

Penilaian Risiko Paparan Debu Silika terhadap Pekerja di Industri Pengolahan Bijih Mineral

Risk Assessment of Silica Dust Exposure to Workers in the Mineral Ore Processing Industry

Edi Karyono Putro^{1,2}, Saskia Nur Fadhilah Kusnadi^{1,3}✉, Arif Susanto^{1,4,5}, Miftahul Zannah¹, Rizky Mahalisa¹, dan Anthony Andorful Manuel⁶

¹Department HSE Divisi Concentrating PT Freeport Indonesia, Indonesia

²Program Doktor Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

³Program Studi Teknologi Lingkungan Institut Teknologi Bandung, Indonesia

⁴Program Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Diponegoro, Indonesia

⁵Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

⁶Department Technical Service Divisi Concentrating PT Freeport Indonesia, Indonesia

ABSTRAK

Latar Belakang: Proses industri bijih mineral menghasilkan debu silika yang berbahaya bagi kesehatan pekerja. Komposisinya bersifat karsinogenik dan dapat melebihi Nilai Ambang Batas (NAB).

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko paparan debu silika terhadap tiga jenis sistem rotasi kerja di industri pengolahan bijih mineral.

Metode: Metode yang digunakan adalah metodologi kuantitatif Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dengan menghitung nilai *Excess Cancer Risk* (ECR) sesuai dengan kondisi jalur paparan, agen risiko, serta sistem rotasi kerja. Analisis dilakukan pada paparan debu silika tahun 2020 dan 2021. Pengambilan sampel debu silika dilakukan dengan pengukuran yang ditetapkan oleh OSHA-ID142.

Hasil: Konsentrasi debu silika pada proses industri bijih mineral melebihi NAB. Pada tahun 2020, paparan debu silika berkisar antara 0.41-2.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tetapi menurun pada 2021 menjadi 0.05-1.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Baik pada tahun 2020 maupun 2021, perhitungan ECR berada dalam rentang aman yang ditetapkan oleh *United States of Environmental Protection Agency* (US EPA). Hasil perhitungan ECR di bawah 10^{-4} untuk ketiga sistem rotasi kerja di semua lokasi pengukuran.

Kesimpulan: Konsentrasi debu silika di atas NAB tetapi evaluasi ARKL menunjukkan adanya risiko karsinogenik terhadap tiga jenis rotasi kerja yang berada di bawah batas aman, sehingga hal ini tidak membahayakan pekerja. Industri bijih mineral perlu terus meningkatkan pengendalian debu untuk mengurangi konsentrasi debu silika di bawah NAB.

Kata Kunci: bijih; debu; karsinogenik; mineral; silika

ABSTRACT

Background: The mineral ore processing industry produces silica dust that is hazardous to workers' health. The composition of dust, such as silica, can exceed the PEL and is carcinogenic in nature.

Objective: This study aimed to analyze the risk of silica dust exposure on three types of shift rotation systems in the mineral ore processing industry.

Methods: Environmental Health Risk Analysis (EHRA) was used by calculating the Excess Cancer Risk (ECR) value based on exposure pathway, risk agents, and work rotation systems. The analysis was conducted on silica dust exposure in 2020 and 2021. The dust silica sampling method the measurements stipulated by OSHA-ID142.

Results: The concentration of silica dust exceeded the permissible exposure limit (PEL). In 2020, silica dust exposure ranged from 0.41 to 2.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, but decreased in 2021 to 0.05-1.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In both 2020 and 2021, the Excess Cancer Risk (ECR) calculations fell within the safe range established by USEPA, which was below 10^{-4} for all three work rotation systems at all measurement locations.

Conclusion: The concentration of silica dust is above the PEL, but EHRA evaluation indicates that the carcinogenic risk for three types of work rotations is below the safe limit, thus not endangering the workers. The mineral ore processing industry needs to continue improving dust control to reduce silica dust concentration below the PEL.

Keywords: carcinogenic; dust; mineral; ore; silica

✉ Corresponding author: saskia.kusnadi@gmail.com

Diajukan 04 Agustus 2023 **Diperbaiki** 25 Oktober 2023 **Diterima** 06 Desember 2023

PENDAHULUAN

Pengolahan bijih mineral menjadi industri penting untuk mengekstraksi mineral yang bernilai, tetapi dalam pengolahannya terdapat permasalahan lingkungan yang dapat menyebabkan risiko kesehatan. Pengembangan dan penjaagaan kesehatan para pekerja menjadi tugas penting bagi perusahaan. Kepentingan ini dapat dilaksanakan dengan menilai permasalahan kesehatan yang timbul dari proses pengolahan bijih mineral (Shaykhlislamova *et al.*, 2022). Salah satunya adalah permasalahan kualitas udara yang dihasilkan dari beragam sumber emisi dalam industri tersebut (Baluchova *et al.*, 2019).

Proses bisnis pengolahan bijih mineral melakukan tahapan seperti penghancuran, penggilingan dan penanganan bijih yang berpotensi menghasilkan debu atau polutan gas lainnya (Worlanyo & Jiangfeng, 2021). Hadirnya polutan dalam lingkungan kerja akan berdampak pada pencemaran lingkungan dan membentuk risiko tinggi bagi kesehatan manusia. Polutan dapat menyebabkan berbagai penyakit (Triyadi *et al.*, 2016). Polusi udara hadir dengan bentuk debu di industri pengolahan bijih mineral. Debu berasal dari proses penghacuran ataupun penggilingan bijih mineral di lokasi kerja.

Debu di pabrik pengolahan bijih mineral pada tahun 2021 terukur sebesar 6,1 mg/m³ di salah satu lokasi pengukuran. Walaupun berada di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) yang ditetapkan, yaitu sebesar 10 mg/m³ oleh Peraturan Menteri Ketenagakerjaan RI No.5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Lingkungan Kerja. Komposisi debu tersebut dapat menimbulkan masalah kesehatan lainnya. Komposisi debu seperti silika dan asbestos dapat meningkatkan risiko Penyakit Akibat Kerja (PAK) (Schlünssen *et al.*, 2023). Riset sebelumnya mengungkapkan bahwa salah satu jenis

polutan, silika dapat berada dalam debu dengan komposisi sebesar 4,5-5,7% untuk debu yang dihasilkan dari tambang emas (Paluchamy *et al.*, 2021). Besaran komposisi tersebut mengindikasikan bahwa terdapat potensi konsentrasi silika sekitar 0,31 mg/m³ dengan rerata komposisi 5,1% di lingkungan kerja pabrik pengolahan bijih mineral. Hal ini menjadi suatu perhatian bagi keselamatan pekerja mengingat NAB bagi silika adalah 0,05 mg/m³.

Bagian dari polutan yang timbul dari industri pengolahan bijih mineral, debu silika menjadi sebuah ancaman bagi kesehatan pekerja (Margan *et al.*, 2022). Berbagai bentuk kristal silika adalah α -kuarsa, β -kuarsa, α -tridimit, β -tridimit, α -kristobalit, β -kristobalit, keatit, coesit, stishovit, dan moganit (Putri *et al.*, 2021). Dalam bentuk kristalin, silika umumnya terdiri dari komponen tanah, pasir, batu, granit, atau material alami lainnya. Debu silika yang dihasilkan dari proses pengolahan memiliki ukuran partikel yang beragam, kurang dari 1 mikrometer hingga partikel yang lebih kasar dan terlihat oleh mata (Thomas & Kelley, 2010).

Bahaya silika akan muncul pada saat para pekerja menghirup partikel silika halus (Putri *et al.*, 2021). Debu silika yang dihirup oleh para pekerja dapat meningkatkan risiko kesehatan kronis ataupun akut (Barnes *et al.*, 2019). Risiko kesehatan meningkat ketika partikel silika berukuran sangat kecil terendap di udara, sehingga membuat partikel tersebut sulit terlihat dan dideteksi oleh mata manusia. Menghirup kristalin silika dengan jangka waktu yang panjang dapat menyebabkan penyakit yang dikarakterisasi dengan kerusakan paru yang berpotensi fatal (Vanka *et al.*, 2022).

International Agency for Research on Cancer (IARC) telah mengelompokkan silika kristalin sebagai penyebab kanker dalam Kelompok 1 karsinogen (Kim *et al.*, 2018). Selain itu, paparan silika juga ditemukan berasosiasi dengan

peningkatan risiko silikosis, kanker paru, tuberkulosis dan penyakit pernapasan lainnya (Wijaya *et al.*, 2019). Salah satu studi menemukan bahwa paparan silika terhadap pekerja diperkirakan telah menghasilkan 7-94 kematian per 1000 individual (Moghadam *et al.*, 2020).

Beberapa faktor yang menentukan bahaya paparan silika terhadap kesehatan pekerja adalah waktu paparan (Sunaryo & Rhomadhoni, 2021). Pada penelitian ini, analisis paparan debu silika kepada pekerja di industri pengolahan bijih mineral dilakukan. Terdapat tiga jenis sistem rotasi kerja yang berbeda yang mencakup staf reguler, staf *roaster*, serta staf *shift* dengan durasi kerja yang berbeda. Sistem rotasi kerja merupakan aspek penting yang mempengaruhi tingkat paparan pekerja terhadap debu silika, dikarenakan mempengaruhi lamanya waktu paparan debu.

Bahaya paparan silika terhadap kesehatan para pekerja penting untuk diteliti karena dampaknya terhadap kesehatan dan kesejahteraan pekerja. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menilai risiko tersebut adalah Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Melalui metode ini, pengukuran risiko kesehatan dapat terlaksana dengan tujuan menilai risiko kesehatan yang timbul dari agen kimia tertentu (Basri *et al.*, 2014). Selain itu, dengan adanya faktor waktu paparan debu silika pada metode ARKL, penelitian ini dapat menggambarkan perbedaan risiko kesehatan dari tiga sistem rotasi kerja.

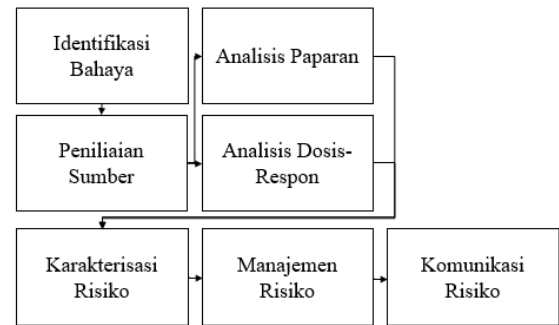
Penelitian ini yaitu menganalisis risiko paparan debu silika terhadap tiga jenis sistem rotasi kerja di industri pengolahan bijih mineral. Pengaplikasian metode ini akan membantu mengidentifikasi risiko, mengurangi risiko, serta meningkatkan kualitas hidup para pekerja industri pengolahan bijih mineral (Menkes RI, 2014). Penelitian ini bertujuan untuk menilai risiko paparan debu silika

kepada kesehatan para pekerja di lingkungan kerja industri pengolahan bijih mineral.

METODE

A. Desain Penelitian

Pelaksanaan penelitian berlangsung di area pengolahan bijih mineral di Papua, Indonesia. Studi kuantitatif dilakukan dengan menggunakan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Metode ARKL diterapkan karena penilaian risiko dapat menentukan pola paparan terhadap polutan lingkungan dan menyesuaikan standar dengan jalur paparan, agen risiko, serta lama paparan atau rotasi kerja (Kermani *et al.*, 2021).



Gambar 1. Langkah-langkah ARKL
(Sumber: Menkes RI, 2014)

Proses analisis diawali dengan penilaian risiko bahaya yang teridentifikasi, kemudian penilaian paparan dan berakhir dengan karakterisasi risiko menggunakan perhitungan nilai *Excess Cancer Risk* (ECR) (Basri *et al.*, 2014). Jika perhitungan nilai ECR berada di rentang aman maka manajemen risiko dilakukan, yaitu perhitungan kembali nilai ECR dengan rekayasa faktor ECR tersebut sehingga nilai ECR dapat berada pada rentang aman. Kemudian ARKL diakhiri dengan komunikasi risiko jika ECR tersebut berada di luar batas aman (Rahman, 2017). Penelitian ini menggunakan data sekunder dari pengukuran kualitas udara di beberapa lokasi pada tahun 2020 dan 2021.

B. Populasi dan Sampel

Populasi penelitian ini merupakan konsentrasi debu silika di area pengolahan bijih mineral yang berlokasi di Papua, Indonesia. Untuk mendapatkan data yang representatif, sampel diambil dari beberapa lokasi yang mencakup variasi kondisi di lapangan. Pengumpulan sampel dilakukan selama tahun 2020 dan 2021.

Proses pemilihan lokasi pengukuran konsentrasi debu dilakukan dengan pemilihan lokasi di area pengolahan bijih mineral yang mewakili zona kerja dengan potensi bahaya debu. Penentuan titik *sampling* memperhatikan potensi paparan debu silika seperti sumber debu dan lokasi yang dilalui oleh pekerja. Memperhatikan variasi lokasi dan periode waktu, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan gambaran yang komprehensif tentang risiko konsentrasi debu silika di pabrik bijih mineral.

C. Teknik Pengambilan Data

Data primer dikumpulkan dengan pengukuran konsentrasi debu silika yaitu dengan menggunakan pompa *sampling* dengan lajur alir 2,0 L/menit, tubing, dan *filter cassette* PVC berukuran 5 μ . Kalibrasi pompa dilakukan dan dilanjutkan dengan pemilahan area yang akan diobservasi. Pengukuran dilakukan dengan memilih titik *sampling* yang mewakili kondisi area kerja. Setelah seluruh alat *sampling* dipasang di titik *sampling* yang sudah ditentukan, alat tersebut diletakkan 1,5 meter di atas dasar lantai untuk mempertimbangkan zona pernapasan. Selama proses pengukuran, beberapa data juga dicatat, seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan angin di sekitar area *sampling* (OSHA, 2016a).

D. Instrumen Penelitian

Pengambilan data dilakukan dengan pengukuran konsentrasi debu silika serta perhitungan nilai ECR melalui metode ARKL. Pengukuran konsentrasi debu silika dilakukan berdasarkan pada standar OSHA ID-142. Data lainnya yang

dikumpulkan, seperti informasi jenis pekerja, hari kerja, dan jam kerja dilakukan melalui pengambilan data sekunder. Setelah nilai yang dibutuhkan terkumpul, analisis data dilakukan menggunakan ARKL sehingga menghasilkan nilai ECR.

E. Teknik Analisis Data

Proses analisis dimulai dengan identifikasi bahaya yang bertujuan untuk menilai konsentrasi paparan debu silika, kemudian dibandingkan dengan baku mutu. Selanjutnya, nilai *Inhalation Unit Risk* (IUR) dari *Integrated Risk Information System* (IRIS) oleh *United States of Environmental Protection Agency* (USEPAUS EPA) ataupun hasil dari penelitian lain yang kemudian diinvestigasi dengan analisis dosis respon. Rumus yang digunakan untuk analisis memperhitungkan paparan agen risiko melalui jalur inhalasi, sebagai berikut (Maleki *et al.*, 2022).

$$EC = \frac{C \times ET \times ED \times EF}{AT \times 365 \times 24} \quad (1)$$

Exposure Concentration (EC) menunjukkan konsentrasi paparan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ atau f/m^3). C adalah konsentrasi dari debu silika ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ atau f/cm^3), ET merepresentasi *exposure time* (jam/hari) atau waktu paparan dengan durasi kerja per hari bagi ketiga sistem rotasi kerja, ED adalah *exposure duration* atau durasi paparan (tahun) dengan asumsi 25 tahun kerja, EF adalah *exposure frequency* atau frekuensi paparan (hari/tahun) dengan data durasi kerja dari tiga sistem rotasi kerja, dan AT adalah *averaging time* atau rerata waktu (tahun). AT untuk bahan karsinogenik adalah 70 tahun dikalikan dengan 365 hari/tahun dan 24 jam/hari (Nahin *et al.*, 2022). Setelah itu, analisis risiko terkait dengan jalur paparan secara inhalasi dapat dikalkulasi menggunakan rumus sebagai berikut.

$$ECR = EC \times IUR \quad (2)$$

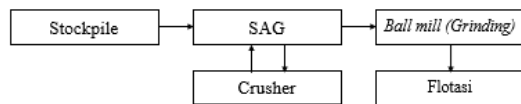
Nilai ECR adalah risiko karsinogenik untuk jalur inhalasi. IUR merujuk kepada risiko unit inhalasi ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ atau $(\text{f}/\text{cm}^3)^{-1}$). Estimasi yang didapatkan dari ECR

dibandingkan dengan kriteria yang ada (Basri *et al.*, 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi Bahaya Debu Silika

Identifikasi potensi dampak dari paparan debu silika dan perbandingan konsentrasi debu silika di lingkungan kerja dilakukan untuk mengidentifikasi bahaya dari paparan silika kepada pekerja. Pada area tersebut, pengolahan mineral mencakup proses, seperti *crushing*, *grinding*, dan flotasi, yang memengaruhi udara ambien di sekitarnya, seperti tertera pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses pengolahan yang berada di pabrik pengolahan bijih mineral

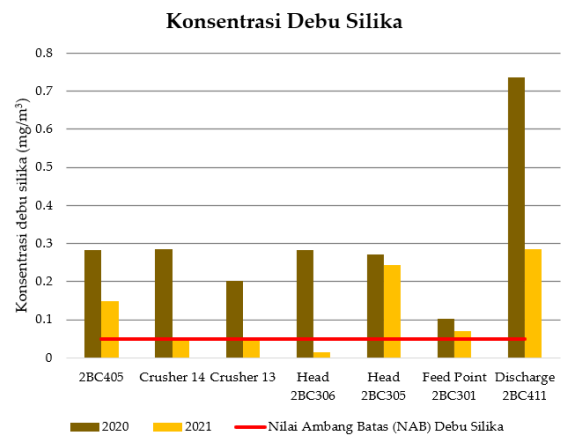
Proses yang dapat mempengaruhi konsentrasi debu silika secara signifikan pada udara ambien, yaitu proses *crushing*. *Crushing* merupakan proses penghancuran bebatuan yang diterima dari *stockpile*. Pada proses penghancuran tersebut, bijih mineral akan dihancurkan dan dijepit di antara dua besi, sehingga ukuran dari bijih mineral akan berkurang sesuai ukuran yang diinginkan. Pada proses ini, dibutuhkan pengolahan kering sehingga akan menghasilkan debu di lokasi sekitar mesin *crusher*.

Berbeda halnya dengan proses penghancuran menggunakan *crusher*, penggunaan *Semi Autogenous Mill (SAG)* menggunakan air dalam prosesnya. Proses SAG di dalamnya terbentuk bubur konsentrat atau *slurry*. Proses ini menghasilkan debu dengan intensitas jauh lebih rendah daripada *crusher*.

Setelah melalui proses penghancuran dengan *crusher* ataupun SAG, hasil penghancuran tersebut kemudian dibawa ke proses penggilingan atau *grinding* menggunakan *Ball Mill*. Proses ini serupa dengan pengolahan menggunakan SAG, di

mana adanya air dalam proses penggilingan batu yang sebelumnya sudah dihancurkan melalui *crusher* ataupun SAG. Proses ini juga berpotensi mengeluarkan emisi debu yang lebih sedikit dibandingkan dengan pengolahan menggunakan *crusher*.

Setelah digiling, bijih mineral tersebut masuk ke dalam tahap flotasi. Proses flotasi merupakan pencampuran reagen kimia ke dalam hasil penggilingan bijih mineral untuk menghasilkan konsentrat tembaga-emas. Potensi debu silika yang tinggi di area *crusher* mendukung pengukuran konsentrasi debu silika di sekitar lokasi tersebut.



Gambar 3. Konsentrasi debu silika di industri pengolahan bijih mineral tahun 2020-2021

Hasil pengukuran debu silika pada proses *crushing* dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan gambar tersebut, konsentrasi debu silika di industri pengolahan bijih mineral, konsentrasi debu silika tertinggi terlihat pada tahun 2020 di lokasi *Discharge 2BC411* dengan konsentrasi sebesar 0.73 mg/m^3 , namun mengalami penurunan pada tahun 2021 menjadi $0,28 \text{ mg/m}^3$. Nilai terendah diukur pada tahun 2021, yaitu di lokasi *Head 2BC306*, dengan konsentrasi debu silika sebesar $0,014 \text{ mg/m}^3$.

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 70 Tahun 2016 tentang *Standar dan Persyaratan Kesehatan Lingkungan Kerja Industri*, nilai konsentrasi

debu silika berada di bawah NAB hanya terdapat pada tiga lokasi di tahun 2022. Lokasi tersebut, yaitu *Crusher 13*, *Crusher 14*, dan *Head 2BC306*, dengan nilai konsentrasi debu silika di bawah 0,05 mg/m³.

Polutan yang dihasilkan, seperti debu silika dapat membahayakan pekerja, sehingga menyebabkan Penyakit Akibat Kerja (PAK) saat terpapar dalam waktu yang berkepanjangan (Raanan *et al.*, 2022). Debu silika yang terhirup dapat terjebak dalam jaringan paru-paru sehingga mengakibatkan peradangan, penurunan fungsi paru, hingga menyebabkan silikosis (Căluțu *et al.*, 2022). Saat silikosis timbul, komplikasi lain dapat terbentuk, seperti fibrosis masif progresif (PMF), yang merupakan jenis penyakit paru akibat kerja (Sharma *et al.*, 2020). Selain itu, paparan terhadap debu silika berhubungan dengan peningkatan angka kanker paru-paru. Hal ini dikemukakan dari sebuah studi yang menemukan nilai *relative risk* (RR) sebesar 1,3-1,5 untuk kejadian kanker-paru-paru dengan paparan terhadap silika kuarsa dan kristobalit yang dapat terhirup (NIOSH, 2021).

B. Analisis Dosis Respon

Analisis dosis respon dilakukan dengan merujuk kepada tipe nilai toksisitas yang didapatkan dari IRIS US EPA. Nilai yang tersedia dapat berbentuk nilai konsentrasi referensi (RfC) dan dosis referensi (RfD) untuk efek non-karsinogenik, maupun *cancer slope factor* (CSF), *cancer unit risk* (CUR), atau *inhalation unit risk* (IUR) untuk efek karsinogenik, yang terdapat pada agen risiko yang akan diteliti (Menkes RI, 2014). Dengan adanya analisis dosis respon ini, jalur paparan dari agen risiko, konsentrasi, atau dosis agen risiko dari nilai toksisitas dapat diketahui. Silika memiliki sifat karsinogenik sehingga menggunakan nilai CSF, CUR, atau IUR dalam menentukan konsentrasi referensinya.

Dosis respon terdapat pada studi meta-analisis yang mengungkapkan dosis respon untuk debu silika sebesar 1,8-6 mg/m³/tahun. Hal tersebut mengindikasikan bahwa dalam dosis respon untuk silika, pekerja akan menerima bahaya terhadap paparannya, sehingga meningkatkan risiko kanker paru-paru (Sogl *et al.*, 2012). Kemudian dilansir pula oleh Nahin *et al.* (2022) bahwa toksisitas silika juga dapat dikemukakan dengan IUR sebesar 3,8×10⁻⁴ per μg/m³. Berdasarkan Tabel 1, dosis respon agen kimia berisiko menunjukkan bahwa dosis respon silika berada pada rentang 1,8-6 mg/m³/tahun. Dengan adanya dosis tersebut, peningkatan risiko paru-paru akan terjadi.

Tabel 1. Dosis Respon Agen Kimia Berisiko

No	Agen Kimia	Dosis Respons	Efek Kritis dan Referensi
1	Silika	1,8-6 mg/m ³ /tahun	Studi meta-analisis mengungkapkan bahwa peningkatan risiko kanker paru-paru dengan paparan silika 1.8 mg/m ³ /tahun hingga 6 mg/m ³ /tahun.

C. Analisis Paparan

Hasil analisis paparan terbagi menjadi tiga, yang menjelaskan tentang paparan yang terjadi pada tiga jenis pekerja yang berbeda. Perbedaan jenis sistem rotasi kerja bergantung pada hari kerja serta jam kerja yang dimiliki oleh tiap jenis pekerja tersebut, seperti pada Tabel 2. Jenis tersebut dibagi menjadi tiga, yaitu staf reguler, staf *roaster*, serta staf *shift*. Staf reguler memiliki jadwal kerja dengan 277 hari kerja dalam setahun dan bekerja selama 9 jam setiap harinya. Staf reguler adalah kelompok pekerja yang hadir sepanjang tahun dengan jam kerja yang

relatif konstan. Staf *roaster* bekerja dalam sistem rotasi yang melibatkan 233 hari kerja dalam setahun, dengan jam kerja yang sama yaitu 9 jam per hari, mengikuti pola kerja berputar yang memungkinkan mereka untuk bekerja secara bergantian setiap enam ataupun delapan minggu. Staf *shift* bekerja selama 198 hari kerja dalam setahun, dengan jam kerja lebih panjang yaitu 11 jam setiap harinya.

Melalui pola bekerja tersebut, staf *shift* memiliki hari istirahat lebih panjang

daripada jenis staf lainnya, sehingga berpotensi memiliki risiko lebih rendah pula.

Tabel 2. Jenis sistem rotasi kerja di industri pengolahan bijih mineral

No	Jenis Pekerja	Hari kerja	Jam kerja
1	Staf reguler	277 hari	9 jam
2	Staf <i>roaster</i>	233 hari	9 jam
3	Staf <i>Shift</i>	198 hari	11 jam

Tabel 3. Hasil perhitungan paparan debu silika (EC) pada tahun 2020 untuk tiga sistem rotasi kerja di berbagai lokasi

No	Tahun	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 2020		
	Jenis Pekerja	EC Staf reguler	EC Staf <i>roaster</i>	EC Staf <i>Shift</i>
1	2BC405	3.27E-03	2.75E-03	2.75E-03
2	<i>Crusher</i> 14	3.31E-03	2.78E-03	2.78E-03
3	<i>Crusher</i> 13	2.33E-03	1.96E-03	1.96E-03
4	<i>Head</i> 2BC306	3.30E-03	2.77E-03	2.77E-03
5	<i>Head</i> 2BC305	3.16E-03	2.65E-03	2.65E-03
6	<i>Feed Point</i> 2BC301	1.18E-03	9.95E-04	9.95E-04
7	<i>Discharge</i> 2BC411	8.53E-03	7.18E-03	7.18E-03

Tabel 4. Hasil perhitungan paparan debu silika (EC) pada tahun 2021 untuk tiga sistem rotasi kerja di berbagai lokasi

No	Tahun	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 2021		
	Jenis Pekerja	Staf reguler	Staf <i>roaster</i>	Staf <i>Shift</i>
1	2BC405	1.74E-03	1.46E-03	1.46E-03
2	<i>Crusher</i> 14	5.09E-04	4.28E-04	4.28E-04
3	<i>Crusher</i> 13	5.70E-04	4.79E-04	4.79E-04
4	<i>Head</i> 2BC306	1.68E-04	1.42E-04	1.42E-04
5	<i>Head</i> 2BC305	2.84E-03	2.39E-03	2.39E-03
6	<i>Feed Point</i> 2BC301	8.25E-04	6.94E-04	6.94E-04
7	<i>Discharge</i> 2BC411	3.31E-03	2.78E-03	2.78E-03

Hasil analisis paparan debu silika melalui jalur inhalasi berdasarkan rumus (1) pada tahun 2020 dan 2021 dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Dari tabel tersebut, hasil paparan silika tertinggi terdapat pada pekerja staf reguler dengan hari kerja 277 hari dan jam kerja 9 jam, terutama di lokasi *Discharge* 2BC411. Nilai maksimum ini terjadi pada tahun 2020 dan 2021 di lokasi dan pada pekerja yang sama. Pada tahun

2020, nilai minimum paparan debu silika ditemukan pada staf *roaster* dan *shift* dengan hari kerja 233 dan 298 hari, secara berurutan dengan jam kerja 9 dan 11 jam, yang berlokasi pada *Feed Point* 2BC301. Kemudian, pada tahun 2021, penurunan signifikan paparan debu silika terjadi, khususnya pada staf *roaster* dan *shift* dengan lokasi kerja *Head* 2BC306, dengan nilai EC sebesar 0,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

D. Karakterisasi Risiko

Hasil analisis karakterisasi risiko karsinogenik silika melalui jalur inhalasi dengan menggunakan ECR berdasarkan rumus (2) dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6. Dari hasil tersebut, nilai maksimum ECR pada tahun 2020 dan 2021 terdapat pada *Discharge* 2BC411 dengan ECR 3.24×10^{-6} dan 1.26×10^{-6} . ECR terendah ditemukan pada tahun 2020 di lokasi *Feed Point* 2BC301 dengan nilai 3.78×10^{-7} , sedangkan pada

tahun 2021 di lokasi *Head* 2BC306 dengan nilai 5.38×10^{-8} . Dapat dilihat bahwa dari tahun 2020 ke tahun 2021, nilai ECR mengalami penurunan.

Hasil dari analisis karakterisasi risiko menunjukkan bahwa ECR dari tahun 2020 dan 2021 di berbagai lokasi berada pada batas aman sesuai dengan nilai pedoman dari USEPA dengan rentang (10^{-6} - 10^{-4}) (Nahin *et al.*, 2022).

Tabel 5. Hasil perhitungan karakterisasi risiko (ECR) pada tahun 2020 untuk tiga sistem rotasi kerja di berbagai lokasi

No	Tahun	ECR – 2020		
	Jenis Pekerja	Staf reguler	Staf roaster	Staf Shift
1	2BC405	1.24E-06	1.05E-06	1.05E-06
2	Crusher 14	1.26E-06	1.06E-06	1.06E-06
3	Crusher 13	8.86E-07	7.45E-07	7.45E-07
4	Head 2BC306	1.25E-06	1.05E-06	1.05E-06
5	Head 2BC305	1.20E-06	1.01E-06	1.01E-06
6	Feed Point 2BC301	4.50E-07	3.78E-07	3.78E-07
7	Discharge 2BC411	3.24E-06	2.73E-06	2.73E-06

Tabel 6. Hasil perhitungan karakterisasi risiko (ECR) pada tahun 2021 untuk tiga sistem rotasi kerja di berbagai lokasi

No	Tahun	ECR – 2021		
	Jenis Pekerja	Staf reguler	Staf roaster	Staf Shift
1	2BC405	6.60E-07	5.55E-07	5.55E-07
2	Crusher 14	1.94E-07	1.63E-07	1.63E-07
3	Crusher 13	2.16E-07	1.82E-07	1.82E-07
4	Head 2BC306	6.39E-08	5.38E-08	5.38E-08
5	Head 2BC305	1.08E-06	9.08E-07	9.08E-07
6	Feed Point 2BC301	3.13E-07	2.64E-07	2.64E-07
7	Discharge 2BC411	1.26E-06	1.06E-06	1.06E-06

Pada tahun 2020 dan 2021 seluruh nilai ECR pada tiap lokasi berada di bawah batas aman. Pada tahun 2021, terjadi pengembangan pengendalian debu silika, sehingga menyebabkan penurunan ECR yang signifikan. Penurunan ECR yang signifikan telah terjadi pada lokasi *Crusher* 13, *Crusher* 14, dan *Head* 2BC306 untuk seluruh jenis pekerja. Jika debu silika masih tidak dapat dikendalikan, maka perusahaan harus mengaplikasikan

pengendalian risiko (Ramdani *et al.*, 2022). Pengendalian risiko tersebut berkaitan dengan kegiatan proses kerja agar dapat memberikan lingkungan kerja yang sehat, aman, dan nyaman bagi pekerja (Susilawati *et al.*, 2023).

Beberapa pengendalian risiko yang telah diterapkan di lingkungan kerja mengikuti hierari kontrol risiko adalah eliminasi, substitusi, rekayasa teknologi, pengendalian administratif dan Alat

Pelindung Diri (APD) (OSHA, 2016b). Dalam hal ini, pengendalian dalam bentuk eliminasi dan substitusi tidak dilakukan karena sumber dari debu tersebut tidak dapat dihilangkan ataupun diganti. Pengendalian dengan hierarki tertinggi yang diterapkan adalah rekayasa teknologi.

Pada tahun 2021, pabrik pengolahan bijih mineral mengaplikasikan penggunaan unit pengendalian debu, yaitu *dust suppression system* di lokasi tersebut. Teknik supresi debu menggunakan penyemprotan air dengan ukuran tertentu untuk menurunkan partikel debu dari udara ke dasar permukaan (Ivanov & Strizhenok, 2017). Sebuah studi menjelaskan keunggulan sistem tersebut, dengan menurunkan konsentrasi debu hingga 78-93% (Xie *et al.*, 2022).

Pengendalian secara administratif juga terus dilakukan dengan adanya pelatihan tenaga kerja. Pelatihan keselamatan lingkungan kerja untuk meningkatkan kesadaran akan bahaya debu, perawatan unit *dust suppression system* untuk menurunkan konsentrasi debu, serta adanya *medical check up* rutin untuk memantau kesehatan para pekerja. Penggunaan APD juga diterapkan dengan

mewajibkan penggunaan alat pelindung pernapasan yang sesuai di lokasi kerja tertentu dengan konsentrasi debu silika yang tinggi (Ahmed *et al.*, 2022).

PENUTUP

Masih terdapat nilai konsentrasi paparan debu silika yang berada di atas NAB yang ditetapkan. Meskipun begitu, hasil ARKL mengungkapkan nilai risiko karsinogenik debu silika terhadap pekerja berada di bawah batas aman yang ditentukan oleh USEPA, dengan nilai ECR kurang dari 10^{-4} , sehingga ketiga sistem rotasi kerja di seluruh lokasi memiliki kategori aman atau tidak memiliki risiko. Maka dari itu, pengendalian debu silika sudah cukup untuk mengurangi risiko karsinogenik terhadap pekerja.

Walaupun nilai ECR dikategorikan aman, penurunan debu silika masih harus dilakukan untuk mencapai NAB yang ditetapkan dengan pengembangan penerapan pengendalian risiko. Pengendalian dilakukan dengan rekayasa teknologi dan penting bagi pekerja untuk menggunakan alat pelindung diri (APD), seperti respirator, guna melindungi diri dari bahaya debu silika.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31785223/>.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Choudhury, S.A.R.A., Dip, A.H., Bose, T., Sarkar, A.K., Rahman, M.A. and Ferdous, J. (2022). Respiratory symptoms, spirometric, and radiological status of stone-cutting workers in Bangladesh: A cross-sectional study. *Health Science Reports*. 5(5): 1-8. Available at: <https://doi.org/10.1002/hsr2.753>.
- Baluchova, B., Bačik, P. and Mamova, A. (2019). The Health Impact of Mineral Dust Air Pollution on the Global and Local Scale (on the example from Slovakia). *Neuro Endocrinology Letters*. 40(Suppl1): 24-28. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31785223/>.
- Barnes, H., Goh, N.S.L., Leong, T.L. and Hoy, R. (2019). Silica-associated lung disease: An old-world exposure in modern industries. *Respirology*. 24(12): 1165-1175. Available at: <https://doi.org/10.1111/resp.13695>.
- Basri, S., Bujawati, E., Amansyah, M., Habibi, dan Samisana. (2014). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (Model Pengukuran Risiko Pencemaran Udara terhadap Kesehatan). *Jurnal Kesehatan*. 7(2): 427-442. Available at: <https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/kesehatan/article/view/61>.

- Căluțu, I.-M., Smărăndescu, R.-A. and Rașcu, A. (2022). Biomonitoring Exposure and Early Diagnosis in Silicosis: A Comprehensive Review of the Current Literature. *Biomedicines*. 11(1): 100. Available at: <https://doi.org/10.3390/biomedicines11010100>.
- Ivanov, A.V. and Strizhenok, A.V. (2017). Efficiency of Dust Suppression with Aerosol Guns–Fogging Machines with Air-and-Fluid Jets. *Journal of Mining Science*. 53(1): 176–180. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062739117011994>.
- Kermani, M., Jafari, A. J., Gholami, M., Arfaeinia, H., Shahsavani, A., and Fanaei, F. (2021). Characterization, possible sources and health risk assessment of PM2.5-bound Heavy Metals in the most industrial city of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 19(1): 151–163. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00589-3>.
- Kim, H. R., Kim, B., Jo, B.S., and Lee, J.W. (2018). Silica exposure and work-relatedness evaluation for occupational cancer in Korea. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 30(1): 4. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40557-018-0216-1>.
- Maleki, R., Asadgol, Z., Kermani, M., Jafari, A., Arfaeinia, H., and Gholami, M. (2022). Monitoring BTEX compounds and asbestos fibers in the ambient air of Tehran, Iran: Seasonal variations, spatial distribution, potential sources, and risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 102(16): 4220–4237. Available at: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1781836>.
- Margan, A., Verlak, D., Roj, G., and Fikfak, M. D. (2022). Occupational exposure to silica dust in Slovenia is grossly underestimated. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 73(4): 297–302. Available at: <https://doi.org/10.2478/aiht-2022-73-3668>.
- Menkes RI. (2014). *Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)*. Direktorat Jenderal PP dan PL Kementerian Kesehatan. Available at: <https://perpustakaan.kemkes.go.id/nlislite3/opac/detail-opac?id=8151>. Diakses tanggal 1 Juli 2023.
- Moghadam, S. R., Khanjani, N., Mohamadyan, M., Emkani, M., Yari, S., Tizabi, M. N. L., and Ganjali, A. (2020). Changes in Spirometry Indices and Lung Cancer Mortality Risk Estimation in Concrete Workers Exposed to Crystalline Silica. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 21(9): 2811–2817. Available at: <https://doi.org/10.31557/APJCP.2020.21.9.2811>.
- Nahin, M., Nahian, S., Islam, M. and Salam, A. (2022). Estimation and Health Risk Assessment of Respirable Silica in the Ambient Particulate Matter of Dhaka City. *Dhaka University Journal of Science*. 70(20): 35–41. Available at: <https://doi.org/10.3329/dujs.v70i2.62604>.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2021). *Silica, Crystalline (Respirable Size) Report on Carcinogens* (15th ed.). National Toxicology Program.
- Occupational Safety and Health Administration. (2016a). *ID-142 Crystalline Silica, Quarts, and Cristobalite*. OSHA. Available at: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/osh-id142.pdf>. Diakses tanggal 1 Juli 2023.

- Occupational Safety and Health Administration. (2016b). *Recommended Practices for Safety and Health Programs*. Available at: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3886.pdf>. Diakses tanggal 1 Juli 2023.
- Paluchamy, B., Mishra, D. P. and Panigrahi, D. C. (2021). Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines – Generation, health impacts and control measures for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 296 (February): 1-20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126524>
- Putri, A. N., Marlia, A., Mar'ah, E.C.F., Suswoyo, F.I.H., Hanief, M.A. and Firdaus, V.A. (2021). Review Sistematis: Identifikasi Bahaya Paparan Debu Silika pada Pekerja Tambang. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*. 1(3): 162–169. Available at: <https://doi.org/10.37148/comphijournal.v1i3.30>.
- Raanan, R., Zack, O., Ruben, M., Perluk, I. and Moshe, S. (2022). Occupational Silica Exposure and Dose–Response for Related Disorders—Silicosis, Pulmonary TB, AIDs and Renal Diseases: Results of a 15-Year Israeli Surveillance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(22): 15010. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph192215010>.
- Rahman, A. (2017). *Buku Rancangan Pengajaran Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)*. Fakultas Kesehatan Masyarakat UI.
- Ramdani, M., Sunaryo, M., Ayu, F. dan Ratriwardhani, R. (2022). Risk Assessment pada Pekerjaan Pengembalian Contoh Uji di PT. XYZ. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 8(13): 268-281. Available at: <http://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/1947>.
- Schlünssen, V., Mandrioli, D., Pega, F., Momen, N.C., Ádám, B., Chen, W., ... and Scheepers, P. T. J. (2023). The prevalences and levels of occupational exposure to dusts and/or fibres (silica, asbestos and coal): A systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury. *Environment International*. 178(Agustus): 107980. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107980>
- Sharma, B. B., Mishra, D. K., Singh, T., Nargotra, N., Sharma, R. K., and Gupta, P. (2020). Radiological Manifestation of Progressive Massive Fibrosis as a Complication of Silicosis–Case Report. *Nepalese Journal of Radiology*. 10(1): 34–37. Available at: <https://doi.org/10.3126/njr.v10i1.29514>.
- Shaykhlislamova, E. R., Karimova, L. K., Beigul, N. A., Muldasheva, N. A., Fagamova, A. Z., Shapoval, I. V., ... and Larionova, E.A. (2022). Occupational health risk for workers from basic occupational groups employed at copper and zinc ore mining enterprises: Assessment and management. *Health Risk Analysis*. 2(Juni): 107–118. Available at: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.2.10.eng>.
- Sogl, M., Taeger, D., Pallapies, D., Brüning, T., Dufey, F., Schnelzer, M., ... and Kreuzer, M. (2012). Quantitative relationship between silica exposure and lung cancer mortality in German uranium miners, 1946–2003. *British Journal of Cancer*. 107(7): 1188–1194. Available at: <https://doi.org/10.1038/bjc.2012.374>.

- Sunaryo, M. dan Rhomadhoni, M. (2021). Analisis Kadar Debu Respirabel Terhadap Keluhan Kesehatan Pada Pekerja. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Khatulistiwa*. 8(2): 63–71. Available at: <https://doi.org/10.29406/jkmk.v8i2.2480>.
- Susilawati, S., Budiani, R.L., Paramita, I. dan Puspitasiwi, P. (2023). Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) di Puskesmas Umbulharjo II Kota Yogyakarta. *Jurnal Kesehatan Vokasional*. 8(2): 112. Available at: <https://doi.org/10.22146/jkesvo.72671>
- Thomas, C.R. and Kelley, T.R. (2010). A Brief Review of Silicosis in the United States. *Environmental Health Insights*. 4(May): 21–26. Available at: <https://doi.org/10.4137/EHI.S4628>.
- Triyadi, D., Nurjazuli. dan Dangiran, H. (2016). Analisis Risiko Kesehatan Akibat Paparan Benzene Melalui Inhalasi pada Petugas Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) di Sekitar Kawasan Universitas Diponegoro Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*. 4(4): 907–916. Available at: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm/article/view/14386>.
- Vanka, K. S., Shukla, S., Gomez, H.M., James, C., Palanisami, T., Williams, K., ... and Horvat, J.C. (2022). Understanding the pathogenesis of occupational coal and silica dust-associated lung disease. *European Respiratory Review*. 31(165): 210250. Available at: <https://doi.org/10.1183/16000617.0250-2021>.
- Wijaya, I.P.E.K., Rai, I.B.N., dan Andrika, I.P. (2019). Hubungan antara Paparan Debu Silika dengan Transforming Growth Factor- β 1 Serum pada Pekerja Industri Pengolahan Batu. *Jurnal Penyakit Dalam Indonesia*. 6(2): 64. Available at: <https://doi.org/10.7454/jpdi.v6i2.311>.
- Worlanyo, A.S. and Jiangfeng, L. (2021). Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*. 279(February): 111623. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>.
- Xie, Z., Huang, C., Zhao, Z., Xiao, Y., Zhao, Q., and Lin, J. (2022). Review and prospect the development of dust suppression technology and influencing factors for blasting construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 125(July) 104532. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104532>.