale Composting Operations. Michigan: Michigan Recycling Coalition; 2011.
14. Fitriana D, Siwiendrayanti A. Kualitas Udara dan Keluhan Sesak Napas Pemulung di Tempat Pembuangan Akhir. Higeia J Public Heal Dev. 2019;3(3):357–68.
15. Anastasopolos AT, Sofowote UM, Hopke PK, Rouleau M, Shin T, Dheri A, et al. Air quality in Canadian Port Cities after Regulation of Low-sulphur Marine Fuel in the North American Emissions Control Area. Sci Total Environ [Internet]. 2021;791:147949. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147949>
16. Muziansyah D, Sulistyorini R, Sebayang S. Model Emisi Gas Buangan Kendaraan Bermotor akibat Aktivitas Transportasi (Studi Kasus: Terminal Pasar Bawah Ramayana Kota Bandar Lampung). J Rekayasa Sipil dan Desain. 2015;3(1):57–70.
17. Nurhisanah S, Hasyim H. Environmental Health Risk Assessment of Sulfur Dioxide (SO₂) at Workers Around in Combined Cycle Power Plant (CCPP). Heliyon. 2022;8(5):0–5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09388>
18. Alchamdani A. NO₂ and SO₂ Exposure to Gas Station Workers Health Risk in Kendari City. J Kesehat Lingkung. 2019;11(4):319. <https://doi.org/10.20473/jkl.v11i4.2019.319-330>
19. Riviwanto M, Sani FM. Analisis Risiko Kesehatan Paparan Gas Nitrogen Dioksida (NO₂) pada Petugas Parkir di Basement Plaza Andalas. J Kesehat. 2017;8(3):441. <https://doi.org/10.26630/jk.v8i3.636>
20. EPA. US. Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides – Health Criteria (Final Report, Dec 2017). Wahington; 2017.
21. Huang S, Li H, Wang M, Qian Y, Steenland K, Caudle WM, et al. Long-term Exposure to Nitrogen Dioxide and Mortality: A Systematic Review and Meta-analysis. Sci Total Environ. 2021;776(145968).

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145968>
22. Meng X, Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Milojevic A, et al. Short Term Associations of Ambient Nitrogen Dioxide with Daily Total, Cardiovascular, and Respiratory Mortality: Multilocation Analysis in 398 Cities. *BMJ*. 2021;372(2). <https://doi.org/10.1136/bmj.n534>
 23. Putri RT, Joko T, Dangiran HL. Hubungan Karakteristik Pemulung Dan Penggunaan Alat Pelindung Pernapasan Dengan Keluhan Gangguan Pernapasan Pada Pemulung Di Tpa Jatibarang, Semarang. *J Kesehat Masy*. 2017;5(5):838–49.
 24. Kurniawidjaja LM, Lestari F, Tejamaya M, Ramdhan DH. Konsep Dasar Toksikologi Industri. *Fkm Ui*. 2021. 54–73 p.
 25. Guyton CA, Hall JE. *Buku Ajar Fisiologi Kedokteran*. 11th ed. Jakarta: EGC; 2008.
 26. Helmy R. Hubungan Paparan Debu dan Karakteristik Individu dengan Status Faal Paru Pedagang di Sekitar Kawasan Industri Gresik. *J Kesehatan Lingkungan*. 2019;11(2):133–40.
 27. Saminan. TINJAUAN PUSTAKA Efek Kelebihan Berat Badan terhadap Pernafasan Saminan. *J Kedokt Naggroe Med*. 2019;2(4):27–33.
 28. Faisal HD, Susanto AD. Peran Masker/Respirator dalam Pencegahan Dampak Kesehatan Paru Akibat Polusi Udara. *J Respirasi*. 2019;3(1):18. <https://doi.org/10.20473/jr.v3-I.1.2017.18-25>
 29. Tipa EW, Kawatu PA, Kalesaran AFC. Hubungan Kebiasaan Merokok Dengan Kapasitas Vital Paru Pada Penambang Emas Di Desa Tatelu Kabupaten Minahasa Uatara. *J KESMAS*. 2021;10(3):140–6.
 30. Istantinova DB, Hadiwidodo M, Handayani DS. Pengaruh Kecepatan Angin, Kelembaban dan Suhu Udara Terhadap Konsentrasi Gas Pencemar Sulfur Dioksida (SO₂) dalam Udara Ambien di Sekitar PT. Inti General Yaja Steel Semarang. *J Tek Lingkungan* [Internet]. 2013;2(1):1–10. Available from: <http://www.depkes.go.id>
 31. Sarwono E, Wijayanto E, Huda H, Harrits RF, Zain IF. Dispersi SO₂ Dan NO₂ Dari Cerobong Auxiliary Boiler Industri Methanol Pt Kmi Menggunakan Gaussian Plum Model Aermod Di Kota Bontang Kalimantan Timur Indonesia. *J Chemurg*. 2022;6(200):109–17. <https://doi.org/10.30872/cmg.v6i2.9560>
 32. Wang L, Liu C, Meng X, Niu Y, Lin Z, Liu Y, et al. Associations between short-term exposure to ambient sulfur dioxide and increased cause-specific mortality in 272 Chinese cities. *Environ Int* [Internet]. 2018;117(April):33–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.019>
 33. Hamidi F. Analisis Kualitas Udara Dan Keluhan Gangguan Pernapasan Pada Pemulung di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). *J Insa Cendekia*. 2023;10(1):66–80. <https://doi.org/10.35874/jic.v10i1.1158>
 34. Direktorat Jendral PP dan PL. *Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 2012.
 35. Bappeda. *Buku Putih Semarang Kelola Sampah*. Semarang: Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kota Semarang; 2020.
 36. Katanoda K, Sobue T, Satoh H, Tajima K, Suzuki T, Nakatsuka H, et al. An Association Between Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Mortality from Lung Cancer and Respiratory Diseases in Japan. *J Epidemiol*. 2011;21(2):132–43. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20100098>
 37. Santoso DEB, Gunawan. Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah dengan Teknologi Dry Anaerobic Conversion. *Sains Nas dan Teknol*. 2011;1 (1):25–9.



©2024. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.