

# Analisis Risiko Paparan PM<sub>10</sub> Dan PM<sub>2.5</sub> Terhadap Kesehatan Pekerja Mesin Insinerator Sampah Di Kabupaten Bandung

Fandias<sup>1</sup>, Andriyanto Setyawan<sup>2</sup>, Parisya Premiera Rosulindo<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

<sup>1</sup>E-mail : fandias.tptu421@polban.ac.id;

<sup>2</sup>E-mail : andriyanto@polban.ac.id;

<sup>3</sup>E-mail : parisya.premiera@polban.ac.id;

## ABSTRAK

Penggunaan insinerator di TPS3R MOTAH Sukaberseri, Kabupaten Bandung, menjadi alternatif pengelolaan sampah, namun berpotensi menimbulkan risiko kesehatan akibat emisi partikulat halus. Penelitian ini menganalisis paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> terhadap pekerja dengan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Pengukuran dilakukan selama lima hari di tiga titik pemantauan dengan melibatkan 24 responden. Hasil menunjukkan rata-rata PM<sub>10</sub> sebesar 55 µg/m<sup>3</sup> masih di bawah ambang batas, sedangkan PM<sub>2.5</sub> mencapai 56,25 µg/m<sup>3</sup>, melebihi baku mutu. Nilai ISPU sebagian besar berkategori “Sedang”, dengan nilai tertinggi 94,68 untuk PM<sub>2.5</sub>. Sebanyak 25% responden memiliki nilai RQ > 1, menandakan potensi risiko kesehatan. Disarankan penerapan teknologi pengendalian emisi seperti *wet scrubber*, *fabric filter*, dan *electrostatic precipitator*, penggunaan APD, pembatasan durasi kerja, serta penguatan regulasi dan pengawasan lintas sektor sebagai upaya mitigasi.

### Kata Kunci

Insinerator, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, ISPU, ARKL, Risiko kesehatan.

*The use of incinerators at TPS3R MOTAH Sukaberseri, Bandung Regency, serves as an alternative for waste management but poses potential health risks due to fine particulate emissions. This study analyzes PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> exposure to workers using the Environmental Health Risk Assessment (EHRA) approach. Measurements were conducted over five days at three monitoring points involving 24 respondents. Results showed that the average PM<sub>10</sub> concentration (55 µg/m<sup>3</sup>) remained below the threshold, while PM<sub>2.5</sub> reached 56.25 µg/m<sup>3</sup> at one point, exceeding the standard limit. The Air Pollution Standard Index (ISPU) was mostly categorized as “Moderate,” with a peak value of 94.68 for PM<sub>2.5</sub>. Approximately 25% of respondents had Risk Quotient (RQ) values > 1, indicating potential health risks. It is recommended to implement emission control technologies such as wet scrubbers, fabric filters, and electrostatic precipitators, ensure personal protective equipment (PPE) use, limit working hours, and strengthen regulations and cross-sector oversight as risk mitigation measures.*

### Keywords

Incinerator, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, ISPU, EHRA, Health risk

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat di wilayah perkotaan menyebabkan peningkatan volume sampah yang signifikan. Tanpa pengelolaan yang memadai, kondisi ini dapat menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Secara global, volume sampah diperkirakan akan meningkat dua kali lipat dibandingkan laju pertumbuhan populasi pada tahun 2050 jika tidak dilakukan penanganan yang tepat (1).

Indonesia menghasilkan timbulan sampah nasional sebesar 68,7 juta ton per tahun, dengan komposisi dominan berupa sampah organik (41,27%) dan sekitar 38,28% berasal dari rumah tangga (2). Kabupaten Bandung merupakan salah satu wilayah yang menghadapi persoalan serius dalam pengelolaan sampah, dengan volume harian mencapai 1.200–1.500 ton. Komposisi sampah didominasi oleh sampah organik (60%), diikuti plastik (15%), kertas (10%), dan jenis lainnya (15%) (3). Peningkatan timbulan sekitar 3,5% per tahun memperburuk kondisi, terlebih kapasitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) hanya mampu menampung sekitar 65% dari total timbulan harian.

Sebagai bentuk penanganan, Pemerintah Kabupaten Bandung mengoperasikan insinerator atau Mesin Olah Runtah (MOTAH) di sejumlah Tempat Pengolahan Sampah, termasuk di TPS3R MOTAH Sukaberseri. Teknologi ini digunakan untuk mengurangi volume sampah melalui proses pembakaran. Namun, proses pembakaran juga menghasilkan emisi berbahaya seperti dioksin dan partikel halus PM<sub>10</sub> serta PM<sub>2.5</sub>, yang dapat mencemari udara dan membahayakan kesehatan pekerja yang terpapar secara langsung dalam jangka waktu lama.

Paparan melebihi ambang batas kualitas udara ambien berpotensi menimbulkan gangguan saluran pernapasan, penyakit jantung, serta dampak kesehatan lainnya. Pembakaran sampah yang tidak sempurna dapat menghasilkan senyawa karsinogenik dan non-karsinogenik, yang meningkatkan risiko bagi pekerja yang tidak terlindungi dengan baik (4).

Pekerja insinerator merupakan kelompok paling rentan terhadap paparan polutan udara karena berada dekat dengan sumber emisi. Proses pembakaran sampah menghasilkan partikulat halus seperti PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> yang mudah terhirup, terutama di lingkungan terbuka atau tanpa penggunaan alat

pelindung diri (APD) yang memadai. PM<sub>2.5</sub> berukuran sangat kecil dan dapat menembus hingga alveoli paru lalu masuk ke sirkulasi darah, memicu iritasi saluran napas, gangguan paru, penyakit jantung, stroke, hingga penyakit paru kronis (5). Sementara itu, PM<sub>10</sub> cenderung tertahan di saluran pernapasan atas, tetapi tetap berisiko menimbulkan batuk, infeksi saluran napas, memperparah asma, dan meningkatkan risiko kardiovaskular (6). Risiko ini akan meningkat apabila pekerja terpapar secara terus-menerus dalam jangka panjang, bekerja di lingkungan dengan ventilasi buruk, serta tidak menggunakan APD dengan optimal (7). Kondisi tersebut menegaskan adanya potensi dampak kesehatan yang serius, terutama karena PM<sub>2.5</sub> dapat mencapai saluran pernapasan terdalam dan memicu efek sistemik jangka panjang (8).

Keterbatasan kapasitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) mendorong penggunaan insinerator sebagai salah satu solusi pengelolaan sampah. Meskipun demikian, efektivitas teknologi ini dalam jangka panjang masih menuai perdebatan, terutama terkait kontribusinya terhadap pencemaran udara dan dampaknya terhadap kesehatan pekerja. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara ambien dan analisis risiko kesehatan menjadi langkah penting dalam menilai tingkat keamanan penggunaannya. Beberapa studi menekankan pentingnya pemahaman dan penerapan prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) untuk meminimalkan dampak paparan polusi udara dari proses pembakaran sampah (9).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas udara ambien serta menganalisis risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> terhadap pekerja insinerator di TPS3R MOTAH Sukaberseri. Melalui pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), studi ini diharapkan dapat memberikan dasar rekomendasi mitigasi risiko bagi pekerja yang terpapar secara langsung.

## 2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) untuk menilai potensi risiko kesehatan akibat paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> pada pekerja insinerator. Pemantauan dilakukan di tiga titik yang dipilih berdasarkan arah dominan asap dan intensitas aktivitas kerja. Pengukuran berlangsung selama lima hari (Senin, Selasa, Rabu, Kamis, dan Sabtu) pada Januari 2025, pukul 07.30–16.30 WIB, dengan pencatatan data setiap 15 menit. Nilai rata-rata dari seluruh titik digunakan untuk merepresentasikan kualitas udara ambien selama periode observasi.

Konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> diukur menggunakan *Particulate Counter* HT-9600, yang bekerja dengan prinsip optoelektronik berbasis laser semikonduktor, memiliki rentang pengukuran 0–1000 µg/m<sup>3</sup> dan efisiensi penghitungan 100±10% pada partikel berukuran 0,5 µm. Parameter meteorologis seperti kecepatan angin, suhu udara, dan kelembapan diukur menggunakan *Anemometer* LM-8000A dengan rentang kecepatan 0,4–30 m/s, suhu -10°C hingga 50°C, kelembapan 0–100% RH, dan akurasi ±3%.

Pengukuran berat badan pekerja dilakukan karena merupakan parameter penting dalam perhitungan nilai *intake* pada analisis risiko kesehatan. Individu dengan berat badan lebih tinggi umumnya memiliki cadangan energi dan daya tahan tubuh yang lebih baik terhadap zat berbahaya (10). Berat badan diukur menggunakan timbangan digital merek Kris, berkapasitas maksimum 180 kg dan ketelitian hingga satu angka di belakang koma, dilengkapi fitur klasifikasi status berat berdasarkan indeks massa tubuh (BMI).

Kuesioner digunakan untuk mengumpulkan data dasar yang diperlukan dalam analisis risiko, seperti usia, berat badan, durasi kerja harian, frekuensi kerja tahunan, dan total masa kerja. Metode ini efektif dalam mengidentifikasi faktor yang memengaruhi kondisi kesehatan pekerja serta gejala kesehatan dengan tingkat pajanan di lingkungan kerja (11).

Tabel 1. *Pertanyaan Kuesioner*

No	Pertanyaan
1.	Usia Anda (tahun)
2.	Berat badan Anda (kg)
3.	Lama kerja per hari (jam)
4.	Jam mulai bekerja
5.	Tahun mulai bekerja
6.	Hari libur per minggu (hari)
7.	Hari libur raya per tahun (hari)
8.	Total hari libur per tahun (hari)

Seluruh pekerja insinerator di lokasi penelitian dijadikan sebagai responden dengan teknik *total sampling*, yang melibatkan 24 orang. Teknik ini dipilih karena jumlah populasi yang relatif kecil dan memungkinkan seluruh individu dijadikan subjek penelitian. Penentuan tingkat pajanan disesuaikan berdasarkan durasi kerja masing-masing responden di area insinerator, yang berkisar antara 1 hingga 8 jam per hari.

Hasil pengukuran konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas kualitas udara ambien berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, yaitu 75 µg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>10</sub> dan 55 µg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>2.5</sub>. Nilai konsentrasi tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sesuai ketentuan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (12), nilai ISPU dihitung menggunakan persamaan (1), yaitu,

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (1)$$

Dimana,

- I : ISPU terhitung
- I<sub>a</sub> : ISPU batas atas
- I<sub>b</sub> : ISPU batas bawah
- X<sub>a</sub> : Konsentrasi ambien batas atas (µg/m<sup>3</sup>)
- X<sub>b</sub> : Konsentrasi ambien batas bawah (µg/m<sup>3</sup>)
- X<sub>x</sub> : Konsentrasi hasil pengukuran (µg/m<sup>3</sup>)

Tabel 2. *Kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)*

Kategori	Status Warna	Angka Rentang
Baik	Hijau	1-50

Sedang	Biru	51-100
Tidak Sehat	Kuning	101- 200
Sangat Tidak Sehat	Merah	200 - 300
Berbahaya	Hitam	≥ 301

Data antropometri diperoleh melalui penyebaran kuesioner yang berisi informasi terkait usia, berat badan, lama kerja harian, frekuensi kerja tahunan, dan durasi bekerja. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan karakteristik responden dan menjadi dasar dalam analisis risiko kesehatan. Proses penilaian risiko kesehatan dilakukan melalui pendekatan ARKL, yang terdiri dari empat tahapan utama, yaitu identifikasi bahaya, penilaian dosis-respons, penilaian paparan, dan karakterisasi risiko (13). Untuk menilai kemungkinan dampak non-karsinogenik terhadap kesehatan, dilakukan analisis paparan dengan menghitung nilai asupan (*intake*) menggunakan persamaan berikut,

$$I_{nk} = \frac{C \times R \times t_E \times f_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}} \quad (2)$$

Dimana,

- $I_{nk}$  : *intake* agen risiko (mg/kg/hari)
- C : Konsentrasi agen risiko pada udara (mg/m<sup>3</sup>)
- R : laju inhalasi (m<sup>3</sup>/jam)
- $t_E$  : Waktu paparan (jam/hari)
- $f_E$  : Frekuensi paparan dalam setahun (hari/tahun)
- $D_t$  : Durasi paparan (tahun)
- $W_b$  : Berat badan (kg)
- $t_{avg}$  : Periode waktu rata-rata untuk efek non-karsinogenik (365 hari)

Karakterisasi risiko dilakukan dengan menghitung perbandingan antara nilai asupan (*intake*) dan nilai Referensi Konsentrasi (RfC) melalui persamaan berikut.

$$RQ: \frac{I}{RfC} \quad (3)$$

Dimana,

- RQ : *Risk Quotient* tingkat risiko
- I : *intake* agen risiko (mg/kg/hari)
- RfC : nilai dosis referensi agen risiko (mg/kg/hari)

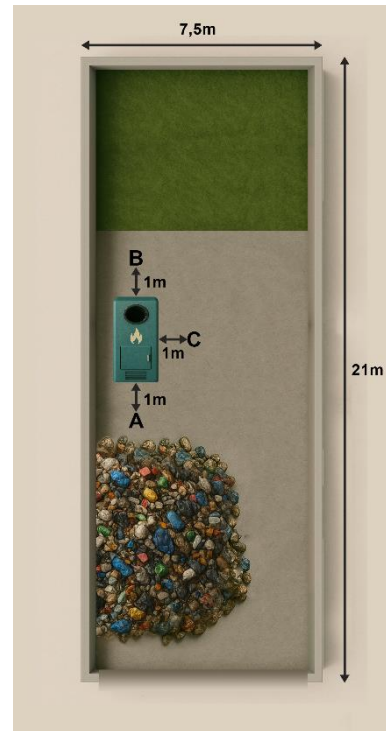
Nilai  $RQ \leq 1$  mengindikasikan bahwa tingkat risiko masih tergolong aman. Sebaliknya, apabila nilai RQ melebihi 1, maka terdapat potensi risiko terhadap kesehatan dan diperlukan langkah pengelolaan risiko lebih lanjut (14).

### 2.1 Layout dan Lokasi Penelitian

Kegiatan Penelitian dilakukan di area pengelolaan sampah TPS3R MOTAH Sukaberseri, yang terletak di Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat. Lokasi pengukuran difokuskan di sekitar mesin insinerator sampah, yang menjadi sumber utama emisi partikulat (PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>) terhadap pekerja.

Gambar 1 menunjukkan *layout* ruangan pengambilan sampel udara di area insinerator TPS3R MOTAH Sukaberseri. Tiga titik pengukuran ditetapkan pada jarak 1 meter dari mesin insinerator, yaitu Titik A (depan), Titik B (belakang), dan Titik C (sisi kanan), dengan pertimbangan lokasi aktivitas utama pekerja serta arah dominan pergerakan asap pembakaran (15). Mesin insinerator tipe HI-MS500

beroperasi setiap hari kerja pada pukul 07.30–16.30 WIB dengan suhu 650–1000°C, dalam lingkungan semi tertutup dan dilengkapi sistem cerobong sebagai jalur pelepasan emisi ke udara luar.



Gambar 1. *Layout* Ruang Pengelolaan Sampah

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Rata-Rata Konsentrasi Per Titik

Tabel berikut menyajikan konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> yang diukur pada tiga titik pemantauan selama lima hari, untuk mengetahui sebaran partikel di sekitar area operasional insinerator.

Tabel 3. *Rata-Rata Konsentrasi Per Titik*

Hari	Titik	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Senin	A	48,18	40,64
	B	88,82	77,91
	C	45,40	39,00
Selasa	A	31,73	26,91
	B	50,27	42,73
	C	41,90	36,20
Rabu	A	60,91	48,36
	B	55,27	49,36
	C	48,00	42,30
Kamis	A	59,64	48,36
	B	56,64	47,91
	C	46,30	38,40
Sabtu	A	44,73	37,73
	B	76,27	63,36
	C	65,50	54,00

Hasil pengukuran pada Tabel 3 menunjukkan bahwa konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> bervariasi berdasarkan lokasi

titik pengambilan sampel dan hari pengamatan. Titik B secara konsisten mencatat konsentrasi tertinggi dibandingkan Titik A dan C. Puncak konsentrasi PM tercatat pada hari Senin di Titik B, yaitu 88,82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{10}$  dan 77,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{2.5}$ . Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh penumpukan sampah selama akhir pekan serta dimulainya pembakaran lebih awal pada awal minggu. Titik B yang berada di belakang insinerator juga merupakan arah dominan aliran asap, sehingga lebih banyak menerima partikulat hasil pembakaran. Sifat sampah yang lebih kering dan mudah terbakar pada awal minggu juga dapat mempercepat pembentukan partikel halus di udara. Sebaliknya, konsentrasi partikulat terendah dicatat pada hari Selasa di Titik A (31,73  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{10}$  dan 26,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{2.5}$ ), yang merupakan area bagian depan insinerator dan tidak langsung terpapar arah pergerakan asap.

Titik C, yang berada di sisi kanan mesin, menunjukkan nilai konsentrasi sedang dan cenderung fluktuatif. Variasi konsentrasi di titik ini dipengaruhi oleh arah angin, frekuensi buka-tutup tungku, serta posisi pekerja selama aktivitas pembakaran. Secara umum, pola sebaran konsentrasi menunjukkan bahwa Titik B merupakan area dengan risiko pajanan tertinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan lokasi berdasarkan arah pergerakan asap dan aktivitas operasional insinerator, serta perlunya strategi pengendalian pajanan khusus di area belakang insinerator untuk melindungi kesehatan pekerja.

### 3.2 Rata-Rata Konsentrasi Harian Gabungan

Tabel 4. Rata-Rata Konsentrasi Harian Gabungan

Hari	$\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{PM}_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Senin	61	53
Selasa	41	35
Rabu	55	47
Kamis	54	45
Sabtu	62	52
Rata-rata	55	46

Berdasarkan Tabel 4, konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  menunjukkan variasi antar hari. Paparan tertinggi tercatat pada hari Sabtu, yaitu 62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{10}$  dan 52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{2.5}$ , diikuti hari Senin dengan nilai serupa. Sebaliknya, hari Selasa mencatat konsentrasi terendah, yaitu 41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{10}$  dan 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{2.5}$ . Peningkatan konsentrasi pada Sabtu dan Senin diduga dipicu oleh akumulasi sampah akhir pekan dan pembakaran yang dimulai lebih awal. Arah asap yang dominan ke belakang, sesuai dengan lokasi pengukuran, turut memperkuat paparan di area tersebut.

Rendahnya konsentrasi pada hari Selasa disebabkan oleh aktivitas pembakaran yang lebih ringan dan arah asap yang menjauhi titik pemantauan. Variasi ini menunjukkan bahwa paparan partikulat dipengaruhi oleh faktor operasional, seperti volume dan durasi pembakaran, serta kondisi lingkungan seperti arah angin dan aliran udara. Kombinasi keduanya menentukan tingkat pajanan pekerja terhadap polutan di sekitar insinerator.

### 3.3 Perbandingan Konsentrasi PM dengan PP No. 22 Tahun 2021

Tabel 5. Rata-Rata Konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  di Setiap Titik Pemantauan

Titik	Konsentrasi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$
A	49,04	40,40
B	65,45	56,25
C	49,42	41,98

Berdasarkan data pada Tabel 5, rata-rata konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  pada Titik A dan Titik C masih berada di bawah ambang batas kualitas udara ambien yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, yaitu 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{10}$  dan 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk  $\text{PM}_{2.5}$ . Pada Titik A, tercatat konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  sebesar 49,04  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  sebesar 40,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sementara itu, Titik C menunjukkan konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  sebesar 49,42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  sebesar 41,98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kedua titik ini berada dalam kategori aman karena nilainya masih di bawah baku mutu, mencerminkan kualitas udara yang dapat diterima untuk aktivitas kerja.

Sebaliknya, pada Titik B, meskipun konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  sebesar 65,45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  masih berada di bawah ambang batas, konsentrasi  $\text{PM}_{2.5}$  tercatat sebesar 56,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , yang telah melampaui batas aman. Kondisi ini menandakan potensi risiko kesehatan, terutama karena  $\text{PM}_{2.5}$  merupakan partikel halus yang dapat masuk ke saluran pernapasan terdalam dan menimbulkan efek jangka panjang. Kelebihan konsentrasi di Titik B diduga disebabkan oleh arah angin dominan yang mengarah ke area tersebut, khususnya saat pembukaan tungku insinerator. Asap hasil pembakaran terbawa ke titik tersebut, menyebabkan akumulasi partikulat yang lebih tinggi dibandingkan Titik A dan Titik C.

### 3.4 Perbandingan Konsentrasi PM dengan ISPU

Tabel 6. Rata-Rata Harian Konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  dengan Nilai ISPU

Hari	Konsentrasi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		ISPU	
	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$
Senin	61,28	52,94	56,09	94,68
Selasa	41,28	35,25	41,46	50,35
Rabu	54,94	46,81	52,95	66,54
Kamis	54,44	45,09	52,70	64,13
Sabtu	62,06	51,63	56,48	91,30

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa konsentrasi harian  $\text{PM}_{10}$  berkisar antara 41,28 hingga 62,06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sementara  $\text{PM}_{2.5}$  berada pada kisaran 35,25 hingga 52,94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi  $\text{PM}_{10}$  tertinggi tercatat pada hari Sabtu, sedangkan  $\text{PM}_{2.5}$  tertinggi terjadi pada hari Senin. Berdasarkan kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), nilai-nilai ini umumnya masuk dalam kategori "Sedang", kecuali ISPU  $\text{PM}_{2.5}$  hari Senin yang mencapai 94,68 dan mendekati ambang kategori "Tidak Sehat".

Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh peningkatan volume sampah dan sifat sampah yang lebih kering di awal minggu, sehingga menghasilkan lebih banyak partikel halus

saat dibakar. Meski kategori “Sedang” tidak langsung membahayakan populasi umum, paparan berulang terutama pada kelompok rentan seperti pekerja lapangan tetap perlu diwaspadai. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian emisi dan pemantauan berkala untuk mencegah peningkatan risiko kesehatan, khususnya dari paparan PM<sub>2.5</sub> yang dapat masuk hingga ke sistem pernapasan bawah.

### 3.5 Karakteristik Responden dan Pola Paparan

Penelitian ini melibatkan 24 pekerja insinerator di TPS3R MOTAH Sukaberseri, yang terdiri dari 6 pekerja tetap dan 18 pekerja harian. Seluruh responden dipilih menggunakan teknik total sampling dan diwawancarai dengan kuesioner untuk memperoleh data usia, berat badan, durasi kerja harian (tE), frekuensi kerja tahunan (fE), dan durasi kerja total (Dt), yang digunakan sebagai parameter input dalam analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL).

Semua responden berusia di atas 18 tahun dan termasuk kategori dewasa, sehingga digunakan nilai laju inhalasi standar sebesar 0,83 m<sup>3</sup>/jam sesuai pedoman. Mayoritas pekerja memiliki berat badan antara 61–65 kg, yang secara fisiologis menunjukkan cadangan energi dan daya tahan tubuh yang lebih baik terhadap polutan dibandingkan individu dengan berat badan lebih rendah. Durasi paparan harian bervariasi antara 1 hingga 8 jam; pekerja tetap umumnya memiliki paparan penuh selama 8 jam, sedangkan pekerja harian terpapar selama 1–3 jam. Frekuensi kerja ditetapkan 295 hari/tahun, dan durasi kerja total selama masa penelitian adalah 0,5 tahun karena seluruh responden tergolong baru. Seluruh parameter ini menjadi dasar perhitungan intake dan Risk Quotient (RQ) terhadap paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>.

### 3.6 Identifikasi Bahaya

Pekerja di area operasional insinerator memiliki risiko tinggi terpapar partikulat udara, khususnya PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>, yang merupakan partikel halus dengan potensi bahaya signifikan terhadap kesehatan. Proses pembakaran sampah menghasilkan partikel mikroskopis yang mudah terhirup, terutama jika dilakukan di ruang terbuka atau tanpa penggunaan alat pelindung diri yang memadai.

PM<sub>2.5</sub> dapat menembus hingga alveoli paru dan masuk ke sirkulasi darah, berkontribusi terhadap iritasi saluran napas, gangguan paru, serta peningkatan risiko penyakit jantung, stroke, dan gangguan pernapasan kronis. Sementara itu, PM<sub>10</sub> umumnya tertahan di saluran pernapasan atas, namun tetap dapat menyebabkan batuk, iritasi, infeksi saluran napas, serta memperparah asma dan meningkatkan risiko kardiovaskular.

### 3.7 Analisis Dosis-Respon

Penilaian dosis-respon bertujuan untuk memperkirakan potensi dampak kesehatan akibat paparan partikel PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>. Parameter utama dalam tahap ini adalah *Reference Concentration* (RfC), yaitu ambang batas konsentrasi yang dianggap aman untuk paparan jangka panjang. Nilai RfC mengacu pada data dari *Integrated Risk Information System* (IRIS) US-EPA, masing-masing sebesar 0,004 mg/m<sup>3</sup> untuk

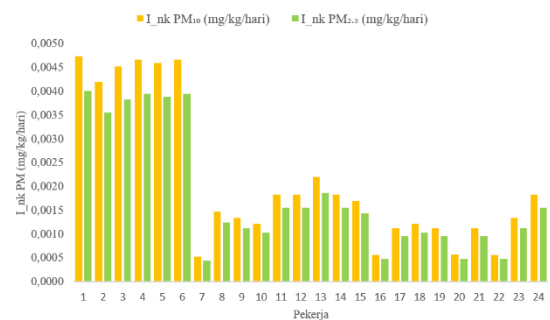
PM<sub>10</sub> dan 0,003 mg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>2.5</sub>. Selanjutnya, nilai dosis (*intake*) dibandingkan dengan RfC untuk memperoleh *Risk Quotient* (RQ), yang ditafsirkan sebagai indikator tingkat risiko. Nilai RQ ≤ 1 menunjukkan paparan masih dalam batas aman, sedangkan RQ > 1 mengindikasikan adanya potensi risiko kesehatan yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut.

### 3.8 Analisis Paparan

Tabel 7. Karakteristik dan Pola Paparan Pekerja

Parameter	Min	Maks	Rata-Rata
Usia (tahun)	20	74	47,54
Berat badan (kg)	40	70	60,08
Laju inhalasi (m <sup>3</sup> /jam)	0,83	0,83	0,83
Lama kerja (jam/hari)	1	8	3,5
Frekuensi (hari/tahun)	295	295	295
Durasi kerja (tahun)	0,5	0,5	0,5

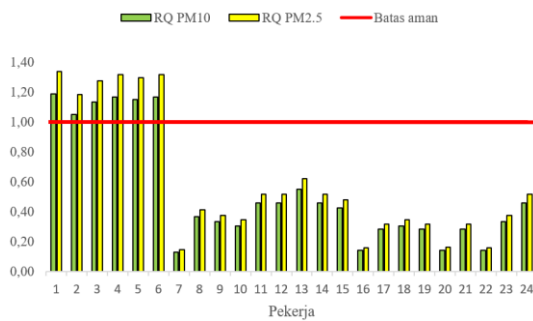
Penelitian ini melibatkan 24 pekerja insinerator, terdiri dari pekerja tetap dan tenaga bantu, dengan data dikumpulkan melalui kuesioner dan wawancara. Parameter seperti usia, berat badan, durasi paparan harian (t<sub>e</sub>), frekuensi kerja tahunan (f<sub>e</sub>), dan durasi kerja (D<sub>i</sub>) digunakan untuk menghitung nilai *intake* dan RQ menggunakan pendekatan ARKL. Sebagian besar responden berusia >18 tahun, memiliki berat badan 61–65 kg, dan bekerja 1–3 jam/hari, sementara 25% terpapar selama 8 jam/hari. Frekuensi kerja tercatat 295 hari/tahun dengan durasi kerja 0,5 tahun. Karakteristik ini menunjukkan paparan jangka pendek namun intensif yang berisiko terhadap kesehatan.



Gambar 2. Nilai *Intake* PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> Pada Pekerja

Nilai *intake* PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> pada pekerja insinerator menunjukkan perbedaan signifikan antara pekerja tetap dan harian. Pekerja tetap (8 jam/hari) memiliki intake PM<sub>10</sub> sebesar 0,0042–0,0047 mg/kg/hari dan PM<sub>2.5</sub> sebesar 0,0036–0,0040 mg/kg/hari, jauh lebih tinggi dibandingkan pekerja harian (1–3 jam/hari) dengan nilai intake 0,0005–0,0022 mg/kg/hari (PM<sub>10</sub>) dan 0,0004–0,0019 mg/kg/hari (PM<sub>2.5</sub>). Gambar 2 menunjukkan bahwa durasi paparan berperan besar dalam peningkatan risiko inhalasi.

### 3.9 Karakterisasi Risiko Non Karsinogenik



Gambar 3. Nilai RQ Paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> pada Pekerja

Gambar 3 memperlihatkan perbandingan nilai RQ terhadap paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> pada 24 pekerja insinerator. Enam pekerja pertama (Pekerja 1–6), yang merupakan pekerja tetap dengan durasi kerja penuh (8 jam/hari), menunjukkan nilai RQ di atas ambang batas aman ( $RQ > 1$ ), menandakan adanya risiko kesehatan non-karsinogenik yang tidak dapat diterima. Nilai RQ tertinggi dicatat pada Pekerja 1 dan 2, khususnya untuk PM<sub>2.5</sub>, yang mendekati angka 1,4. Hal ini mengindikasikan potensi dampak signifikan pada kesehatan pernapasan dan kardiovaskular akibat paparan jangka panjang.

Sebaliknya, Pekerja 7–24 yang mayoritas bekerja 1–3 jam/hari memiliki nilai RQ di bawah 1 ( $0,1-0,6$ ), yang masih dalam kategori risiko dapat diterima. Temuan ini menegaskan bahwa semakin lama durasi paparan, semakin tinggi nilai RQ. Oleh karena itu, pembatasan waktu kerja dan penggunaan alat pelindung diri menjadi langkah penting dalam menekan risiko kesehatan akibat paparan partikulat.

### 3.10 Pengelolaan Risiko

Dalam penelitian ini, penetapan batas aman dilakukan untuk mendukung pengelolaan risiko pajanan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> di area kerja insinerator TPS3R MOTAH Sukaberseri. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan risiko non-karsinogenik melalui jalur inhalasi, dengan mengacu pada nilai *Reference Concentration* (RFC) dari US EPA, yaitu 0,004 mg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>10</sub> dan 0,003 mg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>2.5</sub>. Berdasarkan nilai tersebut, diperoleh konsentrasi aman sebesar 4,55 µg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>10</sub> dan 3,41 µg/m<sup>3</sup> untuk PM<sub>2.5</sub>. Perhitungan ini menggunakan data riil di lapangan, termasuk laju inhalasi pekerja sebesar 0,83 m<sup>3</sup>/jam, berat badan rata-rata 61 kg, durasi kerja 8 jam per hari, serta frekuensi kerja sebanyak 295 hari per tahun selama masa kerja 0,5 tahun.

Tabel 8. Penentuan Batas Aman dalam Strategi Pengelolaan Risiko

Parameter	Nilai Aman
$C_{nk}$ aman (PM10)	4,55 µg/m <sup>3</sup>
$C_{nk}$ aman (PM2.5)	3,41 µg/m <sup>3</sup>
$t_{E_{nk}}$ aman	5,63 ≈ 6 jam/hari
$f_{E_{nk}}$ aman	218,68 ≈ 219 hari/tahun
$Dt$ aman	0,37 ≈ 0,4 tahun

Tabel 8 menunjukkan batas aman paparan PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>, yaitu 4,55 µg/m<sup>3</sup> dan 3,41 µg/m<sup>3</sup>. Durasi kerja dibatasi maksimal 6 jam/hari, 219 hari/tahun, selama 0,4 tahun. Nilai ini menjadi dasar pengaturan kerja dan rotasi pekerja dalam strategi pengelolaan risiko.

### 3.11 Metode Pengelolaan Risiko

Strategi pengelolaan risiko dalam penelitian ini mencakup pendekatan teknologi, sosio-ekonomi, dan institusional. Secara teknis, pengendalian dilakukan dengan menerapkan sistem emisi seperti *wet scrubber*, *heat exchanger*, *fabric filter*, serta *electrostatic precipitator* (ESP) untuk menurunkan konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> di udara. Pendekatan sosio-ekonomi difokuskan pada perlindungan pekerja melalui pemakaian alat pelindung diri (APD) seperti masker N100 dan pemeriksaan kesehatan rutin guna mendeteksi gangguan akibat paparan jangka panjang. Pendekatan kelembagaan mengacu pada Permenaker No. 5 Tahun 2018 dan Kepmen LHK No. P.14 Tahun 2020 sebagai dasar hukum penerapan standar K3 dan kualitas udara ambien. Berdasarkan hasil perhitungan pajanan, durasi kerja dibatasi maksimal 6 jam/hari dan 219 hari/tahun, sejalan dengan ketentuan UU No. 11 Tahun 2020 tentang penyesuaian waktu kerja berdasarkan risiko pekerjaan.

## 4. KESIMPULAN

Rata-rata konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> tercatat 55 µg/m<sup>3</sup> dan 46 µg/m<sup>3</sup>, dengan PM<sub>2.5</sub> di Titik B melebihi ambang batas. ISPU PM<sub>2.5</sub> tertinggi terjadi pada hari Senin sebesar 94,68. Enam pekerja (25%) memiliki  $RQ > 1$ , menandakan risiko kesehatan yang tidak dapat diterima. Oleh karena itu, direkomendasikan strategi pengendalian berupa teknologi emisi, penggunaan APD, serta pembatasan durasi dan frekuensi kerja.

## 5. SARAN

Penelitian lanjutan sebaiknya mencakup masyarakat sekitar, menambahkan polutan lain seperti SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan VOCs, serta mempertimbangkan faktor meteorologis. Pemeriksaan kesehatan langsung juga diperlukan agar hasil risiko mencerminkan dampak nyata di lapangan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Jurusan Teknik Refrigerasi & Tata Udara Politeknik Negeri Bandung atas fasilitas peralatan yang dapat dimanfaatkan demi berlangsungnya penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Kaza S, Yao LC, Bhada-Tata P, Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 [Internet]. Washington, DC: World Bank; 2018 [cited 2024 Nov 25]. Available from: <https://hdl.handle.net/10986/30317>
- KLHK NA. Oase Kabinet dan KLHK Ajak Masyarakat Kelola Sampah Organik Menjadi Kompos [Internet]. 2023 [cited 2024 Nov 25]. Available from:

- <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/7222/oase-kabinet-dan-klhk-ajak-masyarakat-kelola-sampah-organik-menjadi-kompos>
3. SIPSN. SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 25]. Available from: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/baca/5#parallax>
  4. Ramadhansyah MF, Nugroho A, Wahyuningsih NE. Policy Brief: Pengolahan Abu Hasil Pembakaran Limbah Medis sebagai Alternatif Pengganti Bahan Bangunan yang Berasal dari Fasilitas Pelayanan Kesehatan. *J Serambi Eng* [Internet]. 2021 Oct 15 [cited 2024 Nov 27];6(4). Available from: <http://ojs.serambimekkah.ac.id/jse/article/view/3495>
  5. Ciabattini M, Rizzello E, Lucaroni F, Palombi L, Boffetta P. Systematic review and meta-analysis of recent high-quality studies on exposure to particulate matter and risk of lung cancer. *Environ Res*. 2021 May;196:110440.
  6. Bodor K, Micheu MM, Keresztesi Á, Birsan MV, Nita IA, Bodor Z, et al. Effects of PM10 and Weather on Respiratory and Cardiovascular Diseases in the Ciuc Basin (Romanian Carpathians). *Atmosphere*. 2021 Feb 23;12(2):289.
  7. PATH. Personal Protective Equipment and Segregation Supply Specifications for Health Care Waste Management. 2010;
  8. Xing YF, Xu YH, Shi MH, Lian YX. The impact of PM2.5 on the human respiratory system. 2015;
  9. Kusuma AWA, Thamrin Y, Patimah S. Analisis Penerapan K3 Pengelolaan Limbah Medis Padat di Rumah Sakit Umum Daerah Sinjai. . Vol. 2024;5(2).
  10. Mallongi A, Bustan MN, Juliana N, Herawati. Risks Assessment due to the Exposure of Copper and Nitrogen Dioxide in the Goldsmith in Malimongan Makassar. *J Phys Conf Ser*. 2018 Jun;1028:012036.
  11. Charbotel B, Bergeret A, Hours M, Anzivino-Viricel L, Maitre A, Perdrix A, et al. Morbidity among municipal waste incinerator workers: a cross-sectional study. *Int Arch Occup Environ Health*. 2003 Jul 1;76(6):467–72.
  12. PORTAL DIREKTORAT PENGENDALIAN PENCEMARAN UDARA DITJEN PPKL KLHK [Internet]. [cited 2025 Jul 19]. Available from: <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia>
  13. Direktorat Jenderal PP danPL. Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan ( ARKL ) [Internet]. 2012 [cited 2024 Dec 1]. Available from: <https://ebook.poltekkestasikmalaya.ac.id/2020/08/13/pedoman-analisis-risiko-kesehatan-lingkungan-arkl/>
  14. Erdinur E, Muslim B, Zicof E. RISIKO PAJANAN BAHAN PENCEMAR TERHADAP PEKERJA PENGECATAN MOBIL DI PT.STEELINDO MOTOR KOTA PADANG. *J Sehat Mandiri*. 2021 Jun 25;16(1):105–14.
  15. Zghaid M, Benchrif A, Tahri M, Arfaoui A, Elouardi M, Dardaki M, et al. Assessment of Air Pollution and Lagged Meteorological Effects in an Urban Residential Area of Kenitra City, Morocco. *Atmosphere*. 2025 Jan 16;16(1):96.