

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan CO₂ Pada Pekerja TPAS Manggar Kota Balikpapan

Environmental Health Risk Analysis of CO₂ Exposure in Workers at Manggar Landfill, Balikpapan City

Vivi Filia Elvira^{1*}, Morrin Choirunnisa Thohira¹, Ayudhia Rachmawati¹, Muhammad Aidil Fitrah¹, Syamsir¹, Akhmad Dzikri¹

1. Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

***Corresponding Author: Vivi Filia Elvira**

Email: vivifiliaelvira@fkm.unmul.ac.id

ABSTRAK

Paparan karbon dioksida (CO₂) di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) berpotensi menimbulkan gangguan fisiologis pada pekerja akibat akumulasi gas dari dekomposisi sampah organik. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko kesehatan lingkungan akibat paparan CO₂ pada pekerja TPAS Manggar, Kota Balikpapan, menggunakan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Penelitian analitik observasional ini melibatkan 40 pekerja. Konsentrasi CO₂ diukur menggunakan metode *direct reading/real-time monitoring*, disertai pengukuran faktor meteorologis dan respons fisiologis pekerja. Analisis risiko dilakukan melalui perhitungan *Risk Quotient* (RQ), sedangkan hubungan kategori intake dengan temperatur, frekuensi napas, kadar oksigen, dan denyut jantung dianalisis menggunakan uji chi-square dan *independent t-test*. Hasil menunjukkan konsentrasi CO₂ meningkat dari 380 ppm menjadi 430 ppm pada kondisi kecepatan angin rendah (1,94 m/s), suhu 29–31°C, dan kelembaban tinggi (75–85%). Nilai RQ *real-time* (0,076), 10 tahun (0,426), dan 20 tahun (0,776) masih berada pada kategori aman (RQ<1), sedangkan RQ 30 tahun (1,126) menunjukkan potensi risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan jangka panjang. Frekuensi napas memiliki hubungan bermakna dengan kategori intake. Paparan CO₂ di TPAS Manggar berpotensi meningkatkan risiko kesehatan jangka panjang sehingga diperlukan pemantauan kualitas udara, penggunaan APD, pengaturan waktu kerja, dan edukasi kesehatan kerja.

Kata kunci: ARKL, CO₂, TPAS, kesehatan kerja, pekerja, meteorologi

ABSTRACT

Exposure to carbon dioxide (CO₂) at the Final Waste Processing Site (TPAS) may cause physiological disorders in workers due to the accumulation of CO₂ from the decomposition of organic waste. This study aims to analyze environmental health risks associated with CO₂ exposure among workers at the Manggar TPAS in Balikpapan City using the Environmental Health Risk Analysis (ARKL) approach. This observational analytical study involved 40 workers. CO₂ concentrations were measured using a direct-reading, real-time monitoring method, along with measurements of meteorological factors and workers' physiological responses. Risk analysis was conducted by calculating the Risk Quotient (RQ), while the relationships between intake categories and temperature, respiratory rate, oxygen levels, and heart rate were analyzed using the chi-square test and the independent t-test. The results showed that CO₂ concentrations increased from 380 ppm to 430 ppm under conditions of low wind speed (1.94 m/s), temperature of 29–31°C, and high humidity (75–85%). The real-time RQ (0.076), 10-year (0.426), and 20-year (0.776) values are still in the safe category (RQ<1), while the 30-year RQ (1.126) indicates potential non-carcinogenic health risks from long-term exposure. Respiratory frequency has a significant relationship with intake category. CO₂ exposure at the Manggar Landfill has the potential to increase long-term health risks, so air quality monitoring, use of PPE, work time management, and occupational health education are needed.

Keywords: EHRA, CO₂, Landfill, Occupational Health, Workers, Meteorology

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah dengan sistem penimbunan akhir (*landfilling*) masih menjadi metode utama dalam penyelesaian permasalahan sampah di berbagai negara, terutama negara berkembang. Penimbunan sampah (*sanitary landfill*) adalah upaya perlindungan lingkungan dan pencegahan polutan memasuki tanah bahkan kontaminasi air tanah. Hal ini diperoleh melalui prosedur dua arah: (a) penerapan pelapis tanah liat untuk memastikan limbah tidak keluar dari tempat pembuangan sampah dan (b) penerapan pelapis sintetis, termasuk plastik, untuk memastikan bahwa limbah yang dibuang dipisahkan dari tanah (tempat pembuangan sampah kota)¹. Tempat pemrosesan akhir sampah (TPAS) Manggar Kota Balikpapan merupakan salah satu lokasi pengelolaan sampah yang menggunakan metode *sanitary landfill*. TPAS Manggar menjadi salah satu pusat tempat pembuangan sampah dari seluruh kegiatan masyarakat Kota Balikpapan, memiliki luas 27,1 Ha dengan jarak ± 23 km dari pusat kota². Keberadaan sampah berimplikasi pada kesehatan masyarakat yang bermukim di sekitar lokasi pembuangan akhir, karena sampah merupakan sarana dan sumber penyebaran penyakit³.

Proses pembusukan limbah organik menghasilkan gas rumah kaca yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global dan berpotensi menimbulkan ledakan⁴. Karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu gas rumah kaca yang banyak dihasilkan dari proses dekomposisi sampah di TPAS. Salah satu lokasi yang berisiko tinggi terhadap akumulasi gas ini adalah TPAS Manggar, yang berada dalam wilayah hutan tropis lembab dengan karakteristik suhu dan kelembaban yang relatif tinggi, dan sirkulasi udara yang terbatas. Kondisi tersebut mempermudah akumulasi gas-gas buangan seperti CO₂ yang dapat berdampak pada kesehatan para pekerja di lokasi tempat pemrosesan akhir sampah⁵. Keberadaan TPAS disekitar tempat tinggal masyarakat berdampak pada kondisi lingkungan fisik terhadap pencemaran udara dan lingkungan sosial masyarakat^{6,7}.

Paparan jangka panjang terhadap kadar CO₂ tinggi (>5000 ppm) dapat menyebabkan gangguan fisiologis seperti peningkatan laju pernafasan, kelelahan, sakit kepala, gangguan kesadaran⁸. Penelitian yang dilakukan oleh

Zhang, dkk (2016) menunjukkan bahwa selama paparan CO₂ pada 3.000 ppm, ET_{CO₂} (*End-tidal Carbon Dioxide*) meningkat lebih banyak dan detak jantung menurun. Paparan bioefluen, ketika CO₂ yang dihasilkan secara metabolik berada pada 3.000 ppm, secara signifikan meningkatkan tekanan darah⁹. Pada penelitian lainnya, diketahui juga bahwa peningkatan CO₂ berkaitan dengan gangguan gejala pernapasan, termasuk batuk, mengi, dan sesak napas, serta memburuknya kondisi pernapasan yang sudah ada. Selain itu, paparan terhadap konsentrasi CO₂ yang meningkat dapat menyebabkan asidosis respiratori, penurunan fungsi paru-paru, dan gangguan pertukaran gas. Lingkungan yang memiliki potensi besar dalam peningkatan CO₂ seperti lokasi tempat pemrosesan akhir sampah, menekankan pentingnya pemantauan kualitas udara secara berkala^{10,11}.

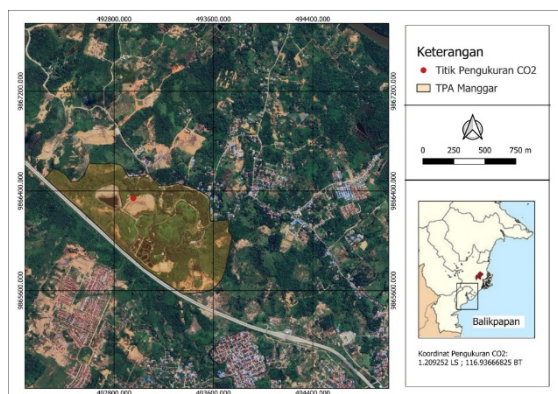
Analisis Risiko Kualitas Lingkungan (ARKL) merupakan metode terstruktur untuk menilai dan mengukur potensi risiko kesehatan yang disebabkan oleh paparan terhadap bahaya lingkungan dalam hal ini TPAS. ARKL meliputi langkah-langkah seperti identifikasi bahaya, pengukuran paparan, karakterisasi risiko dan manajemen risiko, yang dapat mendukung perancangan strategi perlindungan kesehatan pekerja yang didasarkan pada data ilmiah. Penerapan pendekatan ini sangat penting untuk menyusun rekomendasi mitigasi, terutama di wilayah sekitar TPAS yang mengalami tekanan ekologis seperti hutan tropis lembab¹².

Oleh karena itu, penelitian bertujuan menganalisis risiko kesehatan lingkungan terhadap paparan CO₂ pada pekerja di TPAS Manggar Kota Balikpapan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah analitik *observasional study* dengan teknik pengambilan sampel menggunakan teknik *purposive sampling*. *Purposive sampling* yaitu penentuan lokasi berdasarkan adanya tujuan tertentu dan sesuai dengan pertimbangan peneliti sendiri sehingga mewakili populasi. Jumlah responden dalam penelitian ini sebanyak 40 responden yang merupakan pekerja di TPAS Manggar dengan minimal masa kerja selama satu tahun. Responden dilakukan wawancara berdasarkan kuesioner dan pemeriksaan respon fisiologis dengan tanda-tanda vital. Data kuesioner berisi terkait dengan identitas responden, perilaku merokok,

perilaku minum minuman beralkohol, penggunaan APD, gangguan pernapasan, gejala anemia, dan riwayat penyakit tidak menular. Pemeriksaan respon fisiologis pekerja meliputi suhu tubuh, tekanan darah, frekuensi napas, detak jantung dan saturasi oksigen. Pengambilan sampel udara CO₂ dilakukan dengan menggunakan alat *direct reading/ Real-time Monitoring*. Pengambilan sampel udara ambien dilakukan pada siang hari selama 1 jam (11.40-12.40) tanpa gangguan dan mencatat suhu dan kelembaban udara sekitar wilayah *landfill* TPAS Manggar. Hasil pengukuran dicatat di lapangan secara langsung dari tampilan layar alat Testo 315-3, kemudian dibawa ke laboratorium untuk dianalisis lebih lanjut dan didokumentasikan oleh petugas laboratorium. Lokasi penelitian dan pengambilan sampel digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian dan pengambilan sampel udara CO₂

Penelitian ini didasarkan pada Pedoman ARKL yang disusun oleh Direktorat Jenderal Pengendalian Penyakit dan Pengelolaan Lingkungan tahun 2012. Tahapan ARKL yang dilakukan yaitu: identifikasi bahaya, penentuan hubungan dosis-respon, penilaian tingkat paparan, karakterisasi risiko melalui perhitungan *Risk Quotient* (RQ) dan proses perencanaan pengelolaan risiko sebagai upaya untuk meminimalkan dampak kesehatan yang mungkin timbul. Persamaan yang digunakan dalam analisis penelitian ini ditunjukkan sebagai berikut:

$$I_{nk} = \frac{C \times R \times t_E \times f_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}} \text{ (Persamaan 1)}$$

$$RQ = \frac{I}{RfC} \text{ (Persamaan 2)}$$

Keterangan:

I_{nk} : *Intake* (asupan), jumlah *risk agent* yang masuk (mg/kg/hr)

C : Konsentrasi *risk agent* (mg/m³)

R : Laju asupan atau konsumsi (m³/jam)

t_E : Waktu paparan (jam/hari)

f_E : Frekuensi paparan (tahun)

D_t : Durasi paparan (hari/tahun)

Wb: Berat badan (kg)

t_{avg} : Periode waktu rata-rata (30 x 365 hari/tahun)

RQ: *Risk Quotient*

Uji analisis menggunakan SPSS versi 24 untuk melakukan uji univariat dan uji bivariat. Uji univariat dilakukan untuk melihat distribusi antar variabel yaitu jenis kelamin, kategori intake, konsentrasi CO₂, durasi kerja, durasi paparan, frekuensi paparan, dan hasil pemeriksaan respon fisiologis responden. Selanjutnya, uji bivariat dilakukan untuk melihat hubungan kategori intake dengan respon fisiologis responden. Hubungan kategori intake dengan tekanan darah responden dilakukan dengan uji *chi-square* dan *independent T-test* untuk melihat hubungan kategori intake dengan temperatur, frekuensi napas, kadar oksigen, dan denyut jantung.

HASIL PENELITIAN

1. Karakteristik Responden, Status Tekanan Darah Tinggi, dan Kategori Intake

Penelitian ini melibatkan responden yang merupakan pekerja di TPAS Manggar Kota Balikpapan. Data karakteristik pekerja diperoleh dari kuesioner yang diisi oleh responden. Variabel kategori dijelaskan pada tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Variabel Kategori

Variabel	Frekuensi (n=40)	Persentase (%)
Jenis Kelamin		
Laki - Laki	28	70
Perempuan	12	30
Tekanan Darah Tinggi		
Tidak	27	67,5
Ya	13	32,5
Kategori Intake		
Tidak Berisiko	20	50
Berisiko	20	50

Berdasarkan distribusi variabel kategori diatas, diketahui bahwa mayoritas responden berjenis kelamin laki-laki dengan proporsi 70%, sedangkan perempuan 30%. Dari aspek status kesehatan (tekanan darah tinggi), diketahui bahwa sebagian besar responden

tidak memiliki riwayat tekanan darah tinggi yaitu sebesar 67,5%, sementara 32,5% lainnya teridentifikasi memiliki tekanan darah tinggi (hipertensi). Pada variabel kategori *intake*, distribusi responden berada dalam proporsi yang seimbang antara kelompok tidak berisiko dan tidak berisiko, masing-masing sebesar 50%.

2. Hubungan Tekanan Darah Tinggi dengan Kategori *Intake*

Tabel 2. Hubungan Tekanan Darah Tinggi dengan Kategori *Intake*

Tekanan Darah Tinggi	Kategori <i>Intake</i>						P-value
	Tidak Berisiko		Berisiko		Total		
	n	%	n	%	n	%	
Tidak	12	44,4	15	55,6	27	100	0,500
Iya	8	61,5	5	38,5	13	100	

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan hasil analisis hubungan antara tekanan darah tinggi dengan kategori *intake*, diketahui bahwa responden yang tidak memiliki tekanan darah tinggi lebih banyak berada pada kategori *intake* berisiko, yaitu sebanyak 15 responden (55,6%), sedangkan kategori *intake* tidak berisiko sebanyak 12 responden (44,4%). Sementara itu, responden yang memiliki tekanan darah tinggi lebih banyak berada pada kategori *intake* tidak berisiko, yaitu sebanyak 8 responden (61,5%), sedangkan kategori *intake* berisiko sebanyak 5 responden (38,5%).

Hasil uji Chi-square menunjukkan nilai *p-value* sebesar 0,500 ($>0,05$), yang menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara tekanan darah tinggi dengan kategori *intake* pada pekerja di TPAS Manggar. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kondisi tekanan darah responden belum menunjukkan keterkaitan yang bermakna terhadap tingkat paparan CO₂ berdasarkan kategori *intake* pada penelitian ini.

3. Kadar Oksigen (O₂), Suhu (°C), Frekuensi Napas, Denyut Jantung, Konsentrasi CO₂, Durasi Kerja, Durasi Paparan, Frekuensi Paparan

Pada tabel distribusi variabel numerik berikut menyajikan ringkasan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan sebaran data untuk beberapa parameter fisiologis dan lingkungan, yaitu kadar oksigen, suhu, frekuensi napas,

denyut jantung, konsentrasi CO₂, durasi kerja, durasi paparan, serta frekuensi paparan. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai kondisi paparan dan respon fisiologis responden sehingga pola variasi setiap variabel dapat dinilai secara lebih sistematis.

Tabel 3 Distribusi Kadar O₂, Suhu, Frekuensi Napas, Denyut Jantung, Konsentrasi CO₂, Durasi Kerja, Durasi Paparan, Frekuensi Paparan

Variabel	Min.	Max.	Mean	SD
Kadar Oksigen	80	99	95,43	3,441
Suhu	34,4	37,5	35,78	0,610
Frekuensi Napas	16	30	19,95	2,978
Denyut Jantung	57	138	82,70	18,18
Konsentrasi CO ₂	380	430	401	21,36
Durasi Kerja	1	24	6,74	6,671
Durasi Paparan	6	15	8,78	1,664
Frekuensi Paparan	269	365	321	29,60

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan Tabel 3, hasil analisis statistik deskriptif menunjukkan bahwa rata-rata kadar oksigen responden adalah 95,43% dengan standar deviasi 3,441, serta memiliki rentang nilai antara 80–99%. Suhu tubuh responden memiliki rata-rata 35,78°C dengan standar deviasi 0,610, dengan nilai minimum 34,4°C dan maksimum 37,5°C. Frekuensi napas menunjukkan rata-rata sebesar 19,95 kali/menit dengan standar deviasi 2,978, serta berada pada rentang 16–30 kali/menit. Sementara itu, denyut jantung responden memiliki rata-rata 82,70 kali/menit dengan standar deviasi 18,18, dengan rentang nilai 57–138 kali/menit. Pada variabel lingkungan dan paparan kerja, konsentrasi CO₂ memiliki rata-rata sebesar 401 ppm dengan standar deviasi 21,36, serta rentang nilai 380–430 ppm. Durasi kerja responden menunjukkan rata-rata 6,74 jam dengan standar deviasi 6,671, dan memiliki rentang 1–24 jam. Selanjutnya, durasi paparan memiliki rata-rata 8,78 tahun dengan standar deviasi 1,664, dengan rentang 6–15 tahun. Frekuensi paparan memiliki rata-rata sebesar

321 hari/tahun dengan standar deviasi 29,60, serta berada pada rentang nilai 269–365 hari/tahun.

Secara umum, hasil analisis deskriptif menunjukkan adanya variasi karakteristik fisiologis responden dan faktor paparan kerja. Variasi yang relatif lebih besar terlihat pada variabel durasi kerja dan denyut jantung yang ditunjukkan oleh nilai standar deviasi yang lebih tinggi dibandingkan variabel lainnya, sehingga mengindikasikan adanya keragaman data antarresponden.

4. Hubungan Suhu, Frekuensi Napas, Kadar Oksigen, dan Denyut Jantung dengan Kategori Intake

Parameter fisiologis seperti suhu tubuh, frekuensi napas, kadar oksigen, dan denyut jantung merupakan indikator biologis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi respon tubuh terhadap paparan karbon dioksida (CO₂) di lingkungan TPAS. Paparan gas landfill secara kontinu berpotensi memengaruhi sistem respirasi dan kardiovaskular melalui perubahan mekanisme ventilasi, pertukaran gas, dan proses fisiologis tubuh. Oleh karena itu, analisis hubungan antara parameter fisiologis dengan kategori *intake* dilakukan untuk mengidentifikasi keterkaitan tingkat paparan CO₂ terhadap perubahan respon fisiologis pekerja di lingkungan TPAS Manggar.

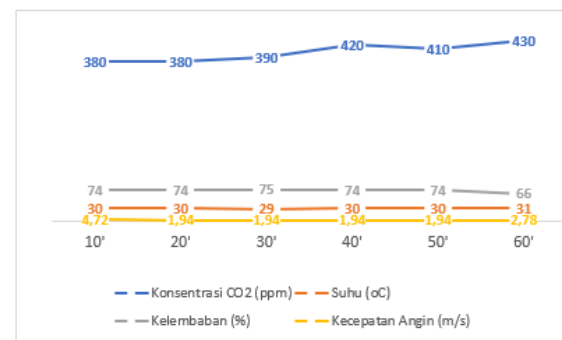
Tabel 4. Hubungan Suhu, Frekuensi Napas, Kadar Oksigen, dan Denyut Jantung dengan Kategori Intake

Variabel Dependen	Variabel Independen	P-Value
Kategori Intake	Temperatur	0,326
	Frekuensi Napas	0,042
	Kadar Oksigen	0,390
	Denyut Jantung	0,184

Berdasarkan hasil analisis hubungan antara suhu, frekuensi napas, kadar oksigen, dan denyut jantung dengan kategori *intake*, diketahui bahwa hanya variabel frekuensi napas yang menunjukkan hubungan bermakna secara statistik terhadap kategori *intake* responden. Hasil uji statistik menunjukkan nilai *p-value* frekuensi napas sebesar 0,042 ($<0,05$), yang mengindikasikan adanya hubungan signifikan antara frekuensi napas dengan kategori *intake* pada pekerja di TPAS Manggar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan

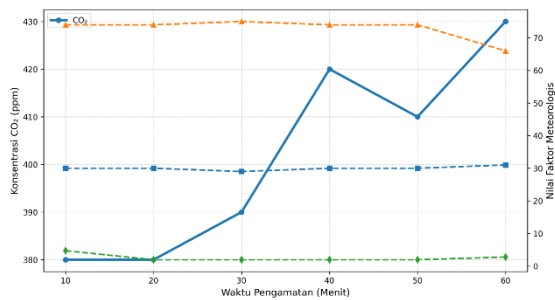
frekuensi napas berpotensi dipengaruhi oleh tingkat paparan yang diterima pekerja selama beraktivitas di lingkungan landfill. Sementara itu, variabel suhu ($p=0,326$), kadar oksigen ($p=0,390$), dan denyut jantung ($p=0,184$) tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan kategori *intake* karena seluruh nilai *p-value* berada di atas batas signifikansi 0,05. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa ketiga variabel tersebut belum menunjukkan keterkaitan yang bermakna terhadap kategori *intake* responden pada penelitian ini. Dengan demikian, frekuensi napas menjadi satu-satunya parameter fisiologis yang memiliki hubungan signifikan dengan kategori *intake* pada pekerja di lingkungan TPAS Manggar.

5. Gambaran Umum Konsentrasi Karbon dioksida (CO₂) dan Faktor Meteorologi



Gambar 2. Konsentrasi Karbon dioksida (CO₂) dan Faktor Meteorologi

Pada Gambar 2, menjelaskan perubahan konsentrasi CO₂, suhu, kelembaban, dan kecepatan angin selama periode pengamatan 60 menit. Konsentrasi CO₂ menunjukkan peningkatan bertahap, dari 380 ppm pada awal observasi menjadi 430 ppm pada akhir pengukuran, dengan kenaikan paling menonjol terjadi pada menit ke-30 hingga ke-40. Parameter suhu terpantau relatif stabil pada kisaran 29–31°C, sementara kelembaban udara berada pada rentang 74–75% hampir sepanjang waktu sebelum menurun pada menit ke-60. Kecepatan angin tampak rendah dan minim variasi, umumnya berada pada 1,94 m/s dengan sedikit peningkatan di awal dan akhir periode. Secara keseluruhan, pola ini mengindikasikan bahwa akumulasi CO₂ cenderung lebih tinggi pada kondisi dengan sirkulasi udara yang terbatas, sementara suhu dan kelembaban tidak menunjukkan fluktuasi signifikan selama pengamatan.



Gambar 3. Pola perubahan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) dan faktor meteorologis

Pada Gambar 3 menunjukkan pola perubahan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) dan faktor meteorologis selama periode pengamatan di TPAS Manggar. Konsentrasi CO₂ mengalami peningkatan secara bertahap dari 380 ppm pada menit ke-10 dan ke-20 menjadi 390 ppm pada menit ke-30, kemudian meningkat lebih signifikan hingga mencapai 420 ppm pada menit ke-40 dan 430 ppm pada menit ke-60. Perbandingan Tren Konsentrasi CO₂ dan Faktor Meteorologis di TPAS Manggar tersebut menjelaskan peningkatan konsentrasi CO₂ terjadi pada kondisi suhu udara yang relatif stabil pada kisaran 29–31°C serta kelembaban udara yang cenderung tinggi, yaitu berkisar antara 74–75%. Kecepatan angin selama pengamatan terukur relatif rendah dan stabil pada kisaran 1,94 m/s, dengan sedikit peningkatan pada awal dan akhir periode pengamatan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa rendahnya sirkulasi udara berpotensi menghambat proses dispersi polutan di atmosfer sehingga menyebabkan akumulasi konsentrasi CO₂ di area landfill. Secara keseluruhan, pola pada grafik menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ di TPAS Manggar cenderung terjadi pada kondisi kelembaban udara yang tinggi dan kecepatan angin yang rendah, sedangkan suhu udara tidak menunjukkan perubahan yang bermakna selama periode pengamatan.

6. Karakteristik Risiko (RQ)

Karakterisasi risiko adalah proses menyintesis data paparan, hubungan dosis–respon, dan sifat populasi terpajan untuk menilai kemungkinan terjadinya dampak kesehatan pada kondisi tertentu. Karakterisasi risiko yang dilakukan untuk menetapkan tingkat risiko atau dengan kata lain menentukan apakah agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis pada ARKL berisiko

menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat (dengan karakteristik seperti berat badan, laju inhalasi/konsumsi, waktu, frekuensi, durasi paparan yang tertentu) atau tidak¹². Tingkat risiko non karsinogenik dihitung berdasarkan kondisi paparan *realtime* dan *lifetime*. Perhitungan tingkat risiko non karsinogenik / Risk Quotien (RQ) pada paparan inhalasi

$$RQ = \frac{I}{RfC}$$

Ink: asupan / intake (mg/kg/hari)

RfC: Dosis referensi agen risiko pada paparan inhalasi

RQ: *Risk Quotient*

Tingkat risiko dinyatakan dalam angka atau bilangan desimal tanpa satuan. Tingkat risiko dikatakan aman apabila Intake ≤ RfC atau dinyatakan dengan RQ ≤ RfC. Tingkat risiko dikatakan tidak aman apabila Intake > RfC atau dinyatakan dengan RQ > 1 (Kemenkes RI, 2012). Hasil perhitungan dijelaskan pada Gambar 4.



Gambar 4. Trend peningkatan nilai Risk Quotient (RQ)

Grafik menunjukkan tren peningkatan nilai *Risk Quotient* (RQ) akibat paparan karbon dioksida (CO₂) berdasarkan durasi paparan pada pekerja di TPAS Manggar. Nilai RQ *realtime* diperoleh sebesar 0,076, kemudian meningkat menjadi 0,426 pada durasi paparan 10 tahun dan 0,776 pada durasi paparan 20 tahun. Selanjutnya, pada durasi paparan 30 tahun nilai RQ meningkat hingga mencapai 1,126. Pola peningkatan nilai RQ tersebut mengindikasikan bahwa semakin lama durasi paparan CO₂, maka tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik yang diterima pekerja juga cenderung meningkat. Nilai RQ pada kondisi *realtime* hingga paparan 20 tahun masih berada di bawah ambang batas aman (RQ<1), sehingga paparan CO₂ pada periode tersebut masih dikategorikan aman terhadap efek kesehatan

non-karsinogenik. Namun, pada durasi paparan 30 tahun nilai RQ telah melebihi ambang batas aman ($RQ > 1$), yang menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan CO₂ dalam jangka panjang pada pekerja di lingkungan TPAS Manggar.

Secara keseluruhan, grafik menggambarkan adanya kecenderungan peningkatan risiko kesehatan seiring bertambahnya durasi paparan CO₂, sehingga diperlukan upaya pengendalian risiko melalui pemantauan kualitas udara secara berkala, pengaturan durasi kerja, serta penerapan perlindungan kesehatan kerja bagi pekerja di area landfill.

PEMBAHASAN

1. Tingkat Risiko Paparan CO₂ dan Hubungan Tekanan Darah Tinggi dengan Kategori Intake

Pada hasil pengukuran konsentrasi CO₂ di area landfill TPAS Manggar menunjukkan nilai yang bervariasi antara 380 hingga 430 ppm dengan rata-rata 401 ppm. Meskipun konsentrasi ini tampak stabil, analisis risiko melalui pendekatan analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) mengungkapkan adanya kecenderungan peningkatan risiko kesehatan non-karsinogenik yang signifikan seiring bertambahnya durasi paparan. Nilai *Risk Quotient* (RQ) pada kondisi *real-time* hingga 20 tahun memang masih berada di bawah ambang batas aman ($RQ < 1$), namun pada durasi paparan 30 tahun, nilai RQ meningkat hingga mencapai 1,126. Pola ini menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar secara terus-menerus dalam jangka panjang di lingkungan tersebut memiliki potensi risiko kesehatan yang tidak dapat diabaikan. Secara biologis, penelitian ini menemukan bahwa frekuensi napas merupakan satu-satunya parameter fisiologis yang memiliki hubungan signifikan dengan kategori *intake* ($p=0,042$). Hasil analisis hubungan antara tekanan darah dengan kategori *intake* menunjukkan tidak terdapat hubungan yang signifikan secara statistik. Meskipun demikian, paparan karbon dioksida (CO₂) dalam jangka panjang tetap berpotensi memengaruhi sistem kardiovaskular dan kondisi fisiologis pekerja. Secara fisiologis, peningkatan kadar CO₂ di udara dapat menyebabkan kondisi *hypercapnia*, yaitu meningkatnya kadar CO₂ dalam darah yang dapat memengaruhi keseimbangan asam-basa tubuh dan merangsang sistem saraf otonom¹³¹⁴.

Kondisi tersebut dapat memicu perubahan frekuensi napas, denyut jantung, vasodilatasi pembuluh darah, hingga perubahan tekanan darah.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Zhang dkk. (2016) yang menjelaskan bahwa paparan CO₂ memicu perubahan respons fisiologis manusia, termasuk ventilasi pernapasan dan detak jantung⁹. Selain itu, Azuma dkk. (2018) menyatakan bahwa paparan CO₂ meskipun pada konsentrasi rendah dapat memengaruhi fungsi fisiologis dan performa manusia, terutama pada lingkungan dengan ventilasi terbatas¹⁵. Krismanuel (2024) juga menjelaskan bahwa paparan CO₂ berkaitan dengan gangguan sistem respirasi seperti sesak napas, batuk, dan perubahan fungsi paru yang secara tidak langsung dapat memengaruhi sistem sirkulasi tubuh¹⁰.

Paparan CO₂ secara sistemik, bahkan pada konsentrasi rendah di lingkungan dengan ventilasi terbatas, diketahui dapat memengaruhi mekanisme, meningkatkan resistensi saluran napas, dan mengganggu fungsi pertahanan imun pada paru-paru. Meskipun parameter lain seperti tekanan darah ($p=0,500$), suhu tubuh, dan denyut jantung tidak menunjukkan hubungan signifikan dalam studi ini, potensi dampak sistemik jangka panjang tetap perlu diwaspadai karena faktor-faktor tersebut juga dipengaruhi oleh kondisi kesehatan individu dan pola hidup pekerja. Konsep *hypercapnia* tersebut diperkuat oleh Csoma dkk. (2022) yang menjelaskan bahwa akumulasi CO₂ dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan fisiologis sistemik, terutama pada sistem respirasi dan kardiovaskular. Kondisi *hypercapnia* dapat memengaruhi mekanisme ventilasi alveolar, meningkatkan resistensi saluran napas, serta menyebabkan perubahan fisiologi kardiovaskular melalui stimulasi *chemoreceptor* dan sistem saraf otonom. Keadaan tersebut dapat menyebabkan perubahan denyut jantung, resistensi pembuluh darah, *cardiac output*, hingga perubahan tekanan darah. Selain itu, *hypercapnia* juga berhubungan dengan gangguan fungsi epitel paru, penurunan fungsi pertahanan imun saluran napas, serta perubahan proses inflamasi paru-paru yang dapat memperburuk kondisi respirasi pekerja yang terpapar secara terus-menerus di lingkungan TPAS¹⁶.

Lingkungan kerja TPAS yang terpapar gas

landfill secara kontinu turut meningkatkan potensi gangguan kesehatan akibat paparan polutan udara jangka panjang. Kondisi meteorologis seperti kelembaban tinggi dan sirkulasi udara yang rendah dapat memperbesar akumulasi CO₂ di area kerja sehingga meningkatkan potensi terjadinya gangguan fisiologis pada pekerja. Ntlebi dkk. (2010) melaporkan bahwa pekerja informal di lingkungan persampahan memiliki risiko hipertensi dan gangguan kesehatan lainnya akibat paparan lingkungan kerja yang buruk dan polutan secara berulang¹⁷. Porta dkk. (2009) juga menjelaskan bahwa pengelolaan limbah padat memiliki keterkaitan dengan gangguan sistem respirasi dan kardiovaskular akibat paparan polutan lingkungan secara kronis^{18,19,20}. Namun demikian, tidak ditemukannya hubungan yang signifikan pada penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan darah pekerja kemungkinan juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti usia, aktivitas fisik, kebiasaan merokok, pola hidup, kondisi kesehatan individu, serta lama masa kerja responden di lingkungan TPAS Manggar^{21,22}.

Dampak bagi kesehatan pekerja di TPAS Manggar sangat krusial, terutama karena lokasinya berada di kawasan hutan tropis lembab yang mendukung proses biodegradasi sampah organik secara kontinu. Kondisi lingkungan ini memicu emisi gas *landfill* yang berkelanjutan, sehingga diperlukan strategi pengendalian risiko yang komprehensif. Manajemen risiko harus mencakup pemantauan kualitas udara secara berkala, pengaturan durasi kerja atau sistem *shift* untuk mengurangi akumulasi waktu paparan, serta kewajiban penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) yang memadai di area operasional aktif. Selain untuk perlindungan kesehatan pekerja, pengendalian emisi CO₂ di TPAS juga merupakan bagian penting dari mitigasi pencemaran udara dan emisi gas rumah kaca secara lebih luas di wilayah tropis^{23,24}.

Paparan gas pada lingkungan kerja dengan ventilasi terbatas diketahui dapat menyebabkan gangguan sistem respirasi, perubahan respon fisiologis, serta penurunan performa psikomotor manusia^{9,15}. Krismanuel (2024) menjelaskan bahwa konsentrasi CO₂ berkaitan dengan gejala gangguan pernapasan seperti sesak napas, batuk, dan penurunan fungsi paru¹⁰. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa emisi gas landfill perlu dikendalikan tidak hanya dalam aspek kesehatan kerja, tetapi juga

sebagai bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim²⁵⁻²⁷.

Pada penelitian Larcombe dan Bierwirth (2026) menjelaskan bahwa akumulasi CO₂ di atmosfer berpotensi memberikan dampak toksik terhadap kesehatan manusia apabila terjadi secara terus-menerus dalam jangka waktu lama²⁸. Azuma dkk. (2018) juga menyatakan bahwa paparan CO₂ meskipun pada konsentrasi rendah dapat memengaruhi performa psikomotor, fungsi fisiologis, dan kenyamanan manusia, khususnya pada lingkungan dengan ventilasi yang terbatas. Kondisi tersebut relevan dengan lingkungan TPAS Manggar yang memiliki karakteristik kelembaban tinggi dan sirkulasi udara yang relatif rendah sehingga berpotensi mendukung terjadinya akumulasi gas landfill di area kerja pekerja.

2. Faktor Meteorologis dengan Tingkat Risiko Paparan CO₂

Emisi karbon dioksida (CO₂) di lingkungan TPAS Manggar tidak hanya berkaitan dengan potensi risiko kesehatan pekerja, tetapi juga memiliki keterkaitan erat dengan isu perubahan iklim global. TPAS merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses biodegradasi limbah organik, terutama CO₂ dan CH₄, yang berkontribusi terhadap tingginya konsentrasi karbon di atmosfer dan penurunan kualitas lingkungan^{1,29}. Kondisi TPAS Manggar yang berada pada kawasan hutan tropis lembab dengan suhu dan kelembaban tinggi diduga mendukung aktivitas mikroorganisme dalam proses dekomposisi sampah sehingga pembentukan gas landfill berlangsung secara kontinu^{6, 30}. Pada penelitian ini, konsentrasi CO₂ cenderung lebih tinggi pada kondisi kecepatan angin rendah dan kelembaban udara tinggi, yang menunjukkan bahwa faktor meteorologis berperan terhadap proses akumulasi gas di area landfill. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Rahmadani dkk. (2024) dan Gavrila dkk. (2025) yang menjelaskan bahwa faktor meteorologis seperti kecepatan angin, arah angin, dan stabilitas atmosfer memengaruhi dispersi serta akumulasi emisi CO₂ dan CH₄ di lingkungan TPAS^{31,32}.

Peningkatan konsentrasi CO₂ di lingkungan TPAS perlu mendapat perhatian karena selain berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan dan peningkatan emisi

gas rumah kaca, paparan dalam jangka panjang juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan pada pekerja. Paparan konsentrasi CO₂ di lingkungan TPAS tidak hanya berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan pada pekerja, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca di atmosfer. Kondisi ini menunjukkan pentingnya upaya pengendalian emisi CO₂ secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Paparan karbon dioksida (CO₂) di lingkungan TPAS Manggar dipengaruhi oleh kondisi meteorologis, terutama kecepatan angin rendah dan kelembaban udara tinggi yang mendukung akumulasi gas landfill di area kerja. Konsentrasi CO₂ yang terukur berada pada rentang 380–430 ppm dan menunjukkan potensi paparan kontinu terhadap pekerja. Hasil analisis ARKL menunjukkan bahwa nilai *Risk Quotient* (RQ) *realtime*, 10 tahun, dan 20 tahun masih berada pada kategori aman (RQ<1), sedangkan nilai RQ 30 tahun sebesar >1 menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan CO₂ jangka panjang.

Analisis hubungan parameter fisiologis menunjukkan bahwa frekuensi napas memiliki hubungan signifikan dengan kategori *intake*, sedangkan suhu tubuh, kadar oksigen, denyut jantung, dan tekanan darah tidak menunjukkan hubungan yang bermakna secara statistik. Meskipun demikian, paparan CO₂ secara kronis tetap berpotensi memengaruhi sistem respirasi dan kardiovaskular pekerja melalui mekanisme *hypercapnia* dan perubahan fisiologis tubuh akibat paparan gas landfill secara terus-menerus. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengendalian risiko melalui pemantauan kualitas udara secara berkala, penggunaan alat pelindung diri, pengaturan durasi kerja, serta peningkatan edukasi kesehatan kerja bagi pekerja di lingkungan TPAS Manggar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih hal ini terutama Dinas Lingkungan Hidup Kota Balikpapan yang telah memberikan izin dan UPTD TPAS Manggar khususnya informan yang telah berkenan memberikan waktunya dan membantu peneliti sehingga peneliti memperoleh informasi yang berguna terkait analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) terhadap paparan CO₂ dan respon fisiologis

pekerja di TPAS Manggar Kota Balikpapan. Selain itu, peneliti juga ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang turut membantu dan mendukung dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Siddiqua A, Hahladakis JN, Al-Attiya W. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environ Sci Pollut Res* 2022;29(39):58514–58536; doi: 10.1007/s11356-022-21578-z.
2. Rusba K, Sari IP, Mulya W, et al. Manggar Waste Management at the Final Processing Place. *J Pengabdian Masyarakat* 2023;84–88.
3. Alves CA, Feliciano MJS, Gama C, et al. First exploratory study of gaseous pollutants (NO₂, SO₂, O₃, VOCs and carbonyls) in the Luanda metropolitan area by passive monitoring. *Environ Pollut* 2024;362:125015; doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125015>.
4. Ahda A, Ernyasih E. Hubungan Antara Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Kualitas Kesehatan Lingkungan Permukiman. *OBAT J Public Heal* 2025;3(4).
5. Ratih RAA, Lanti Y, Prabang RD. Pengaruh Paparan Gas Metana (CH₄), Karbon Dioksida (CO₂) dan Hidrogen Sulfida (H₂S). *An A-Z Food Drink* 2013;7(2):105–116.
6. Maziya FB. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) Karbon Dioksida (CO₂) Kegiatan Pengelolaan Sampah Kecamatan Genteng Kota Surabaya. *Jukung (Jurnal Tek Lingkungan)* 2017;3(2):1–9.
7. Almeisa K, Ode Hadini L, Kasmianti S. Dampak Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir Terhadap Kondisi Lingkungan Masyarakat. *J Penelit Pendidik Geogr* 2024;9(3):147–156.
8. Fahmi RN, Onasis A, Merri S, et al. Paparan Gas Hidrogen Sulfida (H₂S) dan Aktivitas Pemulung Terhadap Risiko Kesehatan Lingkungan di TPA Tahun 2022. *J Kesehat Lingkung Mandiri* 2023;2(1):48–57.
9. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Physiological Responses during Exposure to Carbon Dioxide and Bioeffluents at

- Levels Typically Occurring Indoors. 2016;2(2).
10. Krismanuel H. Correlation Between Carbon Dioxide (CO₂) and Respiratory Issues: A Literature Review. *J Penelit dan Karya Ilm Lemb Penelit Univ Trisakti* 2024;9:159–168.
11. Rahayona D, Sunarsih E, Egit KF, et al. Analisis Kualitas Lingkungan dan Dampaknya Terhadap Masyarakat di Sekitar TPA Sukawinatan Palembang. *Hig J Kesehat Lingkung* 2024;9(2):64–69.
12. Indonesia KKR. Panduan Praktis Pelaksanaan EHRA (Environmental Health Risk Assessment Penilaian Resiko Kesehatan Lingkungan) Edisi Kedua Tahun 2021. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 2021.
13. Almanza-Hurtado A, Polanco Guerra C, Martínez-Ávila MC, et al. Hypercapnia from Physiology to Practice. *Int J Clin Pract* 2022;2022; doi: 10.1155/2022/2635616.
14. Handayani NF, Haryanto J, Sari DW. Factors Influencing Blood Pressure Control in Older Adults Hypertension: A Systematic Review. *Indones J Glob Heal Res* 2025;7(1):939–946; doi: 10.37287/ijghr.v7i1.5300.
15. Azuma K, Kagi N, Yanagi U, et al. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments : A short review on human health and psychomotor performance. *Environ Int* 2018;121(August):51–56; doi: 10.1016/j.envint.2018.08.059.
16. Balázs Csoma; Maria Rosaria Vulpi; Silvano Dragonieri; Andrew Bentley; Timothy Felton; Zsófia Lázár; Andras Bikov. Hypercapnia in COPD : Causes , Consequences , and Therapy. *J Clin Med* 2022;11(11); doi: https://doi.org/10.3390/jcm11113180.
17. Ntlebi V, Made F, Wilson K, et al. Hypertension and associated risk factors among informal waste pickers in Johannesburg , South Africa. 2010;26(6):282–286.
18. Porta D, Milani S, Lazzarino AI, et al. associated with management of solid waste. 2009;14:1–14; doi: 10.1186/1476-069X-8-60.
19. Xu J, Niehoff NM, White AJ, et al. Fossil-fuel and combustion-related air pollution and hypertension in the Sister Study. *Environ Pollut* 2022;315:120401; doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120401.
20. Azzouz M, Xu Y, Barregard L, et al. Long-term ambient air pollution and venous thromboembolism in a population-based Swedish cohort. *Environ Pollut* 2023;331:121841; doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121841.
21. Aryanti S. Dampak Pencemaran Udara (Polusi Udara) Terhadap Penyakit Hipertensi. 2019.
22. Reimann B, Sleurs H, Alfano R, et al. Urinary parabens, advanced glycation end products and blood pressure in children: a longitudinal cohort study. *Environ Res* 2025;284:122229; doi: https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122229.
23. Calvo L, Caba A, Ruiz HK, et al. Characterisation of plastic-based sanitary personal protective equipment following supercritical CO₂ sterilisation : A reuse strategy. 2025;92(December 2024); doi: 10.1016/j.jcou.2025.103029.
24. Deng Y, Li G, Xie L, et al. Associations of occupational exposure to micro-LiNiCoMnO₂ particles with systemic inflammation and cardiac dysfunction in cathode material production for lithium batteries. *Environ Pollut* 2024;359:124694; doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124694.
25. Suharto B, Kurniati E, Agustin DD. Perhitungan Tapak Karbon Pada Aspek Pengelolaan Sampah Di TPST 3R Mulyoagung Bersatu Sebagai Upaya Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Calculation Of Carbon Site In Aspects Of Waste Management At TPST 3R Mulyoagung Bersatu As An Effort For Reduction Greenhou. 2022;8:22–32.
26. Cordova SS, Gustafsson M, Eklund M, et al. What should we do with CO₂ from biogas upgrading ? *J CO₂ Util* 2023;77(August):102607; doi: 10.1016/j.jcou.2023.102607.
27. Nunes LJR. The Rising Threat of Atmospheric CO₂ : A Review on the Causes , Impacts , and Mitigation Strategies. 2023.
28. Larcombe AN, Bierwirth PN. Carbon dioxide overload, detected in human

- blood, suggests a potentially toxic atmosphere within 50 years. *Air Qual Atmos Heal* 2026;19(3):1–9; doi: 10.1007/s11869-026-01918-5.
29. Lee U, Han J, Wang M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. *J Clean Prod* 2017;166:335–342; doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.016.
 30. Yenier HRASE. Analisis Produksi Gas Metana (CH₄) dan Karbon Dioksida (CO₂) dari Tempat Pembuangan Akhir Kota Pekanbaru. *Jom FTEKNIK* 2017;4(1):1–8.
 31. Rahmadani N, Fitri Y, Retnawaty SF, et al. Pemodelan Emisi Gas CO₂ dari Lokasi Tempat Pembuangan Akhir di Kota Pekanbaru menggunakan Dispersi AERMOD Modelling CO₂ Gas Emissions from Landfill Sites in Pekanbaru City using. 2024;12:163–176; doi: 10.14710/jwl.12.2.163-176.
 32. Gavrilă GO, Vasile GG, Calinescu SM, et al. Assessment of CH₄ and CO₂ Emissions from a Municipal Waste Landfill: Trends, Dispersion, and Environmental Implications. 2025;1–22.