

## Karakterisasi, Analisis Risiko Kesehatan dan *Multiple-Path Particle Dosimetry* (MPPD) Model Akibat Paparan Uap Las pada Pekerja Bengkel Pengelasan

Arif Susanto<sup>1,2\*</sup>, Muhamad Rizky Yudhiantara<sup>3,2</sup>, Edi Karyono Putro<sup>4,2</sup>, Prayoga Kara<sup>2</sup>, Nurulia Hidayah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Sekolah Vokasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

<sup>2</sup>Health Safety Environmental Department, Concentrating Division, PT Freeport Indonesia, Indonesia.

<sup>3</sup>Program Doktor Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil-Perencanaan-Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

<sup>4</sup>Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

\*Corresponding Author: [arifsusanto@mail.ugm.ac.id](mailto:arifsusanto@mail.ugm.ac.id)

Info Artikel: Diterima 2 September 2024 ; Direvisi 16 Oktober 2024 ; Disetujui 16 Oktober 2024

Tersedia online : 25 Oktober 2024 ; Diterbitkan secara teratur : Oktober 2024

**Cara sitasi:** Susanto A, Yudhiantara MR, Putro EK, Kara P, Hidayah N. Karakterisasi, Analisis Risiko Kesehatan dan Multiple-Path Particle Dosimetry (MPPD) Model Akibat Paparan Uap Las pada Pekerja Bengkel Pengelasan. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2024 Oct;23(3):349-361. <https://doi.org/10.14710/jkli.23.3.349-361>.

### ABSTRAK

**Latar belakang:** Pengelasan di industri pengolahan bijih mineral menimbulkan risiko kesehatan bagi pekerja akibat paparan uap las yang mengandung logam berbahaya seperti krom, mangan, tembaga, dan besi. Penelitian ini mengevaluasi risiko kesehatan pekerja di sebuah bengkel las dengan menganalisis data paparan personal dan karakteristik unsur logam spesifik dalam uap las selama periode 2021-2024.

**Metode:** *Multi-Path Particulate Dosimetry* (MPPD) digunakan untuk menganalisis deposisi partikel di saluran pernapasan pekerja dan pengukuran kadar logam pada uap las menggunakan metode NIOSH 7300 menggunakan instrumen ICP (*Inductively Coupled Plasma*). Analisis risiko dilakukan untuk menilai potensi peningkatan risiko kesehatan, baik karsinogenik maupun non-karsinogenik.

**Hasil:** Penelitian menunjukkan bahwa pekerja terpapar uap las dengan konsentrasi logam berbahaya yang tinggi, terutama krom, mangan, dan besi. Nilai risiko karsinogenik (ECR) untuk krom mencapai puncaknya pada tahun 2022 dengan nilai  $7,8 \times 10^{-5}$ , sementara nilai risiko non-karsinogenik logam mangan mencapai nilai tertinggi pada tahun yang sama dengan HQ sebesar 1568 tertinggi selama empat tahun terakhir, mengindikasikan terjadinya peningkatan risiko kesehatan. Simulasi model MPPD menunjukkan laju deposisi partikel total fume yang cukup tinggi pada tahun 2022, menunjukkan laju deposisi partikel total fume sebesar  $0,097 \mu\text{g}/\text{menit}$  dan deposisi partikel total fume per area mencapai  $1,27 \cdot 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^2$  selama periode pengamatan. Tingginya tingkat paparan dan deposisi partikel ini mengindikasikan risiko tinggi terjadinya penyakit saluran pernafasan, termasuk penyakit paru obstruksi kronis (PPOK) hingga kanker paru. Analisis risiko lebih lanjut mengkonfirmasi hubungan antara paparan krom dan mangan dengan peningkatan risiko kanker dan efek kesehatan non-kanker. Untuk mengurangi risiko kesehatan pekerja, disarankan penerapan pengendalian teknik seperti perbaikan sistem ventilasi lokal yang efektif, seperti penggunaan *fume extractor* atau *fume hood*, serta penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pernafasan berupa respirator dan pemeriksaan kesehatan berkala juga perlu dilakukan.

**Simpulan:** Pekerja pengelasan di industri pengolahan bijih mineral menghadapi risiko kesehatan yang tinggi akibat paparan uap las mengandung logam berbahaya. Perlu adanya tindakan pengendalian risiko yang komprehensif untuk melindungi kesehatan pekerja.

**Kata kunci:** uap las; logam berat; risiko kesehatan; NIOSH 7300; MPPD.

## ABSTRACT

**Title:** *Characterization, Health Risk Analysis, and Multiple-Path Particle Dosimetry (MPPD) Model Due to Welding Fume Exposure in Welding Workshop Workers*

**Introduction:** *Welding in the mineral ore processing industry poses significant health risks to workers due to exposure to welding fumes containing hazardous metals such as chromium, manganese, copper, and iron. This study evaluated the health risks of workers in a welding workshop by analyzing personal exposure data and the characteristics of specific metallic elements in welding fumes over the period 2021-2024.*

**Methods:** *Multi-Path Particulate Dosimetry (MPPD) was used to analyze particle deposition in the respiratory tract of workers, and the metal content in welding fumes was measured using the NIOSH 7300 method with an Inductively Coupled Plasma (ICP) instrument. Risk assessment was conducted to evaluate the potential increase in both carcinogenic and non-carcinogenic health risks.*

**Results:** *The study showed that workers were exposed to high concentrations of hazardous metals in welding fumes, particularly chromium and manganese. Excess carcinogenic risk (ECR) for chromium peaked in 2022 with a value of  $7.8 \times 10^{-5}$ , while the non-carcinogenic risk (HQ) for manganese reached its highest value in the same year at 1568, indicating an increased health risk. MPPD model simulations showed a significant rate of total fume particle deposition in 2022, with a deposition rate of  $0.097 \mu\text{g}/\text{min}$  and a deposition area of  $1.27 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^2$ . These high exposure and particle deposition levels indicate a high risk of respiratory diseases, including chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and lung cancer. Further risk analysis confirmed the association between exposure to chromium and manganese and an increased risk of cancer and non-cancerous health effects. To reduce worker health risks, it is recommended to implement engineering controls such as improved local ventilation systems, such as using fume extractors or fume hoods, as well as the use of respiratory personal protective equipment (PPE) and regular medical check-up.*

**Conclusion:** *Welders in the mineral ore processing industry face significant health risks due to exposure to welding fumes containing hazardous metals. Comprehensive risk control measures are needed to protect workers' health.*

**Keywords:** *heavy metals; health risks; NIOSH 7300; MPPD; welding fume.*

## PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan bagian sebuah pekerjaan terutama pada tahap fabrikasi, pemeliharaan, dan perbaikan peralatan maupun permesinan. Pengelasan yaitu proses ini melibatkan penyatuan dua atau lebih logam dengan menggunakan energi panas bertekanan tinggi.<sup>(1)</sup> Meskipun pengelasan memerlukan keahlian khusus, aktivitas ini membawa sejumlah risiko kesehatan yang timbul. Utamanya paparan asap (*fume*) dari hasil proses pengelasan. *Fume* merupakan partikel padat berukuran sangat kecil ( $<1 \mu\text{m}$ ) yang terbentuk dari pemanasan logam. Proses pengelasan menghasilkan *fume* yang terkandung berbagai jenis unsur logam seperti aluminium (Al), berilium (Be), kadmium (Cd), kromium (Cr), tembaga (Cu), besi-oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), timbal (Pb), mangan (Mn), molibdenum (Mo), nikel (Ni), Vanadium (V), dan Seng-oksida (ZnO) yang diantaranya merupakan material karsinogenik dan dapat menyebabkan penyakit paru-paru jika terhirup dalam jangka panjang bagi manusia.<sup>(2)</sup> Meskipun penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi risiko kesehatan terkait proses pengelasan, pemahaman yang lebih mendalam mengenai tingkat paparan dan dampak kesehatan

spesifik pada pekerja di industri tertentu, seperti industri pengolahan bijih mineral, masih diperlukan.

Partikel *fume* dengan diameter sangat kecil, yakni  $0,3 \mu\text{m}$ , umumnya terbentuk dari proses pengelasan *gas metal arc welding* (GMAW) dan *shielded metal arc welding* (SMAW) sebagai metode pengelasan yang umum digunakan.<sup>(3)</sup> Partikel sekecil ini sangat berbahaya karena dapat menembus jauh ke dalam paru-paru, hingga mencapai *alveolus*. Setelah itu, partikel-partikel ini dapat masuk ke dalam aliran darah dan menyebar ke seluruh tubuh, mencapai organ target.<sup>(4)</sup> Paparan jangka pendek terhadap *fume* dapat menyebabkan iritasi mata, iritasi saluran pernafasan, dan demam logam (*metal fever*). Dalam jangka panjang, risiko kesehatan yang serius dapat muncul, seperti penyakit paru obstruksi kronis (PPOK) dan berbagai jenis kanker karena unsur logam dalam *fume* dapat bersifat karsinogenik.<sup>(5,6)</sup> Selain *fume*, pekerja pengelasan terpapar risiko lain seperti panas berlebih, pancaran sinar ultraviolet, dan kebisingan. Pancaran sinar ultraviolet dapat merusak mata dan kulit, meningkatkan sudah drisiko katarak, dan kanker kulit.<sup>(7)</sup> Untuk mengurangi risiko kesehatan yang terkait dengan pekerjaan pengelasan, diperlukan

tindakan pencegahan yang komprehensif. Beberapa tindakan yang dapat dilakukan seperti pemantauan pajanan perseorangan terhadap pekerja, penerapan sistem ventilasi, dan penggunaan alat pelindung diri (APD).<sup>(2,8)</sup>

Berdasarkan *American Conferences of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) tahun 2024, nilai ambang batas (NAB) pajanan uap pengelasan sebagai *total fume* adalah 5 mg/m<sup>3</sup>, sementara untuk unsur logam spesifik lainnya seperti krom (Cr) 0,5 mg/m<sup>3</sup>; tembaga (Cu) 0,2 mg/m<sup>3</sup>; besi (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 5 µg/m<sup>3</sup>; dan mangan (Mn) 0,02 µg/m<sup>3</sup>.<sup>(9)</sup> Standar ini telah diadopsi ke dalam Peraturan Kementerian Ketenagakerjaan Nomor 5 tahun 2018. Untuk memastikan perlindungan pekerja, pengukuran pajanan bahan kimia berbahaya secara *real-time* dan dalam kondisi bekerja sebenarnya menjadi krusial. Maka dari itu, penelitian ini berfokus pada evaluasi risiko kesehatan akibat paparan *total fume* dan unsur logam spesifik pada pekerja bengkel pengelasan di kawasan industri pertambangan. Dengan menggunakan *Multi-Path Particulate Dosimetry* (MPPD) model dapat memperkirakan deposisi partikel di berbagai bagian sistem pernapasan pekerja. Data konsentrasi pajanan personal *total fume* dan logam spesifik lainnya menggunakan data retrospeksi pemantauan personal dari tahun 2021 hingga 2024. Data konsentrasi tersebut kemudian dianalisis untuk memahami lebih lanjut mengenai deposisi partikel berdasarkan ukuran dan risiko kesehatan (*karsinogenik dan non-karsinogenik*) yang disandang para pekerja yang terlibat dalam proses pengelasan. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menilai secara kuantitatif risiko kesehatan yang dihadapi pekerja akibat paparan uap las, serta mengidentifikasi unsur logam spesifik yang memberikan kontribusi terbesar terhadap risiko tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan memiliki implikasi yang luas bagi kesehatan pekerja, keberlanjutan bisnis, dan pengembangan kebijakan publik di bidang keselamatan dan kesehatan kerja.

## MATERI DAN METODE

### Populasi Penelitian

Sejak tahun 2021 hingga 2024, telah dilakukan pemantauan pajanan perseorangan uap pengelasan (*welding fume*) setiap empat bulan terhadap pekerja pengelasan pada beberapa bengkel las, yaitu bengkel yang berada di Enggros Yard, Jombang Yard, dan area tertentu di *Project Maintenance* di area industri pengolahan bijih mineral yang berada di Kota Tembagapura, Propinsi Papua Tengah. Pekerja pengelasan ini secara sukarela berpartisipasi dalam pemantauan untuk menyelidiki efek pajanan *metal fume* dari proses pengelasan metode SMAW, GTAW, maupun *Flux Core Arc Welding* (FCAW). Rata-rata, pekerja tersebut terpapar selama 8 jam per hari atau 40 jam per minggu di lingkungan kerja yang terkontaminasi.

### Pengambilan Sampel dan Analisis

Jumlah sampel responden pekerja ditentukan berdasarkan pedoman NIOSH<sup>(10)</sup> mengenai strategi pengambilan sampel paparan okupasional. Mengacu pada pedoman tersebut, dan mempertimbangkan jumlah pekerja las/ *welder*, pemantauan dilakukan terhadap 20 personel selama satu tahun, dengan frekuensi pemantauan 4 pekerja setiap tiga bulan pada setiap bengkel pengelasan secara bergiliran. Berdasarkan Pengambilan sampel pajanan uap pengelasan dilakukan mengikuti metode NIOSH 7300. Alat pemantauan pajanan personal dipasang pada kerah pekerja (*breathing zone*) selama 8 jam kerja untuk mengumpulkan sampel *welding fume* di udara dari pekerja yang sedang melakukan proses pengelasan. Sampel udara yang terkumpul kemudian dianalisis jenis unsur dan konsentrasi logam menggunakan instrumen ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) untuk mengukur konsentrasi lima logam spesifik (Cr, Ni, Fe, Cu, dan Mn).

### Analisis Risiko Kesehatan

Merupakan metode yang digunakan untuk memahami permasalahan kesehatan akibat pajanan zat kimia dan material berbahaya di lingkungan. Metode ini bertujuan untuk menilai mekanisme zat berbahaya dapat secara langsung mempengaruhi kesehatan manusia, sehingga dapat diambil tindakan pencegahan dan mengurangi dampak pajanan.<sup>(11)</sup> Metode ini menjelaskan bahwa analisis risiko kesehatan memungkinkan untuk mengidentifikasi bahaya, mengevaluasi hubungan antara dosis dan respon, serta mengukur tingkat pajanan. Pada pekerja pengelasan yang terpajan dalam jangka waktu lama, penilaian risiko kesehatan umumnya mengacu pada metode yang dikembangkan oleh United States *Environmental Protection Agency* (USEPA).<sup>(12)</sup> Proses penilaian risiko kesehatan melibatkan empat tahapan utama pada terdiri dari identifikasi bahaya, evaluasi pajanan, evaluasi dosis-respon, dan karakterisasi risiko. Evaluasi pajanan difokuskan pada pengukuran konsentrasi zat kimia di lingkungan kerja, terutama untuk karakterisasi risiko karsinogen dan non-karsinogen. Konsentrasi *total fume* dan unsur logam spesifik lainnya yang ter-inhalasi sebagai *Inhalation Exposure Concentration* (IEC) dapat dihitung menggunakan **Persamaan 1** sebagai berikut:

$$IEC = (CA \times IR \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, IEC adalah unit konsentrasi pajanan (mg/m<sup>3</sup>); konsentrasi senyawa berbahaya di udara lingkungan kerja (CA) dinyatakan dalam mg/m<sup>3</sup>; laju pernafasan manusia sebesar 20 m<sup>3</sup>/jam untuk laki-laki dengan aktivitas normal; waktu paparan pekerja di tempat kerja (ET) selama 8 jam/hari; frekuensi paparan pekerja di tempat kerja (EF) berdasarkan banyaknya hari kerja selama satu tahun 325 hari/tahun; ED (*Exposure Duration*) adalah durasi paparan bekerja diasumsikan selama 25 tahun; dan waktu paparan rata-rata (AT) dihitung dengan ED x 365 hari. IEC yang diperoleh kemudian digunakan

untuk menilai risiko kesehatan. Untuk risiko non-karsinogenik, IEC digunakan secara langsung. Namun, untuk risiko karsinogenik, IEC dikalikan dengan faktor pajanan seumur hidup selama 70 tahun.

Dalam penilaian risiko kesehatan, risiko non-karsinogenik dihitung menggunakan **Persamaan 2**, sedangkan risiko kanker dihitung menggunakan **Persamaan 3**. *Reference Concentration* (RfC) sebagai nilai toksisitas inhalasi, merupakan nilai konsentrasi referensi ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) yang digunakan untuk mengevaluasi *Hazard Quotient* (HQ) dalam risiko non-karsinogenik. Jika nilai HQ lebih besar atau sama dengan 1, maka bahan kimia beracun memiliki efek risiko non-karsinogenik, dan sebaliknya. Studi ini hanya dapat memperkirakan HQ untuk unsur spesifik mangan (Mn) karena nilai RfC untuk unsur logam tembaga (Cu) tidak tersedia pada *Agency for Toxic Substance and Disease Registry* (ATSDR). Perhitungan HQ dan ECR menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{HQ} = \text{IEC} / \text{RfC} \quad (2)$$

$$\text{ECR} = \text{IUR} \times \text{IEC} \quad (3)$$

Sementara itu, risiko kanker dihitung menggunakan *Excess Cancer Risk* (ECR), di mana IUR adalah risiko unit inhalasi ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Jika nilai risiko kanker lebih besar dari  $1.10^{-6}$ , maka pajanan bahan kimia tersebut memiliki risiko kanker yang lebih tinggi. Perhitungan risiko kanker hanya fokus pada dua logam yakni logam Cr dan Ni, karena nilai IUR untuk Fe tidak tersedia. Nilai spesifik RfC dan IUR diperoleh dari *database* sistem informasi risiko terpadu dari *ToxProfile* ATSDR.<sup>(13)</sup>

### Multi-path Particle Dosimetry (MPPD) Model

Studi dimulai dengan mengukur tingkat paparan uap las total (*total fume*) pada pekerja di area kerja pengelasan yang secara langsung pengambilan sampel pajanan uap pengelasan dilakukan mengikuti metode metode NIOSH 7300.<sup>(14)</sup> Metode ini dipilih karena dinilai paling sesuai untuk mengukur konsentrasi partikel logam dalam uap las dan menghitung rata-rata terimbang waktu (*Time Weighted Average/TWA*) konsentrasi uap las yang terhirup oleh pekerja selama satu *shift* kerja.<sup>(15)</sup> Data hasil pengukuran kemudian akan diproses dalam pemodelan menggunakan perangkat lunak MPPD v2.11 yang telah dikembangkan oleh *Applied Research Associates Inc*. Pemilihan menggunakan MPPD model untuk menggantikan studi *in vitro* dan inhalasi dengan pemodelan komputasi dosimetri serta dapat digunakan dalam penilaian risiko. Tetapi keterbatasan dalam penggunaan MPPD model yakni model mengasumsikan geometri saluran pernapasan yang disederhanakan, padahal anatomi saluran pernapasan setiap individu sangat bervariasi. Selain itu, model juga mengasumsikan distribusi ukuran partikel tertentu, sementara distribusi ukuran partikel di lingkungan

kerja seringkali kompleks dan dapat berubah-ubah. Kedua asumsi ini dapat mempengaruhi hasil simulasi.<sup>(16)</sup>

Penelitian ini menganalisis data konsentrasi *total fume* dari beberapa lokasi untuk memprediksi banyaknya partikel-partikel yang terhirup dan terdeposisi di berbagai saluran pernapasan pekerja. Perangkat lunak simulasi MPPD memperhitungkan berbagai faktor seperti distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, dan kepadatan partikel, serta karakteristik pernapasan individu. Pemodelan simulasi saluran pernapasan yang digunakan dalam penelitian ini cukup detail yang terdiri dari pilihan spesifik usia, pemodelan paru-paru *Weibel*, pemodelan saluran pernapasan *Yeh-Scum*, dan pemodelan stokastik lainnya.<sup>(16)</sup> Pemodelan ini dapat dikelompokkan menjadi pendekatan jalur tunggal dan multi-jalur, dimana metode jalur tunggal memperkirakan pengendapan debu dalam jalur representatif, sedangkan multi-jalur adalah metode yang memberikan pola deposisi inter dan intra-lobar.<sup>(17)</sup>

Pada tahapan pemodelan, dipilih model paru-paru lima lobus dengan parameter spesifik usia. Model ini memungkinkan untuk dapat menganalisis deposisi partikel di area paru-paru dan trakea-bronkioli (TB), serta memberikan pola deposisi inter dan intra lobar. Pada **Tabel 1** merinci nilai input parameter yang digunakan dalam pemodelan, termasuk kapasitas residu fungsional (FRC), saluran pernafasan bagian atas (URT), dan deviasi standar geometris (GSD) dalam model. Model MPPD ini mengklasifikasikan kondisi paparan *total fume* menjadi dua skenario, yakni konstan dan variabel. Pada simulasi skenario konstan, frekuensi pernapasan dan volume udara yang masuk ke paru-paru (*tidal volume*) dianggap tetap untuk setiap konsentrasi *total fume* tertentu. Sedangkan pada simulasi variabel, kedua parameter ini dapat berubah sesuai dengan tingkat aktivitas.<sup>(18)</sup>

Simulasi tersebut memungkinkan untuk dilakukan analisis distribusi partikel debu di berbagai bagian paru-paru mulai dari saluran utama hingga bagian dalam paru-paru. Model ini juga mampu memprediksi pola penumpukan partikel baik di antara maupun di dalam lobus paru-paru.<sup>(17)</sup> Dalam penelitian ini, penggunaan skenario di mana kondisi pernapasan pekerja diasumsikan stabil. Artinya, frekuensi pernapasan dan volume udara yang dihirup dianggap konstan untuk setiap tingkat paparan uap las. Selain itu juga digunakan nilai rata-rata konsentrasi *total fume* yang terukur di lapangan. Parameter pernapasan yang digunakan dalam simulasi ini mengacu pada standar internasional yang ditetapkan oleh *The International Commission on Radiological Prevention* (ICRP). Meskipun model simulasi ini dapat memperhitungkan berbagai kondisi pernapasan, dalam penelitian ini menggunakan asumsi bahwa semua partikel *total fume* masuk melalui hidung.

Tabel 1. Parameter Yang Digunakan Dalam Pemodelan MPPD

Morfonometri saluran nafas	Karakteristik partikel	Skenario paparan
Spesies: Manusia	Density: 1 g.cm <sup>-1</sup>	Konsentrasi debu di lokasi penelitian: <b>Konstan</b> bergantung nilai rata-rata konsentrasi pajanan debu respirabel personal dari tahun 2021-2024
Model: age-specific 5 lobe Age selected: 21 years FRC: 2123,75 mL (model value)	Aspect ratio: 1  Diameter: CMD GSD (length): 1	Tidal volume: 477,2 mL (model value) Inspiration fraction: 0.5 Breathing Frequency: 14 per minutes.
URT Volume: 42,27 mL (default value)	Particle distribution: Multiple Particle Size Range: 0,01-10 µm Inhability Adjustment: GSD (diameter): 1	Body orientation: upright  Breathing scenario: Nasal

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Identifikasi Bahaya Pajanan Uap Pengelasan

Setiap pekerjaan selalu terkandung bahaya, demikian juga yang dialami pada proses pengelasan (*welding*). Pekerjaan pengelasan adalah proses permesinan yang penuh bahaya dan risiko karena selalu berhubungan dengan api, bahan-bahan yang dapat terbakar maupun meledak. Bahaya ini dapat dibedakan menjadi bahaya karena sifat pekerjaannya seperti operasi mesin listrik, api, radiasi busur las, uap las, ledakan, termasuk kebisingan. Bahaya pengelasan dapat diklasifikasikan menjadi bahaya fisik dan bahaya kimia. Bahaya fisik meliputi *electrical shock*, radiasi *infrared*, *ultraviolet*, dan *visible light*, kebakaran, dan ledakan.<sup>(7)</sup> Ledakan terutama akan terjadi pada pengelasan tangki yang mengandung minyak hidrokarbon, gas, atau cat yang mudah terbakar, bahaya partikel panas yang beterbangan, kebisingan serta mekanik terjatuh atau tertimpa material. Dari berbagai jenis bahaya pekerjaan pengelasan tersebut perlu dilakukan analisis risiko kesehatan terutama pada pajanan uap pengelasan.<sup>(2)</sup> Hal tersebut disebabkan karena umumnya uap pengelasan mengandung logam spesifik yang berbahaya bagi kesehatan pekerja.

Uap pengelasan dihasilkan dari proses pengikatan metalurgi pada sambungan dua keping logam dengan energi panas bertekanan tinggi, sehingga logam tersebut menguap yang menghasilkan *fume*. Partikel *fume* memiliki rata-rata ukuran diameter <0,5 µm.<sup>(3)</sup> Partikel yang sangat kecil tersebut bersifat elektrostatis dan hidrofobik. Hal ini memungkinkan partikel dengan mudah menarik dan menampung kontaminan kimia di sekitarnya. Karakteristik aerodinamis dan densitas yang rendah memungkinkan debu tersuspensi sebagai debu kompleks (debu yang mengandung kontaminan) untuk tetap tersuspensi di udara dalam waktu yang lama. Selain itu debu tersebut dapat terbawa arus udara dan menempuh jarak jauh dari sumbernya.<sup>(19,20)</sup> Kemampuan partikel *fume* untuk membawa kontaminan di lingkungan kerja memungkinkan *fume* dapat bertindak sebagai pembawa agen potensial yang beracun dan karsinogenik pada saluran pernafasan manusia.

Program pemantauan pajanan uap pengelasan di bengkel-bengkel las yang berada di industri pengolahan bijih mineral ini dilakukan setiap empat bulan untuk pekerja yang terpapar proses pengelasan. Tujuannya adalah untuk mengkarakterisasi konsentrasi logam spesifik yang berbahaya bagi kesehatan pekerja. Logam-logam yang diamati meliputi kromium (Cr), besi (Fe), tembaga (Cu), dan mangan (Mn). **Tabel 2** merupakan informasi data toksisitas zat kimia yang berasal dari sumber *National Institute of Health* (21) bertujuan untuk memberikan informasi yang mudah dipahami mengenai bahaya suatu bahan kimia untuk melindungi kesehatan dan lingkungan. *Globally Harmonized System* (GHS) membagi bahan kimia menjadi beberapa kategori untuk logam kromium (Cr) (VI) umumnya masuk ke dalam kategori 1 sebagai bahaya yang sangat serius dan bersifat karsinogenik. Adapun untuk logam tembaga (Cu) masuk ke dalam kategori bahaya 2 karena bersifat dapat mengiritasi kulit dan mata. Sedangkan logam mangan (Mn) masuk ke dalam kategori bahaya 2 terkait dengan bahaya kesehatan jangka panjang, terutama kerusakan sistem saraf.

Tabel 2. Klasifikasi Bahaya terhadap kesehatan Logam Spesifik menurut *Globally Harmonized System* (GHS)

Trace Metal	CASRN	Klasifikasi GHS	
		Kategori Bahaya	H-Code
Cr	7440-47-3	1	H334
Fe	1309-96-5	-	-
Cu	7440-50-8	3	H331
Mn	7439-96-5	2	H373

Sumber: *Chemical Abstracts Services Registry Number* (CASRN); *Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals* (GHS).

Hasil rata-rata pemantauan uap logam perseorangan dapat dilihat pada **Tabel 3**. Berdasarkan tabel tersebut konsentrasi pajanan logam Cr pada tahun 2022 melebihi NAB sebesar 0,0077 mg/m<sup>3</sup> dan pajanan logam Mn yang masih melebihi NAB pada tahun 2021,

2022, dan 2023 sebesar 0,0535 mg/m<sup>3</sup>, 0,0784 mg/m<sup>3</sup>, dan 0,0294 mg/m<sup>3</sup>. Dengan demikian maka konsentrasi paparan logam tersebut harus menjadi perhatian utama dalam pengendalian paparan logam terutama Mn melalui *fume* pengelasan terhadap pekerja. Paparan inhalasi kronis terhadap logam Mn atau senyawa anorganiknya, terutama dalam konteks pekerjaan seperti pengelasan tentu berkorelasi dengan peningkatan risiko *manganisme* dan *defisit neurofungsional* subklinis.<sup>(22)</sup> Meskipun penyerapan Mn melalui saluran pernapasan hanya sebagian kecil dari total asupan harian, namun jalur ini sangat mudah dalam mentransportasikan Mn menuju otak. Akumulasi Mn yang berlebihan di bagian otak (*ganglia basal*) sebagai akibat dari paparan kronis dapat memicu perkembangan *manganisme*.<sup>(5)</sup> Oleh karena itu, sangatlah penting untuk mengambil langkah-langkah pengendalian dan mengurangi paparan *fume* di tempat kerja.

Tabel 3. Rata-Rata Konsentrasi Paparan Perseorangan Uap Pengelasan pada Pekerja Pengelasan

Rata-rata Konsentrasi Paparan Perseorangan	Total Fume (mg/m <sup>3</sup> )	Logam Cr (mg/m <sup>3</sup> )	Logam Fe (mg/m <sup>3</sup> )	Logam Cu (mg/m <sup>3</sup> )	Logam Mn (mg/m <sup>3</sup> )
2021	2,144	0,0022	1,013	N/A	0,0535
2022	3,641	0,0077	1,482	0,0238	0,0784
2023	1,588	0,0012	0,362	0,0044	0,0294
2024	1,783	0,0017	0,249	0,0057	0,0057
NAB (9)	5	0,003	5	0,1	0,02

### Penilaian Paparan

Analisis paparan dengan menghitung IEC dilakukan dengan mempertimbangkan lama paparan pekerja selama 8 jam per hari dan frekuensi paparan selama 325 hari kerja per tahun. Angka ini didasarkan pada asumsi bahwa pekerja memiliki waktu libur sebanyak 40 hari kerja per tahun, mengikuti pola kerja bergilir selama enam bulan. Hasil analisis pada **Gambar 2** secara umum, tingkat paparan *total fume* mengalami penurunan dari tahun ke tahun. Nilai tertinggi tercatat pada tahun 2022 sebesar 16,9017 mg/m<sup>3</sup> dan nilai terendah cenderung berada di tahun 2024. Tahun 2021 tingkat paparan cukup tinggi, dengan sebagian besar data berada diatas 6 mg/m<sup>3</sup>. Tahun 2022 sebagai tahun dengan tingkat paparan tertinggi, dengan nilai maksimum sangat tinggi dan terdapat satu data sebagai *outlier* yang jauh berbeda tinggi diantara data paparan lainnya. Adapun tahun 2023 terjadi penurunan yang signifikan dibandingkan tahun sebelumnya dan tahun 2024 tingkat paparan terus menurun dan berada pada tingkat terendah diantara tahun-tahun lainnya.

Analisis penilaian paparan IEC logam krom (Cr) pada **Gambar 3** secara umum, tingkat paparan kromium cenderung menurun dari tahun ke tahun, meskipun terdapat beberapa fluktuasi yang setiap tahunnya menunjukkan variasi yang cukup signifikan dalam tingkat paparan. Hal ini teramati dari kotak pada grafik yang memiliki rentang yang berbeda. Kotak tersebut mewakili rentang antara kuartil pertama dan

ketiga dari data, yang berarti 50% dari data berada dalam kotak tersebut. Data tahun 2021, tingkat paparan cukup tinggi, dengan sebagian besar data berada di atas 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Pada tahun 2022 terjadi penurunan dibandingkan tahun sebelumnya, namun masih terdapat beberapa nilai yang cukup tinggi 4,0350 mg/m<sup>3</sup>. Data tahun 2023, tingkat paparan terus menurun dan berada pada level terendah di antara tahun-tahun lainnya sebesar 0,0035 mg/m<sup>3</sup> dan data tahun 2024 terjadi sedikit peningkatan paparan dibandingkan tahun 2023, tetapi masih berada di bawah rata-rata tahun 2021 dan 2022.

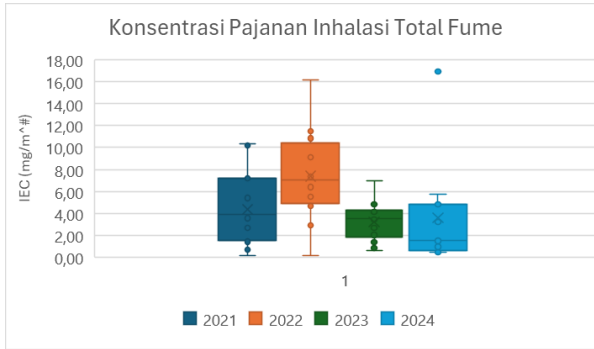
Analisis penilaian paparan IEC logam besi (Fe) pada **Gambar 4** setiap tahun menunjukkan penurunan dari tahun ke tahun, meskipun terdapat beberapa fluktuasi. Terdapat beberapa data titik yang berada di luar kotak sebagai *outlier* yang artinya nilai tersebut jauh berbeda dari data lainnya. Data paparan besi tahun 2021 tingkat paparan cukup tinggi, dengan sebagian besar data berada diatas 60 mg/m<sup>3</sup>. Pada paparan logam besi tahun 2022, terjadi penurunan dibandingkan tahun sebelumnya, namun masih beberapa nilai yang cukup tinggi tertinggi sebesar 372,53 mg/m<sup>3</sup>. Pada tahun 2023 tingkat paparan terus menurun dan berada pada tingkat terendah diantara tahun-tahun lainnya. Adapun pada tahun 2024, tingkat paparan sedikit meningkat dibandingkan 2023, tetapi masih berada di bawa rata-rata tahun 2021 dan 2022.

Analisis penilaian paparan logam tembaga (Cu) dapat dilihat pada **Gambar 5** yang secara umum, tingkat paparan tembaga melalui inhalasi cenderung menurun dari tahun ke tahun. Namun, ada beberapa fluktuasi yang perlu diperhatikan. Pengukuran tingkat paparan logam tembaga (Cu) tidak dilakukan, dikarenakan belum menjadi pertimbangan dalam penilaian paparan dalam analisis risiko kesehatan. Perbandingan setiap tahunnya, data tahun 2022 tingkat paparan tembaga cukup rendah, dengan sebagian besar data berada di bawah 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Data paparan tahun 2023 terjadi peningkatan dibandingkan tahun sebelumnya dengan nilai tertinggi sebesar 0,9293 mg/m<sup>3</sup>. Adapun data paparan tahun 2024, terjadi penurunan drastis dibandingkan tahun 2023, dan tingkat paparan berada pada tingkat terendah di antara tahun-tahun lainnya.

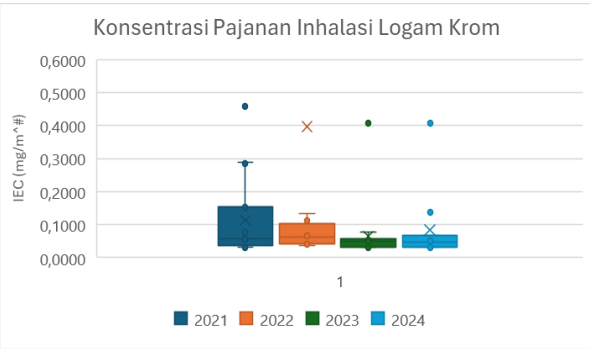
Analisis penilaian paparan terakhir untuk logam mangan (Mn) pada **Gambar 6** yang secara umum menunjukkan variasi yang cukup besar, dengan nilai IEC terendah sebesar 0,1282 mg/m<sup>3</sup> dan nilai tertinggi sebesar 44,9907 mg/m<sup>3</sup> di mana keduanya tercatat pada tahun 2024. Perbandingan tingkat paparan pada tahun 2021, tingkat paparan logam mangan cukup tinggi, dengan sebagian besar data berada di atas 10 mg/m<sup>3</sup>. Data tahun 2022 terjadi penurunan dibandingkan tahun sebelumnya, namun masih terdapat beberapa konsentrasi paparan logam mangan yang cukup tinggi. Data paparan 2023, tingkat paparan terus menurun dan berada pada tingkat terendah di antara tahun-tahun sebelumnya. Data paparan tahun 2024, terjadi peningkatan dibandingkan tahun 2023, tetapi masih

berada di bawah rata-rata tahun 2021 dan 2022. Berdasarkan kondisi tersebut, berdasarkan hasil analisis yang menjadi *Chemical of Concern* (CoC) berupa logam krom (Cr), logam mangan (Mn), dan

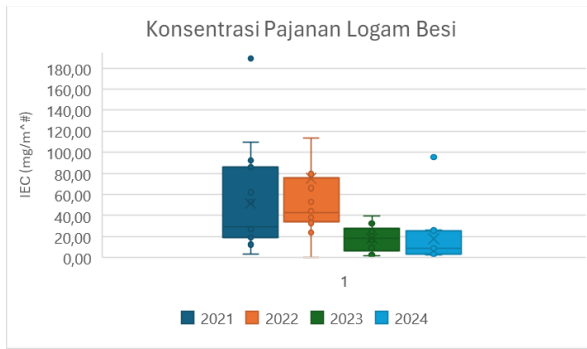
logam besi (Fe) perlu mendapat perhatian khusus dalam pemantauan efek kesehatan dan pengendalian pajanan pekerja, mengingat nilai IEC cukup tinggi dibandingkan logam lainnya.



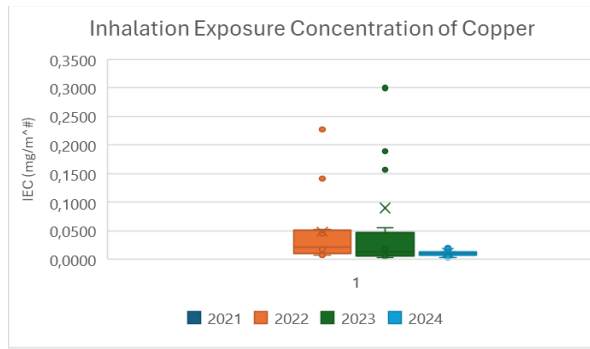
**Gambar 2.** Grafik hasil penilaian pajanan IEC untuk *total fume* pada pekerja pengelasan.



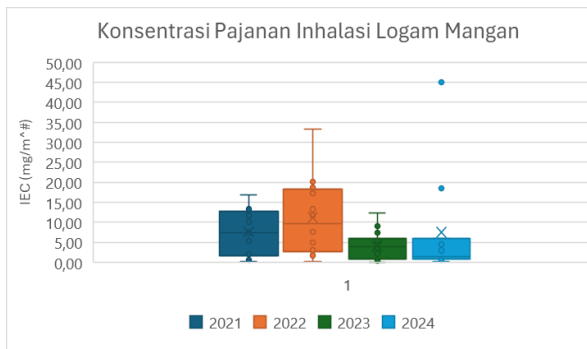
**Gambar 3.** Grafik hasil penilaian pajanan IEC untuk logam Cr pada pekerja pengelasan.



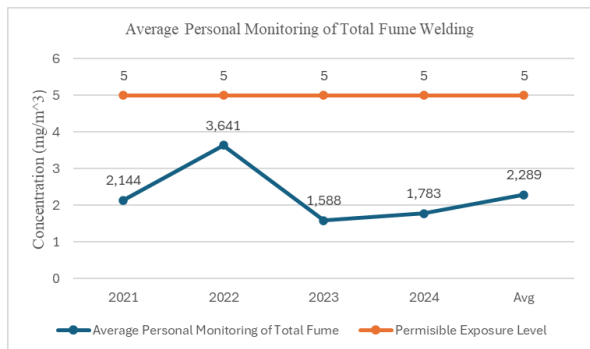
**Gambar 4.** Grafik hasil penilaian pajanan IEC untuk logam Fe pada pekerja pengelasan.



**Gambar 5.** Grafik hasil penilaian pajanan IEC untuk logam Cu pada pekerja pengelasan.



**Gambar 6.** Grafik hasil penilaian pajanan IEC untuk logam Mn pada pekerja pengelasan.



**Gambar 7.** Grafik Rata-rata Konsentrasi Pajanan *Total Fume* Pada Pekerja Pengelasan.

**Karakterisasi Risiko**

Analisis karakterisasi risiko dalam penelitian ini terbatas pada logam krom (Cr) dan mangan (Mn). Pada logam Cr, risiko karsinogenik dihitung menggunakan persamaan 3 yaitu menggunakan nilai *Inhalation Unit Risk* (IUR) sebesar  $1,02 \cdot 10^{-2} \text{ mg/m}^3$ . Sementara itu, risiko non-karsinogenik untuk logam Mn dihitung menggunakan persamaan 2 dengan menggunakan nilai *Reference Concentration* (RfC) sebesar  $5 \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}^3$  di mana keduanya berdasarkan ATSDR.(13) Hasil

keduanya merupakan nilai pendekatan probabilitas risiko terjadinya efek kesehatan, baik karsinogenik maupun non-karsinogenik. Data RfC atau IUR untuk karakterisasi risiko pajanan *total fume* serta logam spesifik lainnya seperti tembaga (Cu) dan besi (Fe) belum tersedia dalam database *ToxoProfile* di laman ATSDR sehingga belum bisa ditentukan karakterisasi risikonya.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Karakterisasi Risiko Karsinogenik (ECR) dan non-Karsinogenik (HQ) berdasarkan rata-rata IEC per tahun.

Tahun Pemantauan Pajanan Perseorangan Rata-rata (mg/m <sup>3</sup> )	Risiko	Risiko Non-
	Karsinogenik	Karsinogenik
	(ECR)	(HQ)
	Cr	Mn
2021	2,2.10 <sup>-6</sup>	1070
2022	7,8.10 <sup>-5</sup>	1568
2023	1,2.10 <sup>-5</sup>	588
2024	1,7.10 <sup>-5</sup>	114,8

Dalam penelitian ini, karakterisasi risiko dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata IEC tahunan dan hasilnya disajikan dalam **Tabel 4**. Risiko karsinogenik diinterpretasikan sebagai berikut: nilai risiko yang melebihi  $1.10^{-6}$  mengindikasikan kemungkinan seseorang terkena kanker atau dikenal sebagai *incremental probability of an individual developing cancer*. Mekanisme toksisitas beberapa karsinogen telah dipahami dengan baik, namun untuk karsinogen dengan mekanisme yang belum jelas diperlukan pendekatan analisis risiko yang berbeda. Sementara itu, risiko non-karsinogenik dinilai berdasarkan nilai HQ. Jika hasil nilai HQ lebih besar dari 1, maka kemungkinan timbul efek kesehatan non-kanker akan meningkat seiring dengan peningkatan pajanan.<sup>(12,23)</sup>

Hasil perhitungan karakterisasi risiko karsinogenik dan non-karsinogenik menunjukkan adanya potensi peningkatan risiko kesehatan pekerja yang terlibat dalam proses pengelasan akibat paparan logam krom (Cr) dan mangan (Mn) dalam empat tahun terakhir. Oleh karena itu, diperlukan penerapan tindakan pengendalian risiko untuk mengurangi pajanan uap pengelasan. Berdasarkan hierarki pengendalian, prioritas utama adalah pengendalian teknik dengan pemasangan *local exhaust ventilation* (LEV) sebagai sistem ventilasi yang dapat mengangkut kontaminan langsung dari sumbernya.<sup>(24)</sup> Beberapa jenis LEV yang umum digunakan adalah sistem LEV *on-gun* yang terintegrasi langsung dengan busur las dan unit LEV *portabel* yang menawarkan fleksibilitas yang tinggi.<sup>(25,26)</sup> Sistem *on-gun* sangat efektif dalam menangkap uap las secara langsung dari sumbernya, sementara unit *portabel* cocok untuk lingkungan kerja yang dinamis.<sup>(27)</sup> Kinerja kedua sistem ini sangat bergantung pada desain, pemasangan dan pemeliharaan yang tepat serta kepatuhan terhadap standar internasional seperti OSHA dan ACGIH.<sup>(28)</sup> Selain itu, pengendalian administratif seperti rotasi pekerja agar meminimalkan frekuensi pajanan dan membuat izin kerja (*job permit*). Upaya terakhir dalam pengendalian uap las dengan penggunaan alat pelindung diri (APD) seperti masker respirator, terutama dalam kondisi dimana LEV saja tidak mencukupi.<sup>(26,29)</sup> Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan meliputi jenis kontaminan yang akan disaring, konsentrasi kontaminan di udara, durasi pemakaian, serta kesesuaian dengan standar keselamatan yang berlaku, seperti NIOSH. Selain itu, pemilihan ukuran dan bentuk masker yang pas sangat

penting untuk memastikan segel yang baik dan efektivitas perlindungan.<sup>(30,31)</sup> Di Indonesia, penting untuk memastikan bahwa semua upaya pengendalian risiko ini, baik LEV maupun APD, memenuhi peraturan keselamatan kerja yang berlaku baik di tingkat nasional maupun internasional, demi melindungi kesehatan dan keselamatan para pekerja.

#### **Multipath Particulate Dosimetry (MPPD) Model pada Total Fume**

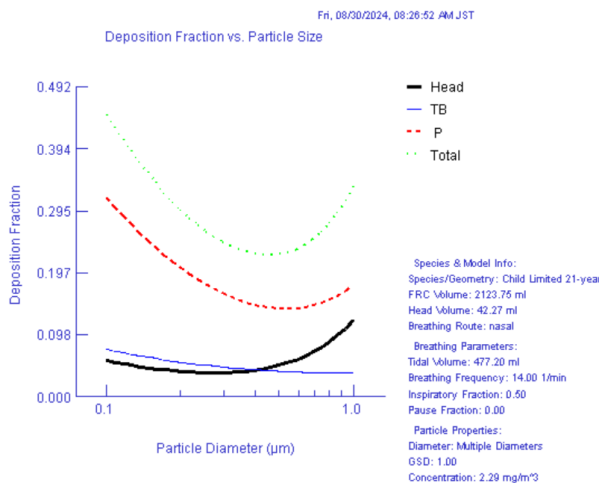
Dalam penelitian ini menggunakan data hasil pemantauan *total fume* perseorangan kepada pekerja yang melakukan pengelasan yang berada di area industri pengolahan bijih mineral dari tahun 2021 hingga 2024. Model deposisi secara komputasi digunakan untuk memahami lebih lanjut transportasi materi partikel *total fume* atau uap pengelasan ke dalam sistem pernafasan. Pada **Gambar 7** menunjukkan data pemantauan konsentrasi *total fume* perseorangan secara rata-rata selama empat tahun terakhir 2021 hingga 2024 adalah 2,289 mg/m<sup>3</sup>, dan nilai rata-rata konsentrasi *total fume* yang terukur setiap tahunnya adalah 2,144 mg/m<sup>3</sup>, 3,641 mg/m<sup>3</sup>, 1,588 mg/m<sup>3</sup>, 1,783 mg/m<sup>3</sup>. Hasil pemantauan ini mengindikasikan bahwa konsentrasi *total fume* umumnya berada di bawah nilai ambang batas yang diperbolehkan yaitu 5 mg/m<sup>3</sup> sesuai dengan standar dari ACGIH.<sup>(9)</sup>

**Gambar 8** menampilkan hasil pemodelan MPPD yang dirancang untuk memprediksi deposisi partikel *total fume* di saluran pernafasan pekerja pengelasan, yaitu berdasarkan konsentrasi paparan rata-rata 2,289 mg/m<sup>3</sup> selama empat tahun terakhir. Grafik ini membandingkan proporsi partikel dengan ukuran berbeda yang terdeposisi di empat area. Area tersebut terdiri atas garis hitam sebagai *Head* (H) yang mewakili fraksi deposisi di bagian kepala (*hidung dan bagian atas tenggorokan*); garis biru sebagai *Tracheobronchial* (TB) mewakili fraksi deposisi di saluran pernafasan bagian atas seperti trakea dan bronkus; garis putus-putus hijau sebagai fraksi deposisi di paru-paru (P); dan garis merah sebagai total mewakili total fraksi deposisi di seluruh saluran pernafasan. Sumbu-X merepresentasikan ukuran partikel dalam satuan mikrometer ( $\mu\text{m}$ ), dan sumbu-Y menunjukkan proporsi partikel yang terdeposit di setiap saluran pernafasan. Nilai yang lebih tinggi menandakan semakin banyak partikel yang mengendap di bagian tersebut.

Hasil analisis menunjukkan bahwa partikel dengan diameter kurang dari 0,1  $\mu\text{m}$  cenderung ter-inhalasi jauh ke dalam paru-paru yang terdeposisi pada *alveolus*. Hal ini akibat partikel dengan mudah mengikuti aliran udara dan tidak tertahan oleh mekanisme pertahanan tubuh sebagai penyaringan alamiah tubuh (silia dan mukus).<sup>(32,33)</sup> Partikel berukuran sedang 0,5-1,0  $\mu\text{m}$  umumnya tertahan di saluran pernafasan bagian atas hingga tengah karena dipengaruhi gaya inersia yang lebih besar. Partikel dengan rentang ukuran tersebut memiliki distribusi deposisi yang lebih merata, baik di saluran pernafasan



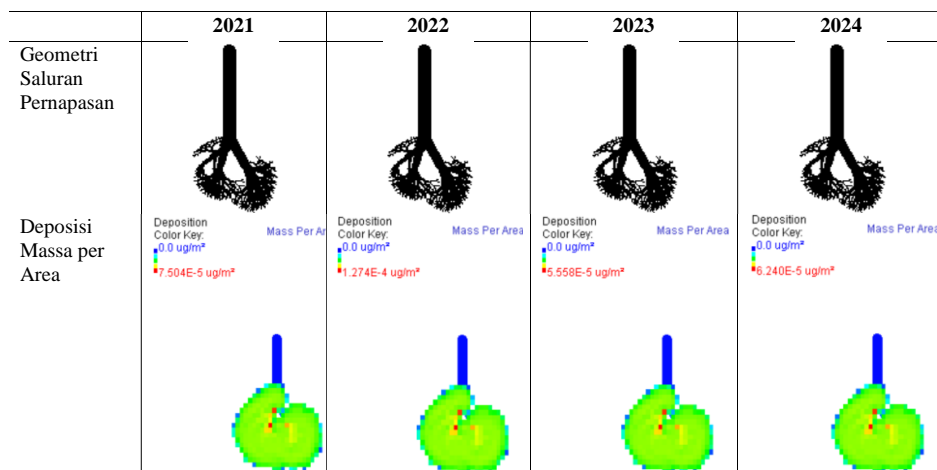
bagian atas (TB) maupun paru-paru (P).(18) Partikel dengan ukuran >1,0 µm cenderung akan tertahan oleh mekanisme penyaringan dalam sistem pernafasan seperti tertahan oleh silia (*bulu halus di saluran pernafasan bagian atas*) dan melalui mekanisme *mucociliary escalator*. Faktor-faktor yang mempengaruhi deposisi partikel *fume* ke dalam paru-paru yaitu bentuk partikel, densitas partikel dan kecepatan aliran udara. Partikel dengan bentuk yang tidak teratur cenderung terdeposisi lebih cepat dibandingkan partikel berbentuk bulat karena terjadi peningkatan karakteristik *aerodinamik*.(34) Faktor lain disebabkan densitas partikel yaitu kecenderungan partikel untuk lebih mudah mengendap. Pengendapan partikel ini ditentukan oleh padat tidaknya sebuah partikel dan pengaruh dari adanya gaya gravitasi. Pada faktor kecepatan aliran udara, di dalam saluran pernafasan dapat mempengaruhi jarak tempuh partikel. Semakin tinggi kecepatan aliran udara, maka semakin jauh partikel dapat terbawa.(17,35)



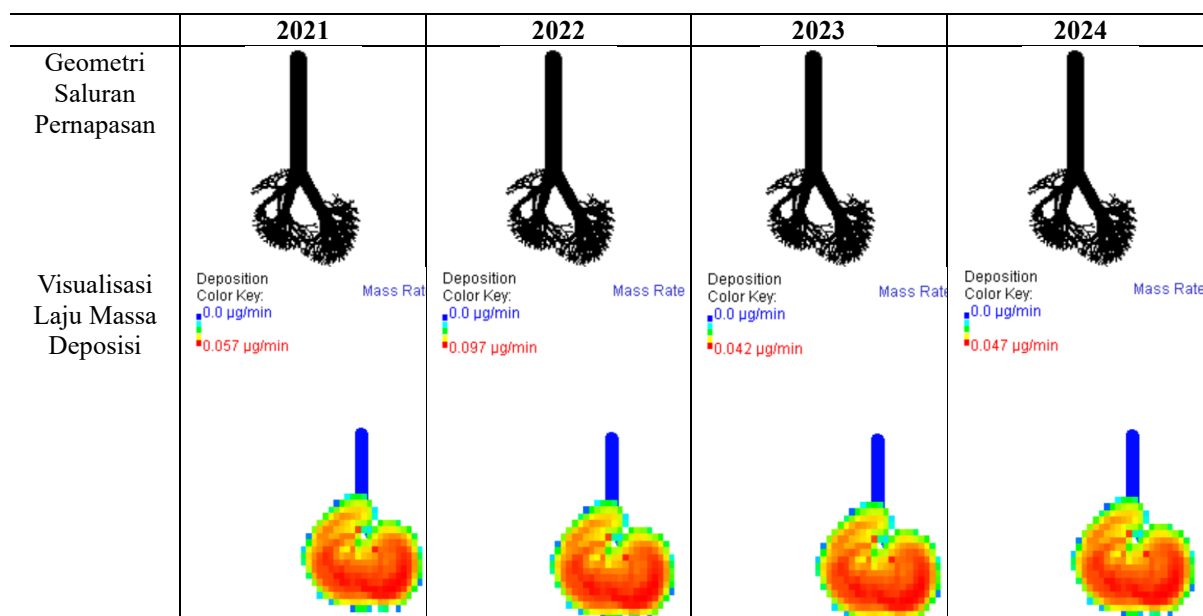
**Gambar 8.** Grafik Fraksi Deposisi Berbanding Ukuran Partikel Pada Model MPPD.

Deposisi massa per area pada model MPPD ditunjukkan pada **Gambar 9** sebagai hasil simulasi yang bertujuan untuk menggambarkan distribusi massa partikel debu per satuan luas pada organ paru-paru. Deposisi massa per area sebagai jumlah massa partikel yang menempel pada setiap satuan luas permukaan ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ), sedangkan warna kuning hingga merah menggambarkan deposisi massa tertinggi. Hasil visualisasi ini mampu memberikan informasi mengenai distribusi partikel *total fume* pada uap proses pengelasan yang paling banyak mengendap dan di mana konsentrasi yang terendah. Dengan visualisasi tersebut dapat menjelaskan area pada sistem pernafasan yang paling terpapar oleh partikel *fume*. Hasil simulasi model MPPD pada tahun 2022 menunjukkan massa deposisi *fume* per area sebesar  $1,27 \cdot 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^2$  (nilai tertinggi) dan  $5,56 \cdot 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^2$  (nilai terendah) pada tahun 2023.

Partikel *fume* yang ter-inhalasi masuk ke dalam saluran pernafasan hingga terdeposisi pada area organ paru-paru, yang lolos dari mekanisme pertahanan saluran pernafasan bagian atas. Partikel tersebut kemudian akan berinteraksi dengan jaringan hingga pada tingkat molekuler sel organ paru-paru melalui beberapa mekanisme. Mekanisme tersebut terdiri atas toksisitas sel secara langsung yaitu ketika partikel *fume* ter-inhalasi bersama kontaminan logam lainnya akan berinteraksi dengan permukaan sel (*reseptor*) yang menyebabkan kerusakan struktur membran sel dan pelepasan enzim *lipase* dan *protease*, yang akhirnya memicu jaringan parut pada paru-paru (*fibrosis*).<sup>(36)</sup> Permukaan partikel *fume* mengandung radikal bebas yang dihasilkan melalui *reaksi fenton* karena kandungan logam yang tinggi maka terbentuk *Reactive Oxygen Species* (ROS) dan *Reactive Nitrogen Species* (RNS) yang menyebabkan peroksidasi lipid, nitirasi protein, hingga kerusakan struktur rantai DNA.<sup>(4)</sup> Kontaminan logam berat dan logam transisi pada uap pengelasan atau *fume* ini dapat menginduksi kematian sel melalui mekanisme *apoptosis* dan *autophagy*.<sup>(19)</sup>



**Gambar 9.** Visualisasi Massa Deposisi per Area pada *Tracheobronchial* (TB) Saluran Pernafasan Pekerja Pengelasan untuk *Total Fume*.



**Gambar 10.** Visualisasi Laju Massa Deposisi pada *Tracheobronchial* (TB) Saluran Pernapasan Pekerja Pengelasan untuk *Total Fume*

Laju massa deposisi pada model MPPD ditunjukkan pada **Gambar 10** sebagai hasil simulasi. Simulasi ini diperoleh dengan tujuan untuk memperkirakan bagaimana partikel *fume* yang ter-inhalasi akan terdistribusi dan terdeposisi di berbagai bagian saluran pernapasan pekerja pengelasan. Laju massa deposisi sebagai seberapa cepat partikel *fume* menumpuk pada suatu titik di saluran pernapasan yang dinyatakan dalam satuan mikrogram per menit ( $\mu\text{g}/\text{min}$ ). Warna dalam visualisasi tersebut mewakili tingkat laju massa deposisi yang berbeda. Warna biru menunjukkan area dengan deposisi terendah ( $0 \mu\text{g}/\text{min}$ ), sedangkan warna merah menunjukkan area dengan laju deposisi tertinggi. Dengan demikian maka gambar visualisasi tersebut menunjukkan partikel *fume* yang ter-inhalasi cenderung terdeposisi pada area tertentu di saluran pernapasan dengan laju yang berbeda-beda. Area dengan warna cerah mengindikasikan daerah yang paling berisiko mengalami akumulasi partikel *fume* yang dapat menimbulkan efek penurunan fungsi pernafasan. Hasil simulasi model MPPD pada tahun 2022 menunjukkan laju massa deposisi partikel *fume* sebesar  $0,097 \mu\text{g}/\text{menit}$  sebagai yang tertinggi dan  $0,042 \mu\text{g}/\text{menit}$  sebagai nilai terendah pada tahun 2023. Laju deposisi partikel *fume* cenderung terdistribusi merata pada seluruh area paru-paru sehingga bila terdeposit dalam jumlah besar dapat menyumbat *alveolus* hingga terbentuk jaringan parut (*fibrosis*). *Fibrosis* inilah yang kemudian akan mempengaruhi integritas paru-paru untuk mengembang secara maksimal yang dapat ditandai dengan penurunan parameter fungsi pernafasan seperti *forced expiratory volume* detik pertama (FEV1) dan *forced vital capacity* (FVC) hingga timbul sesak nafas dan mengi.(37)

Paparan jangka panjang terhadap asap pengelasan dapat menimbulkan peningkatan prevalensi efek kronis seperti asma, PPOK, dan pneumoconiosis.(5,6) Kondisi kesehatan ini tidak hanya berdampak pada kualitas hidup pekerja, tetapi juga menimbulkan beban ekonomi yang signifikan bagi perusahaan. Biaya perawatan medis langsung, peningkatan premi asuransi, klaim kompensasi pekerja menjadi konsekuensi yang tidak terhindarkan. Selain itu, penurunan produktivitas akibat ketidakhadiran dan kinerja menjadi menurun yang dapat merugikan perusahaan, terutama dalam industri dengan intensitas proses pengelasan yang tinggi.(38,39) Oleh karena itu, penting bagi perusahaan untuk menerapkan kebijakan keselamatan pekerja yang komprehensif guna mengurangi risiko kesehatan pekerja dan meminimalkan dampak ekonomi yang ditimbulkan.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam upaya meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja di Industri pengolahan bijih mineral pada area proses pengelasan. Melalui karakterisasi yang detail terhadap jenis logam dan konsentrasi uap las, serta pengembangan model MPPD dalam identifikasi risiko kesehatan yang lebih spesifik bagi pekerja. Dengan pemahaman yang lebih baik, perusahaan dapat merancang program pengendalian risiko yang lebih efektif, seperti optimasi pengendalian sistem ventilasi lokal, pemilihan APD serta pelatihan penggunaannya, dan penjadwalan pekerjaan yang lebih aman. Selain itu, data yang diperoleh dari penelitian ini dapat menjadi dasar pembuatan kebijakan untuk menetapkan standar ambang batas pajanan yang lebih relevan dan mengembangkan regulasi yang lebih ketat terkait keselamatan kerja. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada penurunan risiko penyakit akibat kerja yang disebabkan oleh

pajanan uap las dan meningkatkan kualitas hidup para pekerja di Industri ini.

## SIMPULAN

Hasil penelitian ini mengkonfirmasi adanya hubungan antara paparan *fume* pengelasan dan peningkatan risiko penyakit, baik dalam jangka pendek maupun panjang. Analisis risiko yang dilakukan menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar *fume* pengelasan memiliki kemungkinan risiko lebih tinggi menimbulkan efek penyakit kanker dan efek penyakit non-kanker. MPPD model memberikan kemudahan untuk memahami mekanisme paparan dan deposisi partikel di saluran pernapasan. Hasil model MPPD menunjukkan bahwa karakteristik fisik partikel yaitu bentuk partikel, densitas partikel serta kondisi lingkungan kerja berupa kecepatan aliran udara sangat mempengaruhi risiko kesehatan pekerja pengelasan. Berdasarkan temuan dalam penelitian ini maka disarankan dapat menerapkan langkah-langkah pengendalian risiko yang komprehensif berdasarkan *hierarki* pengendalian risiko. Pengendalian tersebut meliputi pengendalian teknik dengan melakukan pemasangan sistem ventilasi lokal (LEV) untuk menangkap uap pengelasan langsung dari sumbernya. Selanjutnya untuk pengendalian administratif dengan melakukan rotasi pekerja, Mau pun penerbitan izin kerja. Adapun upaya terakhir yaitu penggunaan alat pelindung diri (APD) khususnya pada respirator dengan filter khusus untuk *fume*. Melalui penerapan langkah-langkah pengendalian tersebut, diharapkan dapat mengurangi paparan pekerja terhadap logam berat yang terkandung dalam *fume*. Juga sebagai upaya meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja pada bengkel pengelasan di industri pengolahan bijih mineral. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas langkah-langkah pengendalian yang telah diterapkan serta mengidentifikasi potensi bahaya lainnya yang terkait dengan proses pengelasan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Khedr M, Hamada A, Järvenpää A, Elkhatny S, Abd-Elaziem W. Review on the solid-state welding of steels: diffusion bonding and friction stir welding processes. *Metals*. 2022;13(1):54. <https://doi.org/10.3390/met13010054>
2. Bakri SFZ, Hariri A, Ismail M. Occupational health risk assessment of inhalation exposure to welding fumes. *Int J [Internet]*. 2020 [dikutip 26 Agustus 2024];8(1.2). Tersedia pada: [https://www.researchgate.net/profile/Siti\\_Zainal\\_Bakri/publication/344606348\\_Occupational\\_Health\\_Risk\\_Assessment\\_of\\_Inhalation\\_Exposure\\_to\\_Welding\\_Fumes/links/5f83fa92a6fdccfd7b5aa029/Occupational-Health-Risk-Assessment-of-Inhalation-Exposure-to-Welding-Fumes.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Siti_Zainal_Bakri/publication/344606348_Occupational_Health_Risk_Assessment_of_Inhalation_Exposure_to_Welding_Fumes/links/5f83fa92a6fdccfd7b5aa029/Occupational-Health-Risk-Assessment-of-Inhalation-Exposure-to-Welding-Fumes.pdf)
3. Takahashi J, Nakashima H, Fujii N. Fume particle size distribution and fume generation rate during arc welding of cast iron. *Industrial Health*. 2020;58(4):325–34. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2019-0161>
4. Peixoto MS, de Oliveira Galvão MF, Batistuzzo de Medeiros SR. Cell death pathways of particulate matter toxicity. *Chemosphere*. 1 Desember 2017;188:32–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.076>
5. Krishnaraj J, Kowshik J, Sebastian R, Raghavan SC, Nagini S. Exposure to welding fumes activates DNA damage response and redox-sensitive transcription factor signalling in Sprague-Dawley rats. *Toxicology letters*. 2017;274:8–19. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2017.04.001>
6. Sjögren B, Broberg K, Tinnerberg H, Albin M, Gustavsson P, Johanson G. An occupational exposure limit for welding fumes is urgently needed. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2022;48(1):1. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4002>
7. Gourzoulidis GA, Bouroussis CA, Achtipis A, Kazasidis M, Pantelis D, Markoulis A, dkk. Photobiological hazards in shielded metal arc welding. *Physica Medica*. 2023;106:102520. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.102520>
8. Siti Salami IR. Kesehatan dan Keselamatan Lingkungan Kerja. Edisi Revisi. Yogyakarta: UGM Press; 2021.
9. ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygiene: TLVs and BEIs, Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, Ohio, The United States; 2024.
10. Leidel NA, Busch KA, Lynch J. Occupational exposure sampling strategy manual. National Institute for Occupational Safety and Health., editor. Januari 1977; Tersedia pada: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/11158>
11. Mihelcic JR, Zimmerman JB. Chapter 6: Environmental Risk. Dalam: *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*. 2nd ed. United States: Wiley; 2012.
12. US Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund: pt. A. Human health evaluation manual. Vol. 1. US Environmental Protection Agency; 1989.
13. ASTDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Guidance for Inhalation Exposures. US Department of Health and Human Services, Public Health Service. 2021;
14. NIOSH. National Institute for Occupational Safety and Health: Manual of Analytical Methods (NMAM<sup>TM</sup>), 4th ed., Elements by ICP, Methods 7300. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, DHHS (NIOSH) Publication No. 2002-129S; 1994.
15. NIOSH. National Institute for Occupational Safety and Health: Workplace atmospheres, size fraction

- definitions for measurement of airborne particles in the workplace. CEN Standard EN. 1992;481:117–24.
16. Applied Research Associates, Inc. ARA - MPPD: Multiple-Path Particle Dosimetry Model [Internet]. 2020 [dikutip 16 Agustus 2024]. Tersedia pada: <https://www.ara.com/mppd/>
  17. Manojkumar N, Srimuruganandam B, Nagendra SS. Application of multiple-path particle dosimetry model for quantifying age specified deposition of particulate matter in human airway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;168:241–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.091>
  18. Miller FJ, Asgharian B, Schroeter JD, Price O. Improvements and additions to the Multiple Path Particle Dosimetry model. *Journal of Aerosol Science*. 1 September 2016;99:14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.01.018>
  19. Valavanidis A. Oxidative Stress and Pulmonary Carcinogenesis Through Mechanisms of Reactive Oxygen Species. How Respirable Particulate Matter, Fibrous Dusts, and Ozone Cause Pulmonary Inflammation and Initiate Lung Carcinogenesis. Dalam: Chakraborti S, Chakraborti T, Das SK, Chattopadhyay D, editor. *Oxidative Stress in Lung Diseases* [Internet]. Singapore: Springer Singapore; 2019 [dikutip 24 Juni 2024]. hlm. 247–65. Tersedia pada: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-8413-4\\_13](http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-8413-4_13). [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8413-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8413-4_13)
  20. Chen YH, Nguyen D, Brindley S, Ma T, Xia T, Brune J, dkk. The dependence of particle size on cell toxicity for modern mining dust. *Scientific Reports*. 2023;13(1):5101. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31215-5>
  21. NIH. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Database. [Internet]. [dikutip 30 Agustus 2024]. Tersedia pada: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
  22. Karyakina NA, Shilnikova N, Farhat N, Ramoju S, Cline B, Momoli F, dkk. Biomarkers for occupational manganese exposure. *Critical Reviews in Toxicology* [Internet]. 14 September 2022 [dikutip 30 Agustus 2024]; Tersedia pada: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408444.2022.2128718>
  23. Soemirat J. Analisis risiko kesehatan lingkungan. (No Title). 2013;
  24. McDermott H. Handbook of ventilation for contaminant control. 1985 [dikutip 30 Agustus 2024]; Tersedia pada: <https://www.osti.gov/biblio/7253446>
  25. Rosli NN, Yasak MF. Portable Local Exhaust Ventilation Unit for Welding Fumes. *Progress in Engineering Application and Technology*. 2021;2(1):972–8.
  26. Knott P, Csorba G, Bennett D, Kift R. Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods. *Safety*. 2023;9(3):42. <https://doi.org/10.3390/safety9030042>
  27. Ng CS. A study of the effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in training facilities building using computational fluid dynamics (CFD) approach [Internet] [PhD Thesis]. Universiti Tun Hussein Malaysia; 2013 [dikutip 16 Oktober 2024]. Tersedia pada: <http://eprints.uthm.edu.my/id/eprint/1999>
  28. Hasan NH, bin Said MR, Leman AM, Asmuin N. Validate of Local Exhaust Ventilation (LEV) Performance through Analytical, Experimental and Computational Fluid Dynamic (CFD): A Case Study Model. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;554:670–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.554.670>
  29. Dhillon BS. Engineering safety: fundamentals, techniques, and applications [Internet]. Vol. 1. World Scientific Publishing Company; 2003 [dikutip 30 Agustus 2024]. Tersedia pada: [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=P\\_E7DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=fundamental+safety+engineering&ots=I1rt6XHzun&sig=P3\\_d200BWZZzbn7-He2M9ixIROM](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=P_E7DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=fundamental+safety+engineering&ots=I1rt6XHzun&sig=P3_d200BWZZzbn7-He2M9ixIROM)
  30. Santandrea A, Chazelet S. Respiratory protective device: One size to fit them all? *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 3 Juni 2023;20(5–6):226–39. <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2205466>
  31. Kaptsov VA, Chirkin AV. The selection of the respirators as a result of studies of their workplace protection factors. 2019 [dikutip 16 Oktober 2024]; Tersedia pada: <https://www.cabidigitalibrary.org/doi/full/10.5555/20203372235>. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-8-845-850>
  32. Lehnert M, Pesch B, Lotz A, Pelzer J, Kendzia B, Gawrych K, dkk. Exposure to Inhalable, Respirable, and Ultrafine Particles in Welding Fume. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1 Juli 2012;56(5):557–67.
  33. Wippich C, Rissler J, Koppisch D, Breuer D. Estimating Respirable Dust Exposure from Inhalable Dust Exposure. *Annals of Work Exposures and Health*. 30 April 2020;64(4):430–44. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>
  34. Brown JS. Chapter 27 - Deposition of Particles. Dalam: Parent RA, editor. *Comparative Biology of the Normal Lung (Second Edition)* [Internet]. San Diego: Academic Press; 2015 [dikutip 19 Agustus 2024]. hlm. 513–36. Tersedia pada: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124045774000278>. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404577-4.00027-8>
  35. Islam MS, Saha SC, Sauret E, Gemci T, Gu Y. Pulmonary aerosol transport and deposition analysis in upper 17 generations of the human respiratory tract. *Journal of Aerosol Science*.

- 2017;108:29–43.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.03.004>
36. Longhin E, Holme JA, Gutzkow KB, Arlt VM, Kucab JE, Camatini M, dkk. Cell cycle alterations induced by urban PM<sub>2.5</sub> in bronchial epithelial cells: characterization of the process and possible mechanisms involved. *Part Fibre Toxicol.* 19 Desember 2013;10(1):63. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-63>
37. Gholami A, Tajik R, Atif K, Zarei AA, Abbaspour S, Teimori-Boghsani G, dkk. Respiratory Symptoms and Diminished Lung Functions Associated with Occupational Dust Exposure Among Iron Ore Mine Workers in Iran. *The Open Respiratory Medicine Journal* [Internet]. 11 Februari 2020 [dikutip 19 April 2024];14(1). Tersedia pada: <https://openrespiratorymedicinejournal.com/VOLUME/14/PAGE/1/.https://doi.org/10.2174/1874306402014010001>
38. Badima H, Kumie A, Meskele B, Abaya SW. Welding fume exposure and prevalence of chronic respiratory symptoms among welders in micro-and small-scale enterprise in Akaki Kaliti sub-city, Addis Ababa, Ethiopia: a comparative cross-sectional study. *BMC Pulmonary Medicine.* 2024;24(1):147. <https://doi.org/10.1186/s12890-024-02958-2>
39. Elifanov AV, Kovyazina OL, Lepunova ON, Shalabodov AD. The impact of working conditions on indicators of cardiorespiratory system and blood in electric welders with different length of work. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology).* 2018;25(3):27–32. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-3-27-32>



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