

Analisis Resiko Kesehatan Paru-Paru Akibat Paparan PM_{2.5} pada Pekerja di TPA Sarimukti Kabupaten Bandung Barat

Athifa Marsha Tarmidi¹, Katharina Oginawati²

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Perencanaan dan Arsitektur, Universitas Winaya Mukti.

² Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.

e-mail: athifamarsha@gmail.com

Diterima: 15-07-2026

Direview: 16-07-2026

Diterbitkan: 10-08-2026

Hak Cipta © 2025 oleh Penulis (dkk) dan Geoplanart

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstrak

Pengelolaan sampah secara controlled landfill di TPA Sarimukti menyebabkan paparan partikel halus (PM_{2.5}) yang berpotensi membahayakan kesehatan paru-paru pekerja. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko non-karsinogenik paparan PM_{2.5} serta hubungannya dengan fungsi paru, khususnya nilai FEV₁ dan FVC. Studi ini menggunakan desain epidemiologi cross-sectional yang melibatkan 31 pekerja TPA dan 10 orang kelompok kontrol. Konsentrasi PM_{2.5} terhirup diukur menggunakan alat personal sampler (PurpleAir II SD) selama 8 jam kerja selama 6 hari, dan intake dihitung berdasarkan berat badan, durasi paparan harian, dan frekuensi kerja. Pemeriksaan fungsi paru dilakukan dengan spirometri. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh responden memiliki nilai Hazard Quotient (HQ) < 1, yang mengindikasikan bahwa paparan PM_{2.5} masih berada dalam tingkat aman secara non-karsinogenik. Namun demikian, terdapat korelasi negatif signifikan antara intake PM_{2.5} dengan FVC% ($r_s = -0,364$; $p = 0,019$) dan FEV_{1.0}% ($r_s = -0,472$; $p = 0,002$), menunjukkan bahwa semakin tinggi paparan, semakin rendah kapasitas paru yang dimiliki pekerja. Selain itu, kebiasaan merokok juga terbukti berpengaruh negatif signifikan terhadap FEV₁ dan FVC ($p < 0,005$). Temuan ini menegaskan bahwa meskipun tingkat paparan PM_{2.5} tidak melebihi ambang batas toksikologi, paparan kronis tetap berdampak terhadap fungsi paru, terlebih jika dikombinasikan dengan faktor risiko lain seperti kebiasaan merokok. Oleh karena itu, upaya pengendalian paparan serta edukasi gaya hidup sehat sangat diperlukan bagi pekerja TPA.

Kata Kunci: tempat pemrosesan akhir (TPA); PM_{2.5}; *controlled landfill*; fungsi paru-paru; analisis risiko kesehatan

Pendahuluan

Pengelolaan sampah padat merupakan tantangan global yang mendesak, terutama di wilayah yang mengalami urbanisasi cepat di mana tempat pemrosesan akhir (TPA) masih menjadi metode utama pembuangan sampah (Nathanson, 2024). Di Indonesia, TPA Sarimukti di Kabupaten Bandung Barat menjadi contoh nyata dampak

dari praktik pengelolaan sampah yang tidak berkelanjutan. TPA sarimukti merupakan TPA Sarimukti berfungsi sebagai satu-satunya lokasi pemrosesan akhir sampah utama yang melayani wilayah Bandung Raya dan sekitarnya. Pada data yang diambil pada proyek (Penelitian Unggulan ITB, 2024) sebelum pembatasan tahun 2024, TPA ini beroperasi melebihi kapasitas dengan perkiraan penerimaan sampah sebanyak 347 kali perjalanan angkutan sampah per hari.

Metode *controlled landfill* yang digunakan di TPA Sarimukti dicirikan oleh penimbunan sampah yang dilakukan di dalam tanah. Controlled landfill merupakan sistem pengelolaan sampah dengan cara membuang dan menumpuk sampah di lokasi cekung, memadatkannya dan kemudian menimbungnya dengan tanah selapis dengan selapis sehingga sampah tidak berada di ruang terbuka serta tidak menimbulkan bau yang bisa menimbulkan berbagai macam penyakit. Manfaat dari Controlled Landfill ini adalah dapat memperkecil dampak yang diberikan kepada lingkungan, lahan dapat digunakan setelah selesai dipakai serta estetika lingkungan yang cukup baik.

Pembuangan sampah tanpa rekayasa teknik yang memadai, tanpa pemadatan yang tepat, penutup harian, atau sistem pengumpulan gas ditambah dengan pernah terjadi kebakaran TPA Sarimukti akibat pembakaran spontan sampah organik dan praktik pembakaran sengaja, menghasilkan campuran kompleks polutan udara berbahaya. Di antara polutan tersebut, partikel halus ($PM_{2.5}$) merupakan ancaman kesehatan yang sangat serius karena diameter aerodinamisnya $\leq 2,5$ mikrometer, yang memungkinkan penetrasi dalam ke sistem pernapasan manusia. Partikel ini berasal dari berbagai sumber di lingkungan TPA, termasuk gangguan mekanis sampah selama pemadatan dan pengangkutan, erosi oleh angin pada tumpukan sampah yang tidak tertutup, proses pembakaran tidak sempurna saat kebakaran, dan pembentukan sekunder melalui reaksi atmosfer gas prekursor (Hroncová et al., 2020; Jawwad et al., 2023; Muthmainnah & Adris, 2020).

Studi epidemiologi secara konsisten menunjukkan bahwa paparan kronis $PM_{2.5}$ yang termasuk partikel halus. Partikel berukuran 2 hingga 5 mikrometer dikenal sebagai partikel terespirasi yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Partikulat dengan ukuran 2 - 5 μm akan terendapkan di alveoli. Dikaitkan dengan berbagai dampak kesehatan merugikan, terutama pada sistem pernapasan dan kardiovaskular yang telah dikaitkan dengan penyakit pernapasan dan kardiovaskular kronis (Thangavel dkk., 2022; Zannaria dkk., 2009). Dengan tingkat $PM_{2.5}$ di Sarimukti berulang kali melebihi standar kualitas udara ambien Indonesia ($55 \mu g/m^3$ menurut (Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22, 2021)) dan jauh melampaui pedoman WHO yang lebih ketat ($5 \mu g/m^3$), pekerja di lokasi ini menghadapi risiko kesehatan kerja yang serius namun belum cukup diteliti.

Emisi $PM_{2.5}$ di TPA berasal dari berbagai sumber: pemadatan sampah mekanis, alat berat berbahan bakar diesel, debu yang terbawa angin, dan pembakaran spontan sampah organik (Hroncová dkk., 2020). Partikel-partikel ini, dengan diameter $\leq 2,5 \mu m$, menghindari pertahanan alami saluran pernapasan, mengendap jauh di alveoli, dan memicu peradangan sistemik. Paparan jangka panjang dikaitkan dengan penurunan fungsi paru, eksaserbasi asma, dan peningkatan angka kematian akibat penyakit kardiopulmoner (Azizah, 2019; EPA (Environmental Protection Agency), 2014; Sompornrattanaphan dkk., 2020). Meskipun ada risiko ini, pekerja

TPA di negara berpenghasilan rendah dan menengah (LMICs) seperti Indonesia sering kali tidak dilengkapi dengan alat pelindung diri (APD) dan tidak termasuk dalam surveilans kesehatan rutin (Abidin dkk., 2023).

Beban kesehatan ini sangat berat bagi pekerja TPA yang terpapar selama 8-12 jam per hari, sering kali tanpa alat pelindung diri (APD) yang memadai. Nilai ambang batas (NAB) paparan $PM_{2.5}$ terhirup di lingkungan kerja ditetapkan sebesar 3 mg/m^3 untuk waktu paparan 8 jam/hari atau 40 jam/minggu. Sebuah studi kohort baru-baru ini pada pekerja pengelola sampah di Indonesia mencatat peningkatan risiko 2,3 kali lipat (95% CI: 1,7-3,1) bronkitis kronis di antara mereka yang terpapar $PM_{2.5} > 50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ dibandingkan dengan staf administrasi (Abidin dkk., 2023; Azizah, 2019). Temuan ini menegaskan perlunya langkah-langkah pengendalian paparan yang lebih baik di lokasi controlled landfill seperti TPA Sarimukti.

Penelitian sebelumnya telah mengukur $PM_{2.5}$ dari TPA dalam lingkungan terkontrol (Liu dkk., 2016), tetapi masih terdapat beberapa celah penting seperti sebagian besar studi mengandalkan monitor ambien stasioner, mengabaikan variabilitas paparan individu di antara pekerja dengan tugas berbeda. Meskipun spirometri adalah metode yang baik untuk menilai fungsi paru, hanya sedikit studi di TPA yang menghubungkan metriknya (misalnya, rasio FEV_1/FVC) dengan tingkat paparan $PM_{2.5}$ langsung (Jat, 2013).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko kesehatan paru-paru akibat paparan $PM_{2.5}$ pada pekerja di TPA Sarimukti. Fokus utama penelitian meliputi pengukuran konsentrasi $PM_{2.5}$ yang terhirup oleh responden menggunakan alat personal sampler, perhitungan nilai intake paparan harian, serta analisis risiko non-karsinogenik melalui nilai Hazard Quotient (HQ). Selain itu, penelitian ini mengukur kondisi kapasitas paru-paru responden menggunakan spirometri untuk menilai dampak fungsional terhadap sistem pernapasan. Perbandingan risiko gangguan fungsi paru antara kelompok terpajan dan tidak terpajan dianalisis menggunakan Odds Ratio (OR), guna mengetahui besarnya kemungkinan terjadinya gangguan paru akibat paparan $PM_{2.5}$.

Tinjauan Pustaka

Particulate Matter berukuran $\leq 2,5 \text{ } \mu\text{m}$ ($PM_{2.5}$) merupakan salah satu polutan udara yang paling berbahaya karena mampu menembus saluran pernapasan hingga mencapai alveoli. Di lingkungan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), $PM_{2.5}$ dihasilkan dari aktivitas pemadatan dan pembongkaran sampah, pergerakan alat berat berbahan bakar diesel, resuspensi debu akibat lalu lintas kendaraan, serta pembakaran spontan maupun pembakaran terbuka pada timbunan sampah. Selain $PM_{2.5}$, proses dekomposisi sampah juga menghasilkan polutan udara lain seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan senyawa organik volatil (VOC), yang secara bersama-sama berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara di sekitar TPA (Fang et al., 2012; Liu et al., 2016; Sonibare et al., 2019).

Paparan $PM_{2.5}$ di lingkungan kerja perlu mendapat perhatian karena partikel ini dapat mencapai alveoli, memicu stres oksidatif, inflamasi, dan kerusakan jaringan paru yang berujung pada penurunan fungsi paru serta peningkatan risiko penyakit pernapasan kronis. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan jangka

panjang terhadap PM_{2.5} berkaitan dengan penurunan parameter spirometri, seperti *Forced Vital Capacity* (FVC) dan *Forced Expiratory Volume in one second* (FEV₁). Oleh karena itu, pemantauan paparan PM_{2.5} pada pekerja TPA menjadi penting, mengingat tingginya intensitas dan durasi pajanan dibandingkan masyarakat umum, meskipun telah tersedia baku mutu udara ambien dan nilai ambang batas paparan di lingkungan kerja sebagai acuan penilaian risiko (Abidin et al., 2023; EPA, 2014; Sompornrattanaphan et al., 2020; Thangavel et al., 2022).

Kondisi meteorologi merupakan faktor penting yang memengaruhi konsentrasi dan dispersi polutan udara di atmosfer. Unsur-unsur seperti kecepatan dan arah angin, suhu, kelembapan, tekanan udara, radiasi matahari, serta karakteristik topografi berperan dalam menentukan pola penyebaran, transformasi, dan deposisi polutan. Kecepatan dan arah angin mengendalikan transport polutan dari sumber emisi, sedangkan suhu dan radiasi matahari memengaruhi laju reaksi kimia di atmosfer. Di sisi lain, kelembapan udara dapat meningkatkan deposisi partikulat melalui pembentukan partikel yang lebih besar. Oleh karena itu, variasi kondisi meteorologi dapat menyebabkan perubahan konsentrasi PM_{2.5} di lingkungan, sehingga faktor-faktor tersebut perlu dipertimbangkan dalam evaluasi paparan dan analisis risiko kesehatan akibat pencemaran udara (Oke, 2002; Turyanti, 2011; Yerramilli et al., 2011).

PurpleAir II Air Quality Sensor merupakan sensor kualitas udara berbasis laser light scattering yang digunakan untuk mengukur konsentrasi partikulat PM_{1.0}, PM_{2.5}, dan PM₁₀ secara *real-time*, serta merekam suhu dan kelembapan relatif lingkungan. Sensor ini bekerja dengan memancarkan sinar laser ke partikel yang masuk ke ruang pengukuran, kemudian mengukur intensitas cahaya yang dihamburkan menggunakan *photodetector* untuk memperkirakan konsentrasi partikulat berukuran sekitar 0,3–2,5 µm. Perangkat ini dilengkapi sistem aliran udara dan konektivitas WiFi sehingga hasil pengukuran dapat dikirim dan disimpan secara *real-time*, menjadikannya sebagai instrumen yang praktis dan banyak digunakan dalam pemantauan kualitas udara pada berbagai lingkungan, termasuk area industri dan tempat pemrosesan akhir sampah (Berryman, 2024; Kusumo, 2025).

Spirometri merupakan metode standar yang digunakan untuk menilai fungsi paru secara objektif dengan mengukur volume dan laju aliran udara selama manuver ekspirasi paksa. Parameter utama yang dihasilkan adalah Forced Vital Capacity (FVC), yaitu volume udara maksimum yang dapat dihembuskan setelah inspirasi penuh, dan Forced Expiratory Volume in One Second (FEV₁), yaitu volume udara yang dikeluarkan pada detik pertama ekspirasi paksa. Nilai FVC dan FEV₁ dibandingkan dengan nilai prediksi berdasarkan usia, jenis kelamin, dan tinggi badan sesuai rekomendasi American Thoracic Society (ATS) untuk mengidentifikasi gangguan fungsi paru. Penurunan FVC umumnya mengindikasikan gangguan restriktif, sedangkan penurunan FEV₁ menunjukkan adanya gangguan obstruktif, sehingga kedua parameter tersebut banyak digunakan dalam studi epidemiologi untuk mengevaluasi dampak paparan polutan udara terhadap fungsi paru (ATS, 1987; Jat, 2013; Mengkidi & Nurjazuli, 2006).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pekerja di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan kelompok yang rentan mengalami gangguan kesehatan akibat paparan partikulat dan polutan udara lainnya. Studi di India

dan Botswana melaporkan tingginya prevalensi keluhan respirasi, seperti batuk, sesak napas, iritasi saluran pernapasan, serta penurunan fungsi paru pada pekerja TPA dibandingkan kelompok kontrol. Di Indonesia, penelitian di TPA Pinayungan menunjukkan bahwa paparan $PM_{2.5}$ pada sebagian pekerja telah menghasilkan nilai *Hazard Quotient* (HQ) > 1 , yang mengindikasikan adanya risiko kesehatan non-karsinogenik, terutama pada pekerja dengan durasi paparan yang lebih lama. Selain gangguan respirasi, pekerja TPA juga dilaporkan berisiko mengalami gangguan kulit, pencernaan, muskuloskeletal, hingga masalah psikososial akibat kondisi kerja yang tidak memadai (Cointreau, 2006; Gwisai et al., 2014; Ray et al., 2005; Abidin et al., 2023).

Selain faktor paparan lingkungan, beberapa penelitian menunjukkan bahwa karakteristik individu, seperti kebiasaan merokok, masa kerja, riwayat penyakit, status gizi, dan penggunaan alat pelindung diri (APD), turut memengaruhi kondisi fungsi paru pekerja (Marpaung, 2012; Aulia & Azizah, 2015; Hambali et al., 2024; Raihanah et al., 2025). Namun, hasil penelitian mengenai pengaruh faktor-faktor tersebut masih bervariasi antar populasi dan lokasi penelitian. Di sisi lain, sebagian besar studi terdahulu berfokus pada pekerja informal atau hanya mengevaluasi konsentrasi $PM_{2.5}$ maupun analisis risiko kesehatan secara terpisah (Ray et al., 2005; Gwisai et al., 2014; Abidin et al., 2023). Penelitian yang mengintegrasikan pengukuran paparan personal $PM_{2.5}$, analisis risiko non-karsinogenik (*Hazard Quotient*), serta evaluasi fungsi paru menggunakan spirometri pada pekerja formal TPA masih sangat terbatas (Abidin et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui studi pada pekerja formal di TPA Sarimukti dengan mempertimbangkan faktor-faktor individu yang berpotensi memengaruhi fungsi paru.

Metode Penelitian

Jenis penelitian ini merupakan penelitian epidemiologi dengan studi *cross sectional* dimana pengukuran konsentrasi polutan $PM_{2.5}$ terespirasi dan fungsi paru-paru dilakukan pada waktu tertentu berdasarkan observasi secara langsung maupun tidak. Pengambilan data konsentrasi polutan partikulat $PM_{2.5}$ dilakukan di lingkungan TPA Sarimukti, Desa Sarimukti, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat yang merupakan tempat beraktivitasnya pekerja di TPA. Populasi penelitian yaitu pekerja di dalam TPA Sarimukti yang berjumlah 31 Orang. Teknik pengambilan sampel menggunakan Convenience Sampling. Pada penelitian ini variabel terikat adalah fungsi paru dan variabel bebas adalah $PM_{2.5}$ terhirup, masa kerja, riwayat pekerjaan, penggunaan alat pelindung pernapasan atau masker, kebiasaan olah raga dan kebiasaan merokok. Penelitian ini telah mendapat persetujuan dari Komite Etik Penelitian Universitas Padjadjaran dengan Nomor 904/UN6.KEP/EC/2024

Pengambilan data dilakukan dengan cara wawancara, pengukuran $PM_{2.5}$ terhirup, serta pemeriksaan fungsi paru. Wawancara dilakukan pada pekerja menggunakan kuesioner tentang karakteristik pekerja dan faktor perilaku. Seperti yang sudah dilakukan pada penelitian (FACE-UP Hive Consortium, 2023) pengukuran $PM_{2.5}$ terhirup menggunakan menggunakan alat *PurpleAir SD II* sebagai personal sampler selama 8 jam 6 hari kerja. Tujuannya untuk mengetahui seberapa tinggi kadar debu $PM_{2.5}$ yang terhirup oleh pekerja TPA Sarimukti di 4 wilayah kerja berbeda. Area A (area kantor TPA Sarimukti), area B (area manuver), area C (area gudang & bengkel), dan area D (IPAL). Pemeriksaan fungsi paru menggunakan spirometer (Bakhtiar & Tantri, 2019).

Karakterisasi risiko digunakan untuk menentukan paparan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dapat menimbulkan risiko gangguan kesehatan pada kelompok masyarakat di sekitar lokasi berdasarkan nilai *intake* yang diperoleh. Penentuan tingkat risiko (RQ) dilakukan dengan membandingkan *intake* dengan konsentrasi agen risiko (RfC). Berikut rumus dalam metode ARKL yang digunakan dalam penelitian :

Penilaian Intake (Dirjen PP&PL, 2012):

$$I = \frac{C \times R \times t_E \times F_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}} \quad (1)$$

Perhitungan Tingkat Bahaya Non Karsinogen :

$$RfD \text{ inhalation} = \frac{RfC \times R \times t_E \times F_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}} \quad (2)$$

$$\text{Hazard Quotient (HQ)} = \frac{I}{RfD} \quad (3)$$

Dengan :

- I = jumlah konsentrasi $PM_{2.5}$ yang masuk ke dalam tubuh (mg/kg.hari)
- C = konsentrasi $PM_{2.5}$ pada medium udara (mg/m³)
- R = laju inhalasi atau banyaknya volume udara setiap jam yang terhirup (nilai *default* orang dewasa sebesar 0,83 m³/jam)
- t_E = Waktu pajanan setiap harinya (jam/hari)
- f_E = jumlah hari terjadi pajanan setiap tahun (hari/tahun)
- D_t = Durasi pajanan, jumlah tahun terjadi pajanan (tahun)
- W_b = Berat badan responden (kg)
- t_{avg} = periode waktu rata-rata ($D_t \times 365$ hari/tahun untuk non karsinogen)
- HQ = *Hazard Quotient*, tingkat bahaya efek dari pajanan $PM_{2.5}$
- RfC = *Reference Concentration* (nilai ambang batas) 35 µg/m³
- RfD = *Reference Dose*

Selanjutnya nilai OR yang merupakan ukuran asosiasi pajanan (faktor risiko) dengan kejadian penyakit yang dihitung dari angka kejadian penyakit pada kelompok berisiko (terpapar faktor risiko) dibanding dengan angka kejadian penyakit pada kelompok yang tidak berisiko (tidak terpapar faktor risiko) dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut ini (Soemirat, 2013) :

$$\text{Odds Ratio (OR)} = \frac{a \times d}{b \times c} \quad (4)$$

Dengan:

Tabel 1. Matriks 4x4 untuk perhitungan OR

	Positif gangguan sistem pernapasan	Negatif gangguan sistem pernapasan
Terpapar	a	b
Tidak Terpapar	c	d

Sumber: (Soemirat, 2013)

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Data lingkungan

Tabel 2 merupakan rata-rata hasil pengukuran data lingkungan di 4 lokasi di TPA Sarimukti yang diukur selama 6 hari.

Tabel 2. Rata-rata hasil pengukuran data lingkungan

Lokasi	Suhu (°C)	Tekanan (mmHg)	Kelembapan (%)	Kecepatan Angin (m/s)
A	28,8	968,41	72,03	2,6
B	30,6	970,13	72,08	4,2
C	30,2	972,34	71,34	3,1
D	28,8	975,41	72,46	2,4

(Sumber: Pengukuran lapangan, 2024)

Berdasarkan data pengukuran di empat area TPA Sarimukti, kondisi meteorologi menunjukkan suhu relatif stabil (28,8–30,6°C) dengan lokasi B paling tinggi (30,6°C) karena merupakan area terbuka. Tekanan udara bervariasi (968,41–975,41 mmHg). Kelembapan udara konsisten cukup tinggi (71–72%), menunjukkan udara lembap yang khas saat awal musim hujan karena pengukuran dilakukan bulan November. Kecepatan angin sedang (2,4–4,2 m/s), dengan lokasi B paling berangin (4,2 m/s). Variasi parameter meteorologi yang kecil menunjukkan kondisi udara relatif stabil. Kondisi ini membatasi dispersi polutan dari sumber eksternal, sehingga PM_{2.5} didominasi oleh aktivitas lokal seperti operasional TPA. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Hu & Yoshie, 2020) yang menemukan bahwa kondisi atmosfer stabil cenderung meningkatkan konsentrasi PM_{2.5} lokal. PM_{2.5} di lokasi studi terutama berasal dari aktivitas pekerja TPA (bukannya transportasi jarak jauh), didukung oleh kondisi meteorologi yang stabil (Abidin dkk., 2023).

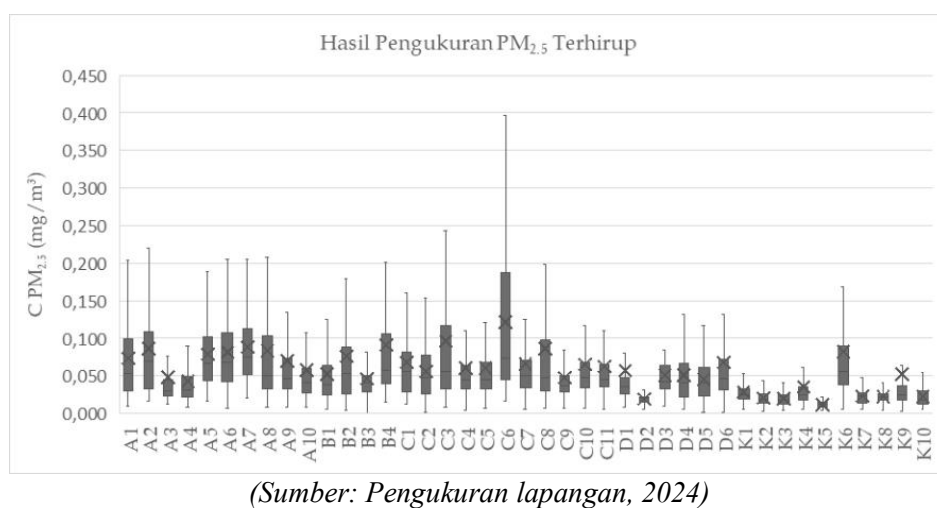
Konsentrasi PM_{2.5} terhirup

Pengukuran kadar PM_{2.5} terdiri atas pengukuran konsentrasi PM_{2.5} terhirup oleh pekerja selama 8 jam 6 hari kerja. Hasil pengukuran PM_{2.5} terhirup pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa tidak ada pekerja yang memiliki kadar PM_{2.5} terhirup melebihi NAB > 3 mg/m³. Meskipun seluruh konsentrasi PM_{2.5} terhirup masih jauh di bawah Nilai Ambang Batas (3 mg/m³), perbedaan antar area menunjukkan variasi paparan berdasarkan kondisi

lingkungan kerja. Area C mencatat konsentrasi tertinggi karena aktivitas padat seperti keluar-masuk alat berat, penggunaan genset, kondisi semi terbuka, dan pembangunan di sekitar lokasi. Area A juga tinggi akibat antrean truk sampah di gerbang utama. Sebaliknya, Area B memiliki konsentrasi lebih rendah karena operator bekerja dalam kendaraan tertutup dan mesin dimatikan saat menurunkan sampah.

Area D menunjukkan konsentrasi terendah hal ini sejalan dengan karakteristik area yang relatif terisolasi dari aktivitas padat kendaraan bermotor maupun penurunan sampah. Meskipun seluruh konsentrasi masih dalam batas aman, perbedaan lingkungan fisik, intensitas aktivitas kendaraan, dan tata ruang sangat memengaruhi tingkat paparan $PM_{2.5}$ di masing-masing area kerja.

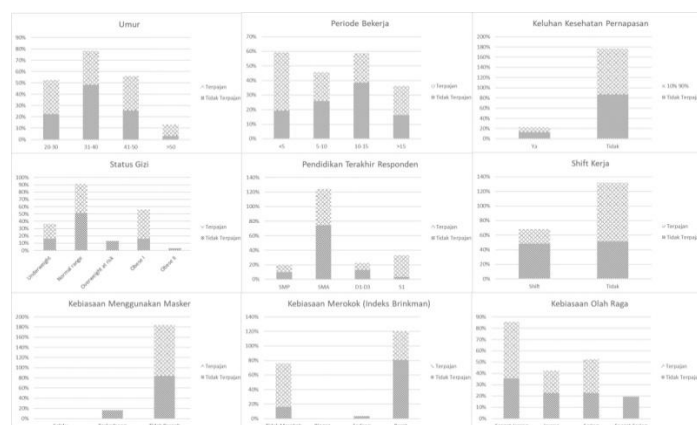
Gambar 1. Hasil pengukuran $PM_{2.5}$ terhirup pada pekerja TPA Sarimukti dan kelompok kontrol



Hasil data responden dari kuesioner

Pada **Gambar 2** menyajikan karakteristik responden penelitian ini yang berjumlah 41 orang responden terpapar dan tidak terpapar hasil wawancara dan pengisian kuisisioner

Gambar 2. Karakteristik responden penelitian kebiasaan dan data pribadi



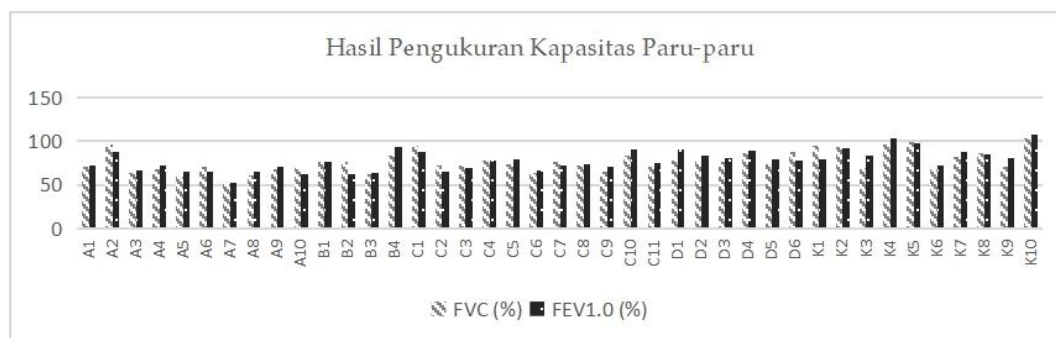
(Sumber: Kuesioner dan wawancara, 2024)

Data menunjukkan bahwa mayoritas pekerja, baik yang terpajan maupun tidak, tidak pernah menggunakan masker (84-100%), meningkatkan risiko paparan $PM_{2.5}$. Kelompok terpajan didominasi perokok berat (81% dan 40% pada kontrol), yang berpotensi memperparah dampak polusi pada paru-paru. Sebagian besar pekerja di kedua kelompok jarang berolahraga (35-50% "sangat jarang"), dan 16-40% mengalami obesitas, faktor yang dapat memperburuk gangguan pernapasan. Meski keluhan pernapasan saat ini relatif rendah (10-13%), pekerja terpajan didominasi usia 31-40 tahun dengan masa kerja 10-15 tahun, mengindikasikan risiko paparan kronis. Tingkat pendidikan yang umumnya SMA (74%) juga berpotensi memengaruhi pemahaman akan bahaya kesehatan. Temuan ini menekankan pentingnya program penggunaan APD wajib, intervensi gaya hidup, dan pemantauan kesehatan rutin, terutama bagi pekerja dengan paparan jangka panjang.

Hasil Pengukuran Kapasitas Paru-Paru

Pengukuran kapasitas paru-paru dilakukan dengan menggunakan metode spirometri parameter FEV1.0 dan FVC, yang dibandingkan dengan nilai prediksi berdasarkan rekomendasi (American Thoracic Society (ATS), 1987). Dari **Gambar 3**, menunjukkan bahwa nilai FVC pada kelompok terpapar berkisar antara 60,43% hingga 96,58%, sedangkan pada kelompok tidak terpapar berkisar antara 68,65% hingga 103,35%, dengan batas normal FVC >80%. Untuk FEV1.0, kelompok terpapar memiliki nilai antara 52,95% hingga 93,52%, dan kelompok tidak terpapar antara 72,22% hingga 108,37%, dengan nilai normal FEV1.0 >70%. Berdasarkan nilai tersebut, diketahui bahwa 80% responden kelompok terpapar mengalami gangguan fungsi paru (restriktif, obstruktif, atau kombinasi), sementara hanya 20% dari kelompok tidak terpapar yang mengalami gangguan.

Gambar 3. Hasil pengukuran kapasitas paru-paru pekerja terpapar dan tidak terpapar



(Sumber: Pengukuran Paru-Paru, 2024)

Hasil analisis statistik menunjukkan adanya hubungan negatif yang signifikan antara tingkat paparan $PM_{2.5}$ dengan kapasitas paru-paru, dengan nilai korelasi sebesar $r = -0,391$ untuk FVC dan $r = -0,420$ untuk FEV1.0 ($p < 0,05$). Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi paparan $PM_{2.5}$, semakin rendah nilai FVC dan FEV1.0, yang mencerminkan penurunan kapasitas vital paru dan fungsi ekspirasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya (Azizah, 2019; Zhu et al., 2023) yang menyatakan bahwa paparan $PM_{2.5}$, baik dalam jangka pendek maupun panjang, dapat menyebabkan inflamasi, stres oksidatif, serta penyempitan saluran napas, khususnya pada penderita PPOK (Penyakit Paru Obstruktif Kronis). Penurunan yang lebih besar pada FEV1.0 dibandingkan FVC menunjukkan dampak yang lebih kuat terhadap fungsi ekspirasi, yang dapat

memperburuk rasio FEV1.0/FVC sebagai indikator obstruksi saluran napas. Dengan demikian, hasil ini memperkuat bukti bahwa paparan PM_{2.5} berperan penting dalam menurunkan kesehatan dan fungsi paru-paru.

Penilaian resiko kesehatan paparan PM_{2.5}

Penilaian dosis-respon

Konsentrasi Acuan (RfD) PM_{2.5} belum tercantum dalam daftar Sistem Informasi Tingkat Risiko Terpadu (IRIS) yang diterbitkan oleh Badan Perlindungan Lingkungan (EPA) atau tabel Tingkat Risiko Minimum (MRL) yang diterbitkan oleh Badan Registrasi Zat Beracun dan Penyakit (ATSDR), sehingga nilai RfD untuk PM_{2.5} dalam penelitian ini berasal dari Standar Kualitas Udara Ambien Nasional (NAAQS), yaitu 35 µg/m³. Sebagaimana ditentukan, nilai RfD untuk menghitung paparan risiko terhadap PM_{2.5} adalah 0,01 mg/kg/hari (Abidin dkk., 2023; Novirsa & Achmadi, 2012).

Penilaian paparan dan perhitungan risiko kesehatan

Pengoperasian TPA memiliki dampak yang luas terhadap kesehatan manusia, lingkungan, dan aspek sosial ekonomi. Keberadaan TPA dapat memberikan dampak positif, seperti tersedianya lapangan kerja dan pengelolaan limbah terpusat, namun juga menimbulkan dampak negatif yang signifikan. Salah satu dampak negatif yang utama adalah munculnya polutan udara seperti partikulat halus PM_{2.5}. Polutan ini dihasilkan dari berbagai aktivitas di TPA, seperti proses angkut-angkut sampah, emisi dari kendaraan pengangkut dan alat berat, serta proses pengolahan sampah. Partikel PM_{2.5} dapat terhirup melalui hidung dan mulut, lalu masuk ke saluran pernapasan dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, terutama pada sistem paru-paru (Nurlaili & Hendrasarie, 2023; Yusmiati dkk., 2017).

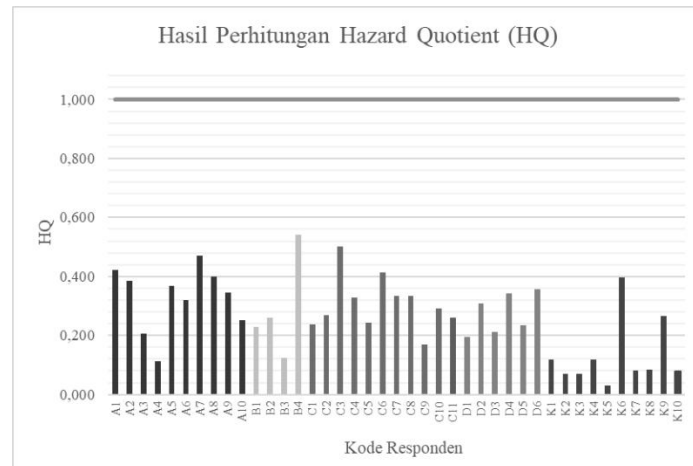
Nilai intake responden kelompok terpapar di TPA Sarimukti dipengaruhi oleh konsentrasi PM_{2.5} yang terpapar selama bekerja. Faktor lain yang turut berperan meliputi lama bekerja (tahun), berat badan, durasi paparan harian, dan frekuensi paparan per tahun (EPA, 2024). Dosis harian rata-rata umumnya dinyatakan dalam satuan massa kontaminan per kilogram berat badan per satuan waktu. Rentang nilai intake (I) pada kelompok terpapar adalah 0,0011–0,0052 mg/kg.hari, sedangkan pada kelompok kontrol (K) yang tidak terpapar, rentangnya lebih rendah, yaitu 0,0003–0,0038 mg/kg.hari.

Nilai RfD yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 0,01 mg/kg.hari, sesuai dengan standar acuan yang berlaku. Berdasarkan kriteria penilaian risiko, jika nilai HQ > 1 menunjukkan paparan berisiko terhadap kesehatan pekerja, sedangkan HQ ≤ 1 mengindikasikan tingkat paparan yang relatif aman (Abidin dkk., 2023; EPA (Environmental Protection Agency), 2014; Novirsa & Achmadi, 2012; US EPA, 2022).

Dilihat di **Gambar 4**. Hasil analisis Berdasarkan analisis statistik, seluruh responden memiliki nilai Hazard Quotient (HQ) PM_{2.5} < 1, menunjukkan bahwa paparan saat ini belum melebihi ambang risiko non-karsinogenik (USEPA). Namun, nilai HQ tertinggi (mendekati 0,5) ditemukan pada pekerja dengan mobilitas tinggi (satpam, mekanik, pencatat) yang terpapar langsung emisi alat berat/truk. Meski risiko kesehatan

sistemik jangka pendek dinilai rendah, akumulasi paparan jangka panjang dan potensi dampak karsinogenik tetap perlu diwaspadai, terutama bagi pekerja di area aktif. Kelompok kontrol juga menunjukkan $HQ < 1$ yang dipengaruhi pola aktivitas kerja.

Gambar 4. Hasil perhitungan Hazard Quotient (HQ) $PM_{2.5}$ terhirup pada pekerja TPA Sarimukti dan kelompok kontrol



(Sumber: Perhitungan dari Data Primer, 2024)

Perhitungan Odds Ratio (OR)

Odds Ratio (OR) dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pajanan debu respirabel terhadap kondisi kapasitas paru-paru dengan membandingkan risiko antara kelompok terpajan dan tidak terpajan.

Tabel 3. Matriks Odds Ratio Responden dan Penurunan Kualitas Paru-paru

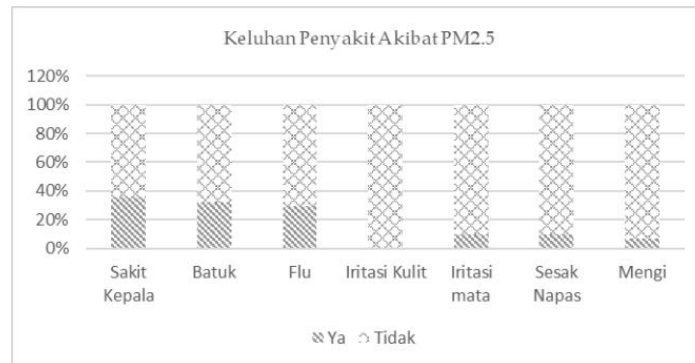
Kelompok	Hasil Pengukuran Kapasitas Paru-paru		
	Penurunan fungsi Paru	Paru-paru Normal	Total
Terpapar	25	6	31
Tidak Terpapar	2	8	10
Total	27	14	

(Sumber: Pengukuran spirometri, 2024)

Perhitungan odds ratio (OR) dilakukan menggunakan tabel matriks 2x2 yang memuat distribusi responden terpapar dan tidak terpapar berdasarkan status penurunan fungsi paru dapat dilihat **Tabel 3**. Hasil analisis menunjukkan nilai OR sebesar 16,67 (95% CI: 2,77-99,48), yang mengindikasikan bahwa pekerja terpapar debu memiliki risiko 16,67 kali lebih tinggi mengalami penurunan fungsi paru dibandingkan pekerja tidak terpapar. Nilai $OR > 1$ menunjukkan adanya hubungan positif antara paparan debu dan penurunan fungsi paru,

dengan besaran risiko yang sangat tinggi. Namun, interpretasi hasil ini perlu kehati-hatian mengingat rentang interval kepercayaan 95% yang lebar (2,77-99,48), diduga akibat ukuran sampel yang terbatas sehingga variasi data cukup besar. Untuk memperoleh estimasi risiko yang lebih presisi, diperlukan penelitian lanjut dengan jumlah sampel yang lebih besar.

Gambar 5. Keluhan kesehatan pekerja akibat PM_{2.5}



(Sumber: Kuesioner dan wawancara, 2024)

Meskipun penilaian dosis-respons PM_{2.5} dikategorikan sebagai agen risiko non-karsinogenik, paparan debu dalam waktu lama di tempat kerja dapat menyebabkan keluhan pernapasan. Selain keluhan pernafasan terdapat keluhan kesehatan responden terhadap debu di TPA seperti batuk, sakit kepala, iritasi mata, sesak napas, dan mengi (Abidin dkk., 2023). Data mengenai permasalahan PM_{2.5} yang berhubungan dengan kesehatan pekerja di area TPA ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Data menunjukkan bahwa sakit kepala (35%), batuk (32%), dan flu (29%) merupakan keluhan kesehatan paling umum yang dilaporkan oleh pekerja yang terpapar PM_{2.5} di TPA. Keluhan seperti iritasi mata (10%), sesak napas (10%), dan mengi (6%) juga muncul meski dengan persentase lebih rendah. Tidak ada laporan iritasi kulit, menunjukkan bahwa dampak PM_{2.5} lebih dominan pada sistem pernapasan dan neurologis. Paparan PM_{2.5} berpotensi memicu gangguan pernapasan akut (batuk, flu, sesak napas) dan gejala sistemik seperti sakit kepala. Keluhan sesak napas dan mengi (meski rendah) mengindikasikan risiko gangguan paru obstruktif jika paparan berlanjut.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun konsentrasi PM_{2.5} yang terhirup oleh pekerja di TPA Sarimukti masih berada di bawah Nilai Ambang Batas (3 mg/m³), variasi antar area menunjukkan adanya perbedaan tingkat paparan yang dipengaruhi oleh jenis pekerjaan, lokasi kerja, dan intensitas aktivitas harian. Nilai *intake* paparan PM_{2.5} pada kelompok pekerja menunjukkan rentang yang lebih tinggi dibanding kelompok kontrol, meskipun nilai Hazard Quotient (HQ) secara keseluruhan masih di bawah satu, yang mengindikasikan bahwa tingkat paparan belum menimbulkan risiko kesehatan non-karsinogenik secara akut. Hasil spirometri menunjukkan paparan PM_{2.5} secara signifikan berkontribusi terhadap penurunan fungsi paru, khususnya FEV₁,

yang mengarah pada risiko gangguan paru obstruktif seperti bronkitis kronis atau asma. Analisis *Odds Ratio* (OR = 16,67; 95% CI: 2,77–99,48) menunjukkan peningkatan signifikan risiko gangguan fungsi paru pada kelompok terpajan. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian paparan PM_{2.5}, peningkatan penggunaan APD, serta pemantauan kesehatan rutin bagi pekerja TPA.

Daftar Pustaka

- Abidin, A. U., Maziya, F. B., Susetyo, S. H., Yoneda, M., & Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM_{2.5}) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. *Environmental Challenges*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100795>
- American Thoracic Society (ATS). (1987). *Standardization of spirometry--1987 ATS update (American Thoracic Society)*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3361365/>
- Aulia, Z., & Azizah, R. (2015). Karakteristik, Perilaku, Fungsi Paru Pekerja dan Kadar Pm_{2,5} di Industri Rumah Tangga Cecek Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 8(1), 128–136.
- Azizah, I. T. N. (2019). Analysis The Level Of PM_{2,5} And Lung Function Of Organic Fertilizer Industry Workers In Nganjuk. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 11(2), 141–149. <https://doi.org/10.20473/jkl.v11i2.2019.141-149>
- Bakhtiar, A., & Tantri, R. I. E. (2019). Faal Paru Dinamis. *Jurnal Respirasi*, 3(3), 89. <https://doi.org/10.20473/jr.v3-I.3.2017.89-96>
- Berryman, K. (2024, December 12). *PurpleAir Sensor and Monitor Air Quality*. <https://www2.purpleair.com/blogs/blog-home/how-to-install-your-purpleair-air-quality-monitor?srltid=AfmBOoqCSN-dlySIRwr-euKlob-Bn2csgp5naldJPT4TecN-OYprKI4l>
- Cointreau, S. (2006). Occupational and Environmental Health Issues of Solid Waste Management Special Emphasis on Middle and Lower-Income Countries. . *Urban Papers*, UP-2.
- Dirjen PP&PL. (2012). *Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)*.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2014). *Particulate Matter*. <http://www.epa.gov/pm/>.
- FACE-UP Hive Consortium. (2023). *Exposure assessment (WP1)*.
- Fang, J.-J., Yang, N., Cen, D.-Y., Shao, L.-M., & He, P.-J. (2012). Odor compounds from different sources of landfill: Characterization and source identification. *Waste Management*, 32(7), 1401–1410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.013>
- Gwisai, R. D., Areola, O., & Segosebe, E. (2014). RESPIRATORY AND OCCUPATIONAL HEALTH PROBLEMS OF SCAVENGERS AND LANDFILL EMPLOYEES IN A MUNICIPAL LANDFILL SITE IN LOBATSE, BOTSWANA. . *Journal of Sustainable Development in Africa*, 16(1), 37–55.
- Hambali, A. N., Jusuf, H., & Abudi, R. (2024). Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Kapasitas Vital Paru Pada Pekerja Pengangkut Sampah Di Kabupaten Gorontalo. *Jurnal Kolaboratif Sains*, 7(12).
- Hroncová, E., Ladošerský, J., & Ladošerská, D. (2020). Landfill air pollution by ultrafine and microparticles in case of dry and windless weather conditions. *Detritus*, 10, 139–146. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13913>
- Jat, K. R. (2013). Spirometry in Children. *Primary Care Respiratory Journal*, 22(2), 221–229. <https://doi.org/10.4104/pcrj.2013.00042>
- Jawwad, M. A. S., Murti, R. H. A., & Citrasari, N. (2023). Analisis dan Model Dispersi Kualitas Udara di TPA Klotok Kediri. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1), 31–37. <https://doi.org/10.35970/jppl.v5i1.1786>
- Kusumo, B. E. (2025, February 6). *Pemasangan PurpleAir PA – II Air Quality Sensor Di Desa Karangduren*. NIHR GHRC INA.

- Liu, Y., Lu, W., Guo, H., Ming, Z., Wang, C., Xu, S., Liu, Y., & Wang, H. (2016). Aromatic compound emissions from municipal solid waste landfill: Emission factors and their impact on air pollution. *Atmospheric Environment*, 139, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.043>
- Marpaung, Y. M. (2012). *Pengaruh pajanan debu respirable PM2.5 terhadap kejadian gangguan fungsi paru pedagang tetap di terminal terpadu Kota Depok Tahun 2012*.
- Mengkidi, D., & Nurjazuli, S. (2006). Gangguan Fungsi Paru dan Faktor-faktor yang Mempengaruhinya pada Karyawan PT.Semen Tonasa Pangkep Sulawesi Selatan Lung Function Disorders and the Influency Factors on Worker of PT.Semen Tonasa Pangkep, South Sulawesi. In *J Kesehat Lingkung Indones Gangguan Fungsi Paru* (Vol. 5, Issue 2).
- Muthmainnah, & Adris. (2020). Pengelolaan Sampah Di Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Patommo Sidrap (Tinjauan Yuridis Peraturan Daerah No. 7 Tahun 2016 Tentang Pengelolaan Persampahan). *Journal Madani*.
- Nathanson, J. A. (2024, September 9). *Solid-Waste Management*. <https://www.britannica.com/technology/solid-waste-management>
- Novirsa, R., & Achmadi, U. F. (2012). Analisis Risiko Pajanan PM2,5 di Udara Ambien Siang Hari terhadap Masyarakat di Kawasan Industri Semen. *Kesmas: National Public Health Journal*, 7(4), 173. <https://doi.org/10.21109/kesmas.v7i4.52>
- Nurlaili, D. K., & Hendrasarie, N. (2023). Analisa Kualitas Lingkungan Udara Ambien (PM2.5) di Kota Surabaya. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(1), 7988–7995. <https://doi.org/10.32672/jse.v9i1.713>
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- Penelitian Unggulan ITB. (2024). *Pengukuran udara ambien yang dilakukan 31 Juli-1 Agustus 2024*.
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22. (2021). *Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*
- Raihanah, N. D., Yulianti, & Sani, A. (2025). Faktor Yang Berhubungan Dengan Keluhan Gangguan Pernapasan Pada Pemulung Di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Tamangapa Kota Makassar. *Window of Public Health Journal*, 6(1), 161–170. <https://doi.org/10.33096/woph.v6i1.2053>
- Ray, M. R., Roychoudhury, S., Mukherjee, G., Roy, S., & Lahiri, T. (2005). Respiratory and general health impairments of workers employed in a municipal solid waste disposal at an open landfill site in Delhi. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 208(4), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.02.001>
- Soemirat, J. (2013). *Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan*. Gadjah Mada University Press.
- Sompornrattanaphan, M., Thongngarm, T., Ratanawatkul, P., Wongsas, C., & Swigris, JJ. (2020). The contribution of particulate matter to respiratory allergy. *Asian Pacific Journal of Allergy and Immunology*. <https://doi.org/10.12932/AP-100619-0579>
- Sonibare, O. O., Adeniran, J. A., & Bello, I. S. (2019). Landfill air and odour emissions from an integrated waste management facility. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(1), 13–28. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-00322-1>
- Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y.-C. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>
- Turyanti, A. (2011). Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi PM10 Menggunakan Regresi Linier Berganda (Studi Kasus: Daerah Dago Pakar dan Cisaranten, Bandung). *Jurnal Agromet Indonesia*, 25(1), 29. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.25.1.29-36>
- US EPA. (2022). *Human Health Risk Assessment*. <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>
- Yerramilli, A., Rao Dodla, V. B., & Yerramilli, S. (2011). Air Pollution, Modeling and GIS based Decision Support Systems for Air Quality Risk Assessment. In *Advanced Air Pollution*. InTech. <https://doi.org/10.5772/22055>

- Yusmiati, Maulida, Y., & Eriyati. (2017). Dampak Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Muara Fajar Terhadap Sosial Ekonomi Masyarakat Di Kelurahan Muara Fajar Kecamatan Rumbai Kota Pekanbaru. *JOM Fekon*, 4(1), 172–186.
- Zannaria, N. D., Roosmini, D., & Santoso, M. (2009). Karakteristik Kimia Paparan Partikulat Terespirasi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*, IX no.1, 37–50.