



# Analisis Risiko Kesehatan Paparan Debu Respirabel Pasca Impelementasi *Dust Supression System* di Industri Pengolahan Bijih Mineral

## Health Risk Analysis of Respirable Dust Exposure Following the Implementation of *Dust Supression System* in the Mineral Ore Processing Industry

Arif Susanto<sup>1\*</sup>, Nurulia Hidayah<sup>1</sup>, Savitri Citra Budi<sup>2</sup>, Lilik Dwi Setyana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Departemen Layanan dan Informasi Kesehatan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

<sup>2</sup> Departemen Layanan dan Informasi Kesehatan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

<sup>3</sup> Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

### ABSTRACT

*This study aimed to assess the health risks associated with respirable dust exposure following the implementation of a dust suppression system. A cross-sectional quantitative design was employed, involving 30 workers from PTX's based on NIOSH. Personal dust sampling was conducted using the NMAM0600 method. The results indicated that the average concentration of respirable dust was 0.4760mg/m<sup>3</sup>, below the threshold limit value (TLV) of 3 mg/m<sup>3</sup> set by the ACGIH. Risk characterization using the risk quotient (RQ), RQ<1. Simulation using the MPPD model revealed that particles with a diameter of approximately 4 μm had the highest deposition rate in the thoracic region of the respiratory tract, potentially triggering inflammatory responses and pulmonary fibrosis. Despite the low current exposure levels, continuous monitoring and enhancement of dust control measures are recommended to prevent long-term health effects such as silicosis and COPD. The study emphasizes the importance of regular health surveillance, appropriate use of personal protective equipment, and adherence to the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle to ensure occupational safety and health in mineral ore processing environments.*

**Keywords :** respirable dust, dust suppression system, health risk assessment, mineral processing, MPPD.

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko kesehatan akibat paparan debu respirabel setelah penerapan dust suppression system. Desain penelitian menggunakan pendekatan potong lintang, melibatkan 30 pekerja PTX berdasarkan NIOSH. Pengukuran personal menggunakan metode NMAM0600. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi debu respirabel berada di bawah nilai ambang batas (NAB) yang ditetapkan oleh ACGIH (3 mg/m<sup>3</sup>), rata-rata 0,4760 mg/m<sup>3</sup>, dan nilai risk quotient (RQ)<1. Simulasi menggunakan model MPPD menunjukkan bahwa partikel berukuran sekitar 4 μm memiliki potensi deposisi tertinggi di saluran pernapasan bagian bawah (thoracic), yang dapat memicu inflamasi dan pembentukan jaringan parut. Meskipun tingkat paparan saat ini tergolong aman, pengendalian debu perlu dipertahankan dan ditingkatkan secara berkelanjutan untuk mencegah akumulasi jangka panjang yang berpotensi menimbulkan penyakit akibat kerja seperti silikosis dan PPOK. Penelitian ini merekomendasikan pemantauan berkala, pemeriksaan kesehatan rutin, penggunaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, serta penerapan prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable) untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat.

**Kata Kunci :** debu respirabel, dust suppression system, risiko kesehatan, industri bijih mineral, MPPD.

Corresponding author : Arif Susanto  
Email : [arifsusanto@mail.ugm.ac.id](mailto:arifsusanto@mail.ugm.ac.id)

• Received 12 Oktober 2025 • Accepted 23 Oktober 2025 • Published 30 November 2025  
• p - ISSN : 2088-7612 • e - ISSN : 2548-8538 • DOI: <https://doi.org/10.25311/keskom.Vol11.Iss3.2374>

## PENDAHULUAN

Industri pengolahan bijih mineral merupakan sektor yang berisiko tinggi terhadap pencemaran udara, khususnya oleh debu respirabel yang dihasilkan selama proses produksi, seperti penghancuran dan penggilingan bijih. Debu respirabel terdiri dari partikel berukuran <4 mikron yang dapat terhirup hingga ke alveoli paru-paru, sehingga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, peningkatan produksi mukus, penyempitan saluran napas, dan penyakit paru kronis [1,2]. Penelitian pada tahun 2020, konsentrasi debu respirabel mencapai 6,109 mg/m<sup>3</sup>, melebihi ambang batas pajanan yang ditetapkan oleh *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), yaitu 3 mg/m<sup>3</sup> [3].

Meskipun penerapan sistem pengendalian debu seperti *dust suppression system* telah berhasil menurunkan konsentrasi debu hingga di bawah ambang batas aman (<3 mg/m<sup>3</sup>), potensi peningkatan paparan tetap ada, terutama di area penghancuran bijih yang menghasilkan konsentrasi debu tertinggi [4,5]. Hasil penelitian Susanto et al. (2025) terhadap data pemantauan debu respirabel personal tahun 2021-2024 pada 30 pekerja yang merupakan kelompok yang terpapar langsung diperoleh hasil bahwa kadar debu respirabel tersebut sebesar 0,2391 mg/m<sup>3</sup>. Rerata tahunan sebesar 0,2835 mg/m<sup>3</sup>, 0,2626 mg/m<sup>3</sup>, 0,1441 mg/m<sup>3</sup>, dan 0,2661 mg/m<sup>3</sup> yang umumnya berada dalam batas pajanan yang diizinkan [6].

Hasil simulasi model *multiple path particle dosimetry* (MPPD) untuk tahun 2021 menunjukkan laju deposisi massa maksimum sebesar 2,74.10<sup>-3</sup> µg/menit. Selain itu, deposisi massa partikel maksimum per area sebesar 7,374.10<sup>-3</sup> µg/m<sup>2</sup> [7]. Hasil penelitian tersebut tidak hanya mengukur total deposisi, tetapi juga fraksi deposisi di berbagai area paru-paru. Temuan penelitian tersebut dapat menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut tentang toksisitas debu yang terhirup dan pengembangan strategi pengendalian dan pencegahan pajanan debu di industri pengolahan bijih mineral. Penurunan

konsentrasi debu respirabel dari tahun ke tahun menunjukkan keberhasilan penerapan sistem pengendalian debu berbasis *dry fog*, yang mampu menurunkan konsentrasi debu hingga 78–93% [5]. Sistem ini bekerja dengan menyemprotkan kabut air berukuran mikron (<10 µm) yang mampu menangkap partikel debu dan mengendapkannya sebelum terhirup oleh pekerja [4].

Meskipun nilai *risk quotient* (RQ) menunjukkan kondisi aman yaitu kurang dari 1, penting untuk mempertahankan dan meningkatkan sistem pengendalian yang ada. Hal ini karena fluktuasi konsentrasi debu masih terjadi, dan potensi peningkatan paparan tetap ada, terutama di area penghancuran bijih yang menghasilkan debu dalam jumlah besar [6]. Paparan debu respirabel yang terus-menerus, meskipun berada di bawah ambang batas, tetap berisiko terhadap kesehatan pekerja. Oleh karena itu, diperlukan analisis risiko kesehatan yang komprehensif untuk menilai tingkat paparan dan efektivitas sistem pengendalian debu yang telah diterapkan. Selain itu agar dapat merumuskan strategi pengendalian yang berkelanjutan demi menjamin keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di industri pengolahan bijih mineral.

## METODE

### Desain, Lokasi, dan Waktu Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan survei dan desain potong lintang (*cross-sectional*). Desain ini digunakan untuk mengukur pajanan dan hasil (*outcome*) secara bersamaan pada satu waktu terhadap subjek penelitian, yaitu pekerja di pabrik pengolahan bijih mineral PTX. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko kesehatan akibat pajanan debu respirabel dan debu silika kristalin, serta efektivitas sistem pengendalian debu yang telah diterapkan.

Penelitian dilaksanakan di area produksi PTX yang berlokasi di Tembagapura, Kabupaten Mimika, Papua Tengah, Indonesia. Wilayah ini berada pada ketinggian 1980–4300 mdpl dan merupakan bagian dari konsesi pertambangan yang luas. Waktu pelaksanaan penelitian selama tiga bulan, yaitu dari Juli hingga September 2025.

## Teknik Sampling, Pengumpulan dan Pengolahan Data

Subjek penelitian adalah pekerja yang berstatus aktif di area produksi pengolahan bijih mineral PTX. Sampel diambil sebanyak 30 orang menggunakan teknik *purposive sampling*. Pemilihan sampel didasarkan pada kriteria *Similar Exposure Groups* (SEGs) [8], yaitu pekerja dari Departemen Maintenance (bagian mechanical dan electrical) serta operator produksi yang bekerja langsung di area pabrik pengolahan bijih mineral. Karyawan yang tidak bekerja di area produksi atau memiliki jabatan administratif dikeluarkan dari kriteria inklusi.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua sumber, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengukuran kadar debu respirabel secara personal menggunakan metode NIOSH *Manual of Analytical Methods* (NMAM) 0600. Instrumen yang digunakan meliputi *personal sampling pump* merk Sensidyne Gilian GilAir Plus dengan laju aliran 1,7 liter per menit, filter *Mixed Cellulose Esters* (MCE) berdiameter 25 mm dan pori 0,8  $\mu\text{m}$ , serta cyclone SKC aluminium. Kalibrasi alat dilakukan menggunakan BIOS Defender. Hasil pengukuran debu respirabel dianalisis secara *gravimetric*. Pengolahan data dilakukan melalui uji normalitas dan analisis statistik deskriptif menggunakan perangkat lunak IHSTAT™.

Data sekunder yang digunakan meliputi regulasi dan standar nilai ambang batas (NAB) dan *occupational exposure limit* (OEL) dari ACGIH ataupun Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. Analisis data dilakukan dengan uji normalitas, dilanjutkan dengan analisis statistik deskriptif untuk memperoleh nilai *mean*, *geometric mean*, *MVUE*, *UCL*, *UTL*, dan persentase pelampauan OEL.

## Analisis Risiko Kesehatan

Analisis risiko kesehatan mencakup empat tahap utama terdiri atas: identifikasi bahaya, evaluasi pajanan, evaluasi dosis respon, dan karakterisasi risiko. Evaluasi pajanan dilakukan dengan menghitung nilai *Chronic Daily Intake* (CDI) untuk debu respirabel. Evaluasi dosis respon menggunakan nilai *Reference Concentration* (RfC), *Reference Dose* (RfD), dan

*Inhalation Unit Risk* (IUR) yang diperoleh dari sistem IRIS United States Environmental Protection Agency (USEPA) [9]. Karakterisasi risiko dilakukan dengan menghitung *Risk Quotient* (RQ) untuk efek non-karsinogenik. Kadar debu respirabel diukur berdasarkan metode *personal sampling*.

## Etika Penelitian

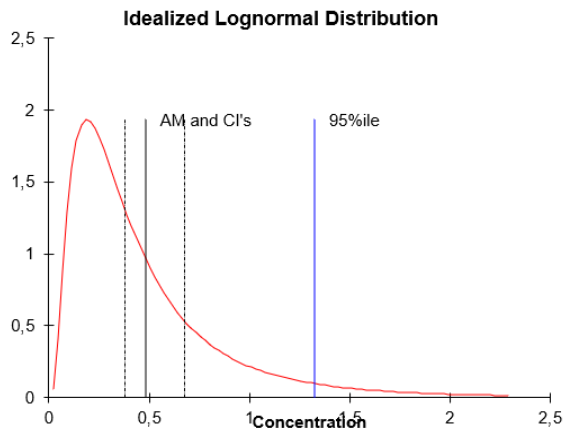
Penelitian ini telah memenuhi aspek etika penelitian. *Ethical clearance* telah dikeluarkan oleh Komisi Etik Penelitian Kesehatan (KEPK) Fakultas Ilmu dan Teknik Kesehatan Universitas Jenderal Achmad Yani dengan Nomor: 121/KEPK/FITKes-Unjani/VIII/2025. Seluruh partisipan telah menandatangani *informed consent* sebelum pengambilan data. Prinsip *anonimitas* dan *kerahasiaan* dijaga dengan tidak mencantumkan identitas partisipan dalam laporan hasil penelitian. Adapun untuk perizinan lokasi penelitian telah dikeluarkan oleh Departemen Learning dan Pengembangan Organisasi PTX dengan nomor Nomor: 029/TA-KP/L&OD-CPM/VIII/2025.

## HASIL

Hasil pengukuran debu respirabel kemudian dilakukan analisis data dengan melakukan uji normalitas. Dari hasil uji statistik diperoleh bahwa data terdistribusi lognormal. Hasil ini dapat dipergunakan dalam penentuan akseptabilitas seperti yang digambarkan pada Gambar 1. Hasil analisis data diperoleh nilai *Mean*, *Geometric Mean (GM)*, *Estimated Arithmetic Mean-MVUE*, *The Land's Exact UCL<sub>1,95%</sub>*, dan *Percent above OEL (%>OEL)* seperti tertera pada Tabel 1. Tabel 1 tersebut menunjukkan hasil pengukuran debu respirabel secara personal pada pekerja. Adapun Gambar 1 menunjukkan kurva distribusi lognormal hasil pengukuran debu respirabel. Semua nilai tersebut kurang dari nilai NAB, dengan *exceedance fraction* sebesar 0,383 di mana nilai tersebut lebih dari 5% atau kurang dari 50% NAB sehingga dapat disimpulkan bahwa pajanan bersifat rendah.

NAB untuk debu respirabel berdasarkan ACGIH (2025) yaitu sebesar 3  $\text{mg}/\text{m}^3$ , sehingga

semua nilai hasil pengukuran dapat disimpulkan kurang dari NAB [3]. Selain itu, fraksi pelampauan (*exceedance limit*) ditunjukkan dengan persen di atas OEL sebesar 0,383 (38,3%). Dengan demikian nilai pajanan berada kurang dari 50% NAB. Berdasarkan hasil tersebut, pajanan debu respirabel pada pekerja di area industri pengolahan bijih mineral PTX berada pada tingkat konsentrasi yang rendah.



Gambar 1. Kurva Distribusi Lognormal Hasil Pengukuran Debu Respirabel

Tabel 1. Hasil Uji Statistis Hasil Pengukuran Debu Respirabel

<i>Descriptive Statistics</i>	
Number of samples (n)	30
Maximum (max)	1,6144
Minimum (min)	0,1049
Range	1,5095
Mean	0,4760
Median	0,3750
Standard deviation (s)	0,3600
Mean of logtransformed data (LN)	-
Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,0330
Geometric mean (GM)	0,7990
Geometric standard deviation (GSD)	0,3560
<i>Lognormal Parametric Statistics</i>	
<i>Estimated Arithmetic Mean - MVUE</i>	
LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,4830
UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,3800
<b>95th Percentile</b>	0,6770
UTL <sub>95%,95%</sub>	1,3250
<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	2,0990
LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	0,3830
UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.100
	2,2400

Sumber: hasil penelitian (2025).

Analisis risiko kesehatan yang dilakukan terhadap pajanan debu respirabel menggunakan analisis dosis respon. Analisis dosis respon untuk pajanan debu respirabel dalam penelitian ini menggunakan formula untuk memperoleh nilai *chronic daily intake* (CDI), karena debu respirabel tidak memiliki efek karsinogenik. Berdasarkan rumus untuk menghitung CDI, maka ditetapkan nilai laju inhalasi (R) yaitu sebesar 0,83 m<sup>3</sup>/jam; waktu pajanan disesuaikan dengan waktu kerja pekerja yang terdiri atas tiga tipe yaitu 8 jam, 10 jam dan 12 jam. Frekuensi pajanan ditetapkan sesuai dengan jumlah hari di mana pekerja memiliki jumlah hari per tahun yaitu sebanyak 250 hari.

Adapun durasi pajanan ditetapkan yaitu sebesar 25 tahun sesuai dengan masa kerja rerata di industri pengolahan bijih mineral ini. Berat badan ditetapkan sebesar 70 kilo gram berdasarkan berat rerata pekerja, serta waktu rerata yaitu perkalian antara Dt dengan jumlah hari selama satu tahun yaitu 365 hari, sehingga diperoleh nilai sebesar 9.125. Hasil perhitungan nilai CDI untuk setiap perbedaan waktu pajanan terhadap debu respirabel dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan CDI dan RQ Pajanan Debu Respirabel

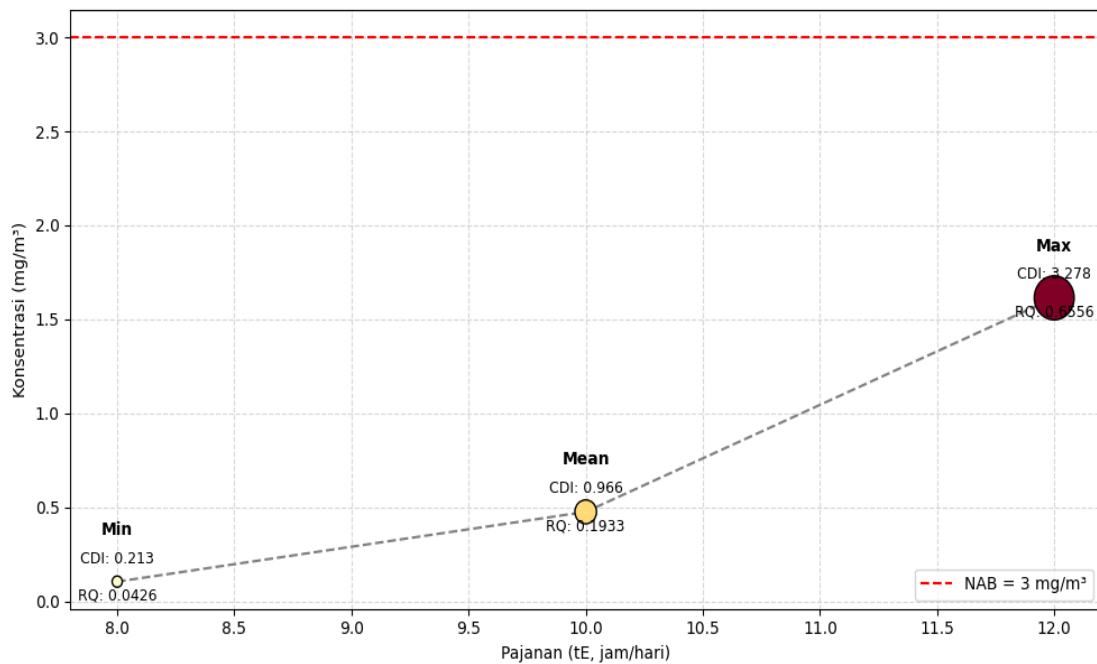
Konsentrasi (mg/m <sup>3</sup> )	Waktu Pajanan(jam/hari)	CDI (m <sup>3</sup> /kg)	RQ
0,1049	8	0,0068	0,0014
0,4760	10	0,0309	0,0062
1,6144	12	0,1049	0,0210
0,1049	8	0,0085	0,0017
0,4760	10	0,0387	0,0077
1,6144	12	0,1311	0,0262
0,1049	8	0,0102	0,0020
0,4760	10	0,0464	0,0093
1,6144	12	0,1573	0,0315

Sumber: hasil penelitian (2025).

Keterbatasan evaluasi dosis respons terhadap manusia dikarenakan perbedaan sensitivitas setiap individu dan banyaknya variasi rute pajanan [10]. Evaluasi dosis respons dilakukan untuk melihat hubungan yang konsisten antara jumlah zat yang masuk (*intake dose*) dengan respons efek terhadap kesehatan [11].

Grafik pada Gambar 2 menunjukkan hubungan antara konsentrasi ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) dan waktu pajanan (jam/hari). Warna titik menunjukkan nilai CDI

(semakin merah berarti semakin tinggi), ukuran titik menunjukkan nilai RQ (semakin besar berarti semakin tinggi).



**Gambar 2. Hubungan Konsentrasi dan Waktu Pajanan Debu Respirabel terhadap Peningkatan Risiko Kesehatan Pekerja** (Sumber: hasil penelitian, 2025).

Garis horizontal merah menunjukkan batas NAB yaitu sebesar  $3 \text{ mg}/\text{m}^3$ , menunjukkan bahwa semua titik berada di bawah NAB [3]. Hasil pengukuran debu respirabel menunjukkan konsentrasi tertinggi sebesar  $1,6144 \text{ mg}/\text{m}^3$ , dengan nilai CDI mencapai  $0,1049 \text{ m}^3/\text{kg}/\text{hari}$  pada waktu pajanan selama 8 jam. CDI meningkat menjadi  $0,1311 \text{ m}^3/\text{kg}/\text{hari}$  dan  $0,1573 \text{ m}^3/\text{kg}/\text{hari}$  untuk waktu pajanan 10 jam dan 12 jam kerja. CDI untuk debu respirabel akan selalu meningkat seiring dengan penambahan waktu kerja. Dari hasil perhitungan CDI pada tabel 2 tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk karakterisasi risiko agar diperoleh nilai *risk quotient* (RQ). Nilai RQ ini diperoleh dari hasil pembagian nilai CDI dengan RfC. Nilai RfC yang digunakan untuk debu respirabel disesuaikan dengan data dari IRIS USEPA, yaitu sebesar  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$  [9]. Bila nilai  $\text{RQ} < 1$ , maka disimpulkan bahwa tingkat risiko pajanan debu respirabel ini tidak memiliki risiko. Sebaliknya, apabila nilai

$\text{RQ} > 1$ , maka disimpulkan bahwa tingkat risiko pajanan debu respirabel ini memiliki risiko kesehatan bagi pekerja [6].

## PEMBAHASAN

Secara umum bahwa proses pengolahan bijih mineral di PTX dapat mengemisikan debu respirabel secara signifikan pada udara di lingkungan kerja yaitu proses *crushing*. *Crushing* merupakan sebuah proses penghancuran bebatuan mineral atau biasa disebut dengan *ore* yang diterima untuk dari *stockpile*. Pada proses penghancuran tersebut, bijih mineral akan dihancurkan dan dijepit di antara dua permukaan logam keras, sehingga ukuran dari bijih mineral akan berkurang sesuai ukuran yang diinginkan. Proses *crushing* merupakan proses pengolahan dengan sistem kering tanpa adanya bantuan penambahan air. Dengan demikian, proses *crushing* tentu menghasilkan debu di lokasi sekitar mesin *crusher*. Bersama proses ini, dilanjutkan ke proses selanjutnya dan masih

tergolong dalam kesatuan proses *crushing*, yaitu *conveying* [12].

Proses *conveying* ini bertujuan untuk mengalirkan bijih yang telah lolos pada proses *crushing* dengan menggunakan ban berjalan (*conveyor*) ke proses selanjutnya yaitu *grinding*. Berbeda dengan proses penghancuran menggunakan *crusher*, pada tahap *grinding* di fase pertama menggunakan metode *Semi Autogenous Grinding (SAG) Mill* yang membutuhkan penggunaan air dalam prosesnya [6,12]. Proses *SAG Mill* ini merupakan penghancuran bijih lebih halus lagi dengan mekanisme tumbukan antara dua logam keras berbentuk bola di dalam sebuah drum besar. Bijih yang sudah dipecah sebelumnya pada proses *crushing*, pada proses *grinding* ini maka batuan akan mengalami perubahan fisik, sehingga di dalamnya terbentuk bubuk konsentrat atau *slurry*. Proses ini menghasilkan debu dengan intensitas jauh lebih rendah daripada *crusher*. Hasil penghancuran *SAG Mill*, kemudian dilakukan pengayakan dengan bantuan *screen* [6].

Pada proses *screening* akan dipisahkan bijih mana yang dapat masuk ke proses *grinding* tahap kedua. *Grinding* tahap kedua ini menggunakan metode *Ball Mill* dengan proses yang mirip dengan *SAG Mill*. Perbedaan hanya didasarkan dari ukuran drum dan bola-bola yang berukuran lebih kecil dalam proses penghancuran bijih untuk diteruskan pada proses selanjutnya yaitu *floatasi*. Pada proses *screening* digunakan cukup banyak air untuk memisahkan bijih yang ukurannya lebih kecil masuk ke *Ball Mill* tersebut. Adapun bijih yang tidak lolos *screening* kemudian masuk kembali ke dalam *SAG Mill* dengan bantuan *conveyor*. Tahap proses *Ball Mill*, emisi debu relatif lebih sedikit dibandingkan proses *SAG Mill* dan *screening*. Proses ini serupa dengan pengolahan menggunakan *SAG Mill*, yaitu diperlukan adanya air dalam proses penggilingan batu yang sebelumnya sudah dihancurkan melalui *crusher* ataupun *SAG Mill* tersebut. Proses *grinding* berpotensi mengeluarkan emisi debu yang lebih sedikit apabila dibandingkan dengan pengolahan menggunakan *crusher*. Setelah

digiling, bijih mineral tersebut masuk ke dalam tahap *floatasi* [12].

Proses *floatasi* merupakan pencampuran reagen kimia ke dalam hasil penggilingan bijih mineral berupa lumpur halus (*slurry*) untuk menghasilkan konsentrat tembaga-emas. *Slurry* terdiri dari bijih yang sangat halus bercampur dengan air dan reagen. *Slurry* ini kemudian dimasukkan ke dalam serangkaian tangki pengaduk yang disebut dengan sel *floatasi*. Reagen yang digunakan terdiri atas kapur, pembuih (*frother*) dan kolektor. Pembuih ini membentuk gelembung yang stabil, yang mengapung ke permukaan sel *floatasi* sebagai buih. Adapun kolektor berfungsi mengumpulkan mineral berharga agar mudah menempel ke buih tersebut. Reagen kolektor bereaksi dengan permukaan partikel mineral sulfida logam berharga, sehingga menjadikan permukaan tersebut bersifat hidrofobik. Proses *floatasi* ini memiliki potensi mengeluarkan emisi debu, walaupun lebih sedikit dibandingkan *grinding*. Emisi debu ini dihasilkan pada proses pengadukan *slurry* oleh agitator di sel *floatasi*. Selain itu, emisi debu dapat ditimbulkan dari pecahnya gelembung yang kemudian terbawa udara di sekitar. Debu basah yang terbawa oleh udara tersebut kemudian menempel pada struktur peralatan, permesinan, dan termasuk struktur bangunan. Setelah debu tersebut mengering, terlepas dan melayang di udara lingkungan kerja.

Berdasarkan Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa nilai  $RQ < 1$ . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tingkat risiko pajanan debu respirabel ini tidak memiliki risiko kesehatan bagi pekerja [6]. Namun demikian, dalam rangka melindungi kesehatan pekerja, kriteria yang digunakan untuk mengklasifikasikan partikel debu sebagai fraksi toraks dan respirabel dalam lingkungan kerja hendaknya harus dibuat lebih ketat. Kriteria lebih ketat ini mengasumsikan karena sifat partikel debu yang dapat menembus lebih dalam saluran pernapasan daripada yang sebenarnya terjadi [13]. Peningkatan kriteria yang lebih ketat mampu memberikan margin keamanan yang lebih besar bagi pekerja. Ukuran partikel

debu dengan diameter aerodinamik 4  $\mu\text{m}$  sebagai batas atas untuk fraksi respirabel pada individu laki-laki dalam kondisi aktivitas sedang.

Hasil penelitian ini sejalan dengan definisi debu respirabel yang ditetapkan. Sekitar 50% dari partikel berukuran 4  $\mu\text{m}$  diperkirakan dapat mencapai alveoli sebagai bagian terdalam dari paru-paru manusia. Besaran fraksi debu respirabel untuk berbagai ukuran partikel yang dapat mencapai bagian dalam paru-paru diuraikan seperti pada Tabel 3 [3]. Debu respirabel memiliki ukuran partikel <4  $\mu\text{m}$  yang dapat mencapai *alveolus* dan menyebabkan gangguan pernapasan kronis.

**Tabel 3. Fraksi Debu Respirabel Mencapai Bagian Dalam Paru-Paru**

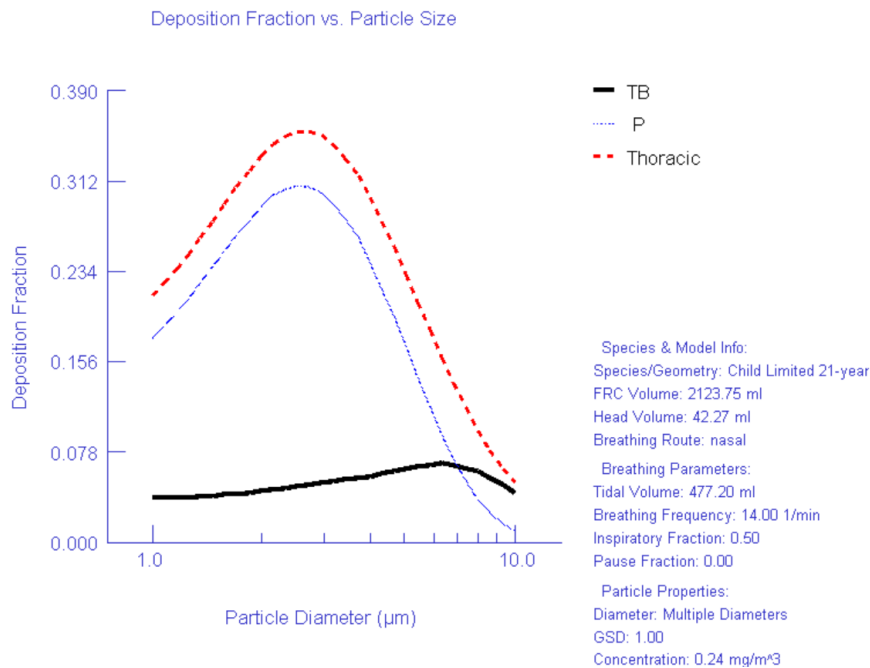
Diameter aerodinamik median massa ( $\mu\text{m}$ )	Fraksi debu respirable yang tertahan (%)
<0,5	100
1	97
2	91
3	74
4	50
5	30
6	17
7	9
8	5
10	1

Sumber: ACGIH (2025).

Pengambilan dan pengukuran sampel konsentrasi untuk total *particulate matter* (PM) hanya memberikan perkiraan kasar mengenai pajanan partikel debu yang terhirup. Pola regional deposisi partikel di saluran pernapasan sangat mempengaruhi efek kesehatan yang ditimbulkan. Pengukuran konsentrasi PM total mungkin tidak berkorelasi dengan efek kesehatan yang diamati secara spesifik. Kondisi ini terutama jika risiko kesehatan lebih terkait dengan partikel yang dapat mencapai bagian toraks atau menembus saluran

pernapasan bersilia [14]. Hasil penelitian Susanto et al. (2025) menunjukkan visualisasi model *Multiple Path Particle Dosimetry* (MPPD) yang untuk memprediksi bagaimana partikel debu yang terhirup akan terdistribusi dan terdeposisi di berbagai bagian saluran pernafasan pekerja. Laju massa deposisi sebagai ukuran seberapa cepat massa partikel debu menumpuk pada suatu titik di saluran pernafasan yang dinyatakan dalam mikrogram per menit ( $\mu\text{g}/\text{min}$ ). Data dari hasil pemantauan konsentrasi debu respirabel perserorangan secara rata-rata selama dari 2021 sampai 2024 [6,7].

Data hasil pemantauan tersebut yaitu sebesar 0,2391  $\text{mg}/\text{m}^3$ , dan nilai rata-rata konsentrasi debu yang terukur pada setiap tahunnya adalah 0,2835  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 0,2626  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 0,1441  $\text{mg}/\text{m}^3$ , dan 0,2661  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Berdasarkan hasil pemantauan tersebut mengindikasikan bahwa konsentrasi debu respirabel umumnya berada di bawah NAB yang diperkenankan yaitu 3  $\text{mg}/\text{m}^3$  [3]. Gambar 3 menampilkan hasil simulasi model MPPD yang dirancang untuk memprediksi deposisi partikel di saluran pernafasan pekerja, berdasarkan konsentrasi pajanan rata-rata 0,2391  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Grafik tersebut membandingkan proporsi partikel dengan ukuran berbeda yang terdeposisi di tiga wilayah utama, terdiri atas saluran pernafasan bagian atas *tracheobronchial* (TB), paru-paru (P), dan seluruh saluran pernafasan (*thoracic*). Sumbu-X mewakili ukuran partikel dalam  $\mu\text{m}$ , sedangkan sumbu-Y menunjukkan presentase deposisi (%). Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa partikel dengan diameter rata-rata sekitar 4  $\mu\text{m}$  memiliki fraksi deposisi massa tertinggi, terutama di wilayah *thoracic*. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel dengan ukuran tersebut paling banyak terdeposisi di saluran pernafasan bagian bawah [7].



**Gambar 4. Grafik Deposisi Fraksi versus Ukuran Partikel pada Model MPPD (Sumber: Susanto et al., 2025)**

Adapun rentang ukuran partikel multiple-particle 1,0 sampai 10,0 μm, partikel berdiameter 4 μm mendominasi di area *thoracic*. Model tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel debu merupakan faktor penentu utama lokasi terdeposisi. Partikel debu yang lebih besar cenderung tertahan di saluran pernafasan bagian atas, sedangkan partikel yang lebih kecil dapat mencapai *alveoli*. Informasi ini berguna untuk memahami mekanisme pendeposisian partikel debu dan dampak terhadap fungsi pernafasan. Faktor-faktor yang mempengaruhi deposisi partikel debu di saluran pernafasan yaitu ukuran partikel, bentuk partikel, densitas partikel, dan kecepatan aliran udara. Partikel yang memiliki ukuran 1-3 μm umumnya tertahan di saluran pernafasan bagian atas karena gaya *inersia* yang lebih besar [15].

Partikel dengan ukuran 3-10 μm memiliki distribusi deposisi yang lebih merata, baik di saluran pernafasan bagian atas maupun paru-paru. Partikel berukuran <1 μm cenderung mencapai daerah *alveoli* di paru-paru karena mengikuti aliran udara. Bentuk partikel yang tidak teratur cenderung terdeposisi lebih cepat dibandingkan dengan partikel berbentuk bulat, karena terjadi peningkatan deposisi aerodinamik [15-17]. Selain

ukuran dan bentuk partikel, deposisi dipengaruhi juga oleh densitas partikel dan kecepatan aliran udara. Densitas partikel yang lebih padat memiliki gaya gravitasi yang lebih besar sehingga lebih mudah terendap. Juga adanya kecepatan aliran udara di dalam saluran pernafasan dapat mempengaruhi jarak tempuh partikel. Semakin tinggi kecepatan aliran udara, semakin jauh partikel dapat terbawa [15,16].

Deposisi partikel yang tinggi di area *thorax* umumnya memicu respon imun. Partikel debu yang terhirup dapat disingkirkan oleh sistem imun, terutama oleh makrofag alveolar [18]. Ketika teraktivasi, makrofag alveolar, sel epitel saluran napas, dan sel lainnya akan menghasilkan berbagai sitokin seperti TNF- $\alpha$ . Sitokin ini akan menarik sel imun lainnya ke bagian paru-paru, memicu respons inflamasi yang lebih lanjut, dan merusak jaringan paru. Selain itu, mengaktifasi fibroblas, sehingga meningkatkan produksi kolagen dan menyebabkan fibrosis paru, yaitu pembentukan jaringan parut di paru-paru [19,20]. Pembentukan jaringan parut di paru-paru dapat menyebabkan pengurangan integritas paru-paru untuk dapat mengembang secara sempurna atau disebut restriksi [13].



Partikel debu yang terinhalasi umumnya akan disingkirkan oleh sistem imun, terutama makrofag alveolar. Makrofag yang teraktivasi ini kemudian akan memproduksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) dan *Reactive Nitrogen Species* (RNS) yang menyebabkan peroksidasi lipid dan nitrosasi protein, hingga merusak *deoxyribonucleic acid* (DNA). Fraksi debu respirable yang terinhalasi secara khusus memicu stress oksidatif [18]. ROS dan RNS yang tinggi melemahkan kemampuan paru-paru dalam meredam oksidan, sehingga menyebabkan peradangan (inflamasi). Faktor-faktor pro-inflamasi tersebut akan menarik sel imun lain ke paru-paru, kemudian menghasilkan mediator inflamasi dan kerusakan sel. Selain itu, faktor tersebut mengaktifkan fibroblas, sehingga meningkatkan produksi protein matriks ekstraseluler, yang berujung penimbunan kolagen dan akhirnya jaringan parut pada paru-paru terbentuk [19,20].

Melalui mekanisme tersebut maka terjadinya *pneumoconiosis* dan PPOK yang umumnya merupakan penyakit akibat kerja (PAK), pada organ paru-paru dari akibat terakumulasinya material debu dan efek reaksi jaringan pulmoner terhadap debu [21]. Proses penyakit tersebut yang mendasari adanya perubahan diameter dan integritas saluran respirasi, menyebabkan peningkatan resistensi aliran udara dari *bronchospasm*, edema mukosa, dan peningkatan produksi mukus. Emfisema adalah salah satu penyakit obstruksi paru-paru, ketika seseorang dengan riwayat emfisema (jika dilakukan pengukuran volume ekspirasi paksa) saluran udara menyempit atau kolaps. Asma dan bronkitis kronis salah satu dari penyakit obstruksi paru-paru. Penyakit restriktif seperti asbestosis dan silikosis yang disebabkan oleh perubahan jaringan *fibrotic* yang mengurangi kemampuan paru-paru untuk mengembang tetapi tidak dipengaruhi oleh perubahan pada saluran udara respirasi [13]. Penurunan nilai FEV<sub>1</sub> dapat terlihat jelas terjadi selama 10 sampai 20 tahun mengalami pajanan [22,23].

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem pengendalian debu berbasis *dust suppression system* di industri pengolahan bijih mineral telah memberikan dampak positif terhadap penurunan konsentrasi debu respirabel di lingkungan kerja. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar debu respirabel berada di bawah nilai ambang batas (NAB) yang ditetapkan oleh ACGIH, yaitu 3 mg/m<sup>3</sup>, dengan nilai rata-rata sebesar 0,4760 mg/m<sup>3</sup> dan nilai *risk quotient* (RQ) < 1, yang mengindikasikan bahwa risiko kesehatan terhadap paparan debu respirabel berada dalam kategori aman. Hasil simulasi model *Multiple Path Particle Dosimetry* (MPPD) pada menunjukkan bahwa partikel debu respirabel berukuran sekitar 4 µm memiliki potensi deposisi tertinggi di saluran pernapasan bagian bawah (*thoracic*), yang dapat memicu respon inflamasi dan pembentukan jaringan parut pada paru-paru.

Meskipun risiko saat ini tergolong rendah, pengendalian debu harus tetap dipertahankan dan ditingkatkan secara berkelanjutan untuk mencegah akumulasi paparan jangka panjang yang dapat menimbulkan penyakit akibat kerja seperti silikosis dan penyakit paru obstruksi kronis (PPOK). Perusahaan disarankan untuk terus mengoptimalkan sistem pengendalian teknik lain, seperti *venturi scrubber* dan *baghouse filter*, khususnya di area penghancuran bijih yang memiliki potensi emisi debu tertinggi yang tidak boleh menggunakan air. Selain itu, perlu dilakukan pemantauan berkala terhadap konsentrasi debu respirabel dan silika kristalin di lingkungan kerja, guna mendeteksi dini potensi peningkatan paparan.

Pemeriksaan kesehatan pekerja secara rutin, seperti tes fungsi paru melalui spirometri, juga penting untuk mendeteksi gangguan pernapasan sejak dini. Penggunaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, terutama respirator, harus diwajibkan dan disertai dengan pelatihan serta evaluasi efektivitas penggunaannya. Perusahaan juga perlu melakukan evaluasi dan revisi prosedur kerja secara berkala, serta menerapkan prinsip

ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) dalam pengelolaan paparan debu, untuk meminimalkan risiko jangka panjang terhadap kesehatan pekerja. Dengan langkah-langkah tersebut, diharapkan tercipta lingkungan kerja yang lebih aman dan sehat bagi seluruh pekerja di industri pengolahan bijih mineral.

### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Departemen Corporate Communication PTFI yang telah memberikan izin dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Juga kepada Peminatan Keselamatan Kesehatan Kerja dan Kesehatan Lingkungan (KKL), Program Studi Magister Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu dan Teknik Kesehatan (FITKes) Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi yang telah membantu mengkaji dan memberikan *ethical clearance* pada penelitian ini. Beserta kepada Peminatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Program Studi Magister Kesehatan Masyarakat, Program Pascasarjana Universitas Hang Tuah Pekanbaru yang telah memberikan dana publikasi hasil penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Schlünssen V, Mandrioli D, Pega F, Momen NC, Adam B, Chen W, Cohen RA, Godderis L, Göen T, Hadkhale K, Kunpuek W, Lou J, Mandic-Rajcevic S, Masci F, Nemery B, Popa M, Rajatanavin N, Sgargi D, Siriruttanapruk S, Sun X, Suphanchaimat R, Thammawijaya P, Ujita Y, van der Mierden S, Vangelova K, Ye M, Zungu M, Scheepers PTJ. The Prevalences and Levels of Occupational Exposure to Dusts and/or Fibres (Silica, Asbestos and Coal): A Systematic Review and Meta-analysis. *Environment International*. 2023;178,107980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107980>
- [2] Lestari M, Fujianti P, Novrikasari N, Nandini RF. Dust Exposure and Lung Function Disorders. *Respiratory Science*. 2023;3(3):218-230. <https://doi.org/10.36497/respirsci.v3i3.80>
- [3] American Conference of Governmental Industrial Hygiene (ACGIH). *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. 2025.
- [4] Saurabh K, Chauhya SK, Singh RS, Kumar S, Mishra KK. Intelligent dry fog dust suppression system: an efficient technique for controlling air pollution in the mineral processing plant. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022;24:1037-1051. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01991-z>
- [5] Xie Z, Huang C, Zhao Z, Xiao Y, Zhao Q, Lin J. Research Review and Prospect the Development of Dust Suppression Technology and Influencing Factors for Blasting Construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022;125,104532. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104532>
- [6] Susanto A, Putro EK, Kusnadi SNF, Santoso DRM, Manuel AA. Risk assessment of respirable dust exposure to workers in the mineral ore processing industry. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*. 2024;13(1):109-115. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v13i1.2024.109-115>
- [7] Susanto A, Yudhiantara MR, Kara P, Putro EK, Manuel AA, Hidayah N. Multiple Path Particulate Dosimetry Model Total Dust Among Mineral Ore Processing Workers. *Jurnal Media Kesehatan Masyarakat Indonesia*. 2025;21(1):56-65. <https://doi.org/10.30597/mkmi.v21i1.42224>
- [8] Leidel NA, Busch KA, Lynch J. *Occupational exposure sampling strategy manual*. 1977. <https://www.cdc.gov/niosh/docket/archive/pdfs/NIOSH-091/0091-010177-document.pdf>
- [9] US Environmental Protection Agency (USEPA). *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human health evaluation manual*. Washington: D.C. 1989.
- [10] Mihelcic JR, Zimmerman JB. *Chapter 6: Environmental Risk (2nd ed.)*. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*. Wiley: United States. 2012.

- [11] Soemirat J. *Analisis risiko kesehatan lingkungan*. UGM Press: Yogyakarta. 2013.
- [12] Putro EK, Kusnadi SNF, Susanto A, Zannah M, Mahlisa R, Manuel AA. Penilaian risiko pajanan debu silika terhadap pekerja di industri pengolahan bijih mineral. *Jurnal Kesehatan Vokasional*. 2024;9(1):76-87. <https://doi.org/10.22146/jkesvo.87667>
- [13] Brown JS, Gordon T, Price O, Asgharian B. Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment, *Particle and Fibre Toxicology*. 2013;10(12). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-12>
- [14] Wippich C, Koppisch D, Pitzke K, Breuer D. Estimating nickel exposure in respirable dust from nickel in inhalable dust. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2021;238:113838. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113838>
- [15] Asgharian B, Price O, Oberdörster GA. Modeling Study of the Effect of Gravity on Airflow Distribution and Particle Deposition in the Lung. *Inhalation Toxicology*. 2006;18(7):473-481. <https://doi.org/10.1080/08958370600602009>
- [16] Asgharian B, Price O, Hofmann W. Prediction of particle deposition in the human lung using realistic models of lung ventilation. *Journal of Aerosol Science*. 2006;37(10):1209-1221.
- [17] Miller FJ, Asgharian B, Schroeter JD, Price O. Improvements and additions to the Multiple Path Particle Dosimetry Model. *Journal of Aerosol Science*. 2016;99:14-26.
- [18] Peixoto MS, de Oliveira Galvão MF, de Medeiros SRB. Cell death pathways of particulate matter toxicity. *Chemosphere*. 2017;188:32-48. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.076>
- [19] Vanka, K. S., Shukla, S., Gomez, H. M., James, C., Palanisami, T., Williams, K., et al. (2022). Understanding the pathogenesis of occupational coal and silica dust-associated lung disease. *European Respiratory Review*, 31(165): 210250. <https://doi.org/10.1183/16000617.0250-2021>
- [20] Liu, G., Cooley, M. A., Jarnicki, A. G., Borghuis, T., Nair, P. M., Tjin, G, et al. (2019). Fibulin-1c regulates transforming growth factor- $\beta$  activation in pulmonary tissue fibrosis. *JCI Insight*, 4(16). <https://insight.jci.org/articles/view/124529>
- [21] Perret, J. L., Plush, B., Lachapelle, P., Hinks, T. S. C., Walter, C., Clarke, P., Irving, L., Brady, P., Dharmage, S. C., Stewart, A. (2017): Coal mine dust lung disease in the modern era. *Respirology*, 22(4): 662-670. <https://doi.org/10.1111/resp.13034>
- [22] Barton C. Fibrogenic Dusts, 935–948 dalam Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology, John Wiley & Sons, Ltd. 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118834015.ch92>
- [23] Adishes A, Waters-Banker C. Causes, diagnosis, and progression of COPD following workplace exposure to vapours, gases, dust and fumes, *Methods*, 2, Q6. 2021.