
PAPARAN DEBU DAN RISIKO GANGGUAN FUNGSI PERNAFASAN PADA PEKERJA DI INDUSTRI PENGOLAHAN BIJIH MINERAL: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

DUST EXPOSURE AND RISK IMPAIRED LUNGS FUNCTION IN WORKERS OF MINERAL ORE PROCESSING: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Arif Susanto^{1,4*}, Muhamad Rizky Yudhiantara^{2,4}, Edi Karyono Putro^{3,4}, Prayoga Kara⁴,
Anthony Andorful Manuel⁵, Nurulia Hidayah¹

¹Magister Terapan Keselamatan Kesehatan Kerja, Departemen Layanan dan Informasi Kesehatan, Sekolah
Vokasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

²Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi
Bandung, Bandung, Indonesia.

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

⁴Health Safety Environmental Department, Concentrating Division, PT Freeport Indonesia.

⁵Technical Services Department, Concentrating Division, PT Freeport Indonesia.

Informasi Artikel

Dikirim Aug 15, 2024
Direvisi Sept 16, 2024
Diterima Okt 5, 2024

Abstrak

Pengolahan bijih mineral melibatkan beberapa proses yang menghasilkan debu, seperti penggilingan, penghancuran, dan flotasi. Debu yang dihasilkan, terutama partikel berukuran <math><10\ \mu\text{m}</math>, dapat terhirup dan terdeposit di paru-paru, sehingga berisiko menyebabkan penurunan fungsi pernafasan. Namun, berbagai faktor dapat mempengaruhi tingkat efek paparan debu terhadap kesehatan pekerja. Penelitian ini dilakukan dengan metode tinjauan literatur sistematis, menggunakan kata kunci “*mineral ore processing*”, “*dust exposure*”, dan “*impaired lung function*”. Pada basis data ilmiah seperti Science Direct, Google Scholar, dan ProQuest. Artikel ilmiah yang dipublikasikan antara tahun 2020 hingga 2024 menjadi fokus kajian. Hasil pemetaan literatur berdasarkan PRISMA-ScR menunjukkan sebanyak 15 artikel ilmiah relevan telah dianalisis. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa debu di industri pengolahan bijih mineral menjadi risiko kesehatan pernafasan yang signifikan bagi pekerja. Paparan debu dapat menyebabkan masalah kesehatan dari penurunan fungsi pernafasan hingga Penyakit Paru Obstruksi Kronis (PPOK). Komposisi kimia dan konsentrasi debu respirabel yang bervariasi, serta faktor lingkungan seperti kelembaban dan arah angin, turut mempengaruhi tingkat paparan debu terhadap pekerja. Oleh karena itu, pengendalian debu secara efektif pada sumbernya dan penerapan manajemen risiko yang baik menjadi sangat penting untuk mengurangi paparan debu terhadap pekerja dan mencegah terjadinya penurunan fungsi pernafasan.

Kata Kunci: debu respirabel; paparan debu; penurunan fungsi pernafasan; pengolahan bijih mineral

Corresponding Author

Magister Terapan
Keselamatan Kesehatan
Kerja, Departemen
Layanan dan Informasi

Abstract

Mineral ore processing involves several processes that produce dust, such as grinding, crushing, and flotation. Dust produced, specifically particles measuring <math><10\ \mu\text{m}</math>, can be inhaled and deposited in the lungs, thereby risking decreased respiratory function. Various factors can affect the level

Kesehatan, Sekolah
Vokasi, Universitas
Gajah Mada, Yogyakarta,
Indonesia

arifsusanto@mail.ugm.ac.id
arifssnt1@gmail.com

of dust exposure and its impact on workers' health. This study was conducted using a systematic literature review method using the keyword "mineral ore processing", "dust exposure", and "impaired lung function" in scientific databases such as Science Direct, Google Scholar, and ProQuest and focused on scientific articles published between 2020 and 2024. Consequently, the literature mapping results based on PRISMA-ScR showed that 15 relevant scientific articles were analyzed. This study confirmed that dust in the mineral ore processing industry posed a significant respiratory health risk for workers. Furthermore, dust exposure can lead to health problems ranging from decreased respiratory function to Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD). The chemical composition and concentration of respirable dust, as well as environmental factors such as humidity and wind direction, also affect the level of dust exposure to workers. Therefore, effective dust control at the source and the implementation of good risk management practice are crucial to reducing exposure and preventing decline respiratory function.

Keywords: respirable dust; dust exposure; impaired respiratory functions; mineral ore processing

Pendahuluan

Debu didefinisikan sebagai fraksi massa berukuran 1 sampai 500 mikrometer yang tersuspensi di udara, sebagai *total suspended particulate* (TSP). Sifat aerodinamiknya memungkinkan debu terhirup dan masuk ke dalam saluran pernafasan.(1) Berdasarkan ukurannya, debu dibagi menjadi tiga kelompok yaitu debu total, debu terhirup, dan debu terespirasi. Debu total adalah keseluruhan partikel di udara tanpa memperhatikan ukuran dan kandungannya. Debu terhirup sebagai debu dengan ukuran yang dapat masuk ke dalam hidung dan tertahan di saluran pernafasan bagian atas yang bersilia. Adapun debu terespirasi adalah debu dengan ukuran partikel yang terkecil kurang dari 4 mikrometer yang dapat berpenetrasi ke dalam sistem pernafasan bagian dalam dan terdeposisi pada *alveolus* hingga masuk ke dalam sistem peredaran darah.(2) Industri pengolahan bijih mineral melibatkan serangkaian proses penghancuran, penggilingan, dan *floatation* untuk memisahkan bahan pengotor dari bahan mineral berharga. Tujuannya adalah untuk menghaluskan bijih mineral hasil tambang menjadi partikel yang lebih halus sebesar 200 μm hingga $>50 \mu\text{m}$. Rangkaian proses ini menghasilkan debu yang terdispersi ke udara di lingkungan kerja dan berpotensi menyebabkan paparan debu bagi pekerja.(3–5)

Paparan debu di pertambangan mineral dapat menimbulkan dampak negatif pada kesehatan pernafasan pekerja, terutama dengan meningkatnya prevalensi gangguan pernafasan seperti PPOK, emfisema, dan bronkhitis kronis pada pekerja.(6) Debu yang masuk ke dalam saluran pernafasan dalam akan terdeposisi di dalam *alveolus* dan memicu sistem kekebalan

tubuh. Hal ini mendorong sel makrofag untuk membentuk jaringan parut (*fibrosis*) melalui mekanisme apoptosis, *autophagy*, dan nekrosis pada tingkat sel.(7) Debu yang mengandung logam berat dan logam transisi memicu stres oksidatif dan kematian sel melalui mekanisme *apoptosis* dan *autophagy*.(8) Fibrosis pada paru-paru menyebabkan berkurangnya kapasitas volume udara untuk inspirasi dan ekspirasi, sehingga mengakibatkan gejala sesak nafas dan batuk. Paparan debu berkepanjangan dapat berkembang menjadi PPOK dan/atau *pneumoconiosis*.(9,10) Paparan menahun terhadap debu ini dapat menimbulkan efek toksisitas kronis, seperti tumor dan kanker. Oleh karena itu, penting untuk diingat bahwa dosis aman paparan debu yang mengandung logam hanyalah nol.(11)

Pemantauan konsentrasi debu logam terinhalasi dan penilaian efek melalui surveilans kesehatan pernafasan merupakan upaya penting dalam pengendalian risiko paparan debu di lingkungan kerja pengolahan bijih mineral. Tujuannya adalah untuk mencegah penyakit akibat kerja (PAK).(9) Pengukuran konsentrasi debu dilakukan dengan memperhatikan jenis, jumlah dan berat partikel debu, sesuai dengan Peraturan Kementerian Ketenagakerjaan No. 5 tahun 2018. Nilai ambang batas (NAB) campuran digunakan untuk mempertimbangkan efek yang saling bertambah dari paparan debu silika dan debu logam toksik lainnya. Paparan debu logam dan silika yang diizinkan terhadap pekerja sebesar 5 mg/m^3 dan $0,05 \text{ mg/m}^3$ selama durasi 8 jam kerja per hari. Tujuan penulisan kajian literatur ini adalah untuk meninjau literatur ilmiah secara sistematis yang relevan dengan paparan debu dan penurunan fungsi pernafasan pada pekerja industri pengolahan bijih mineral. Tinjauan literatur ini diharapkan dapat membantu mengidentifikasi faktor risiko yang terkait dengan penurunan fungsi pernafasan pada pekerja yang terpapar debu.

Metode Penelitian

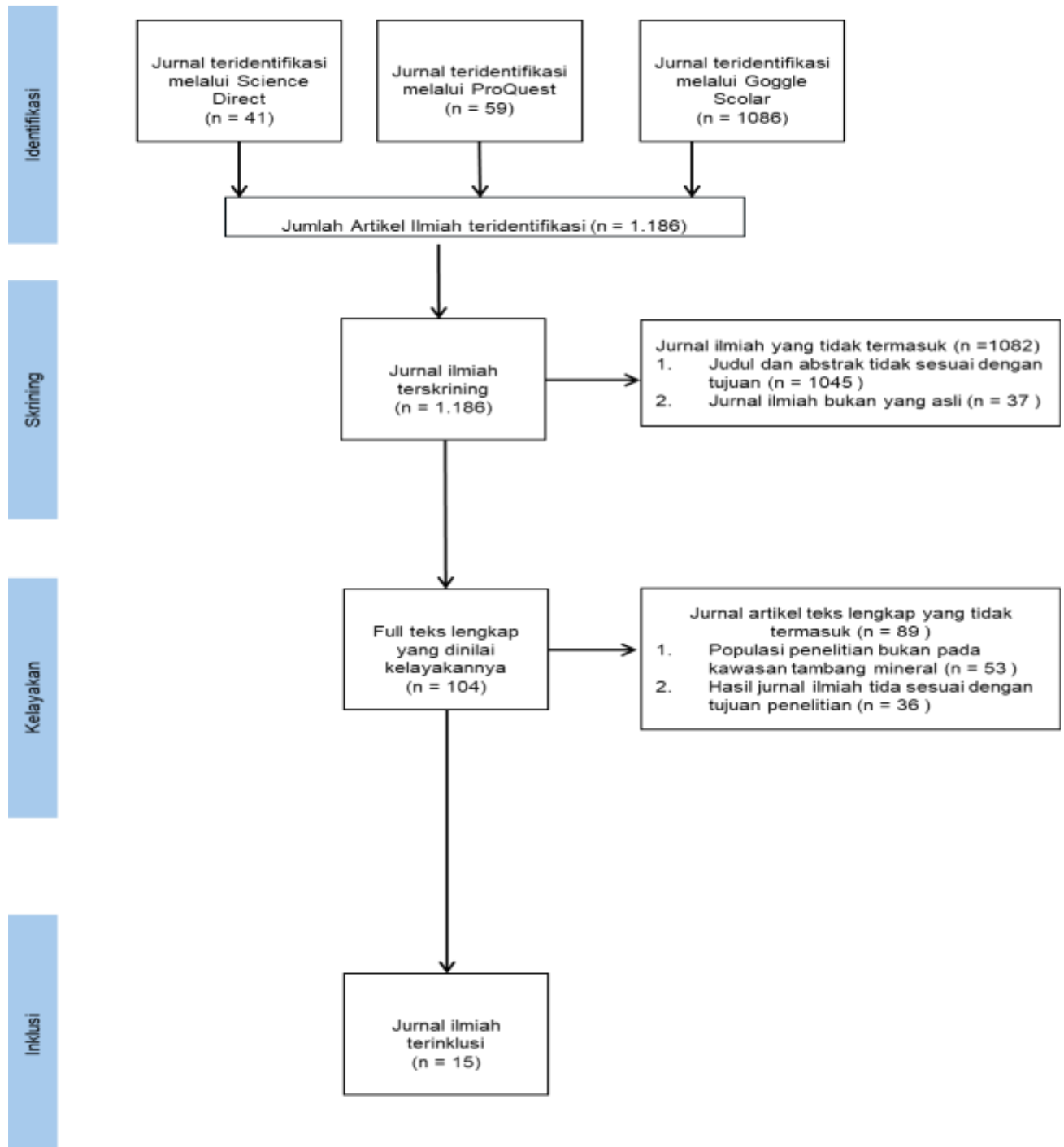
Penelitian ini merupakan kajian *scoping review* yang mengadopsi kerangka *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA-ScR). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi konsep, teori, dan mengidentifikasi *gap* pada literatur terkait paparan debu di industri pengolahan bijih mineral terhadap fungsi paru-paru pekerja. Penelitian ini dilakukan pada Agustus 2024 dengan menganalisis 15 jurnal ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2019 hingga 2024.

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Science Direct, ProQuest, dan Google Scholar menggunakan kata kunci “*mineral ore processing*”, “*dust exposure*”, dan “*impaired lungs function*”. Kriteria inklusi penelitian ini adalah jurnal penelitian asli yang diterbitkan

antara tahun 2022 hingga 2024 dan membahas dampak paparan debu terhadap fungsi paru-paru pekerja di industri pengolahan bijih mineral. Data kuantitatif dari jurnal yang memenuhi kriteria dianalisis secara sistematis untuk menghasilkan temuan dan kesimpulan yang komprehensif.

Hasil

Penelitian ini telah menyaring 1.186 jurnal ilmiah dari tiga basis data, yaitu Science Direct (41 jurnal), ProQuest (59 jurnal), dan Google Scholar (1.086 jurnal). Pada **Gambar 1** dijelaskan dilakukan tahap skrining awal berdasarkan abstrak. Sebanyak 1.045 jurnal tidak relevan dengan tujuan penelitian, dan 37 jurnal bukan merupakan manuskrip asli. Selanjutnya, dari sisa jurnal, sebanyak 89 artikel tidak memenuhi kriteria inklusi. Sebanyak 53 artikel tidak melibatkan populasi pekerja di kawasan pertambangan mineral, dan 36 artikel tidak sesuai dengan tujuan penelitian. Setelah proses penyaringan yang ketat, terpilih 15 jurnal ilmiah pada **Tabel 1** yang memenuhi semua kriteria inklusi. Jurnal-jurnal ini kemudian dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi fungsi pernafasan pekerja yang terpapar debu di industri pengolahan bijih mineral.



Gambar 1. PRISMA-ScR Paparan Debu Dan Risiko Gangguan Fungsi Pernafasan Pada Pekerja Di Industri Pengolahan Bijih Mineral

Tabel 1. Hasil Sintesis Jurnal Penelitian

No.	Penulis	Tujuan	Desain Penelitian	Variabel	Sampel	Hasil
1	Arif Susanto, Edi Karyono Putro, Saskia Nur Fadhilah Kusnadi, Danny Rosalinawati Mak'dika Santoso, Anthony Androful Manuel. (2023)	Menentukan tingkat paparan debu terespirasi dan untuk mengidentifikasi langkah pencegahan dalam melindungi kesehatan pekerja di sektor ini	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: kadar debu respirabel, lokasi lingkungan kerja, dan tahun pemantauan	Sampel berasal dari data riwayat pemantauan paparan debu respirabel yang dilakukan selama tahun 2020, 2021, dan 2023 di beberapa lokasi sekitar area lingkungan kerja pengolahan bijih mineral.	Rata-rata konsentrasi debu respirabel masih dalam batas aman di bawah 3 mg/m ³ dan <i>hazard index</i> paparan debu respirabel <1, yang terindikasi dalam kondisi aman. Tetapi menjadi penting untuk terus melakukan pengendalian paparan, karena dimungkinkan terjadinya paparan pada tingkat tinggi yang berkelanjutan di masa depan.
2	Edi Karyono Putro, Saskia Nur Fadhilah Kusnadi, Arif Susanto, Miftahul Zannah, Rizky Mahlisa, Anthony Androful Manuel. (2024)	Untuk menganalisis risiko paparan debu silika terhadap tiga jenis rotasi kerja di industri pengolahan bijih mineral	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: kadar debu silika, jenis sistem rotasi kerja di industri pengolahan bijih mineral.	Sampel berasal dari riwayat pemantauan paparan silika yang dilakukan selama tahun 2020 dan 2021 pada pekerja dengan jenis sistem rotasi kerja yang berbeda.	Konsentrasi debu silika diatas 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.
3	Andreas Neophytou, Jacqueline Ferguson, Sadie Costello, Sally Picciotto, Jhon Balmes, Stella Koutros. (2024)	Untuk menilai hubungan antara paparan debu respirabel akibat kerja dengan kasus kematian akibat	Epidemiologi retrospektif	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: data karakteristik demografi penambang, data	Populasi dalam penelitian ini sebanyak 11.817 penambang laki-laki yang diikuti dari tahun 1947 hingga	Ditemukan berdasarkan pengolahan data yang tersedia didapatkan korelasi kuat antara riwayat paparan debu respirabel dengan kasus kematian akibat

		PPOK pada pekerja pertambangan mineral.		riwayat konsentrasi pajanan debu respirabel perseorangan, riwayat pekerjaan, data penyebab kematian akibat PPOK.	2015, dengan 279 kematian akibat PPOK.	PPOK dengan derajat bahaya (<i>hazard rating</i>) dalam rentang intrakuartil paparan debu respirabel sebesar 1.20 (95% CI: 0,96,-1,49) dan hasil risiko relatif (RR) kasus kematian akibat PPOK terhadap riwayat pajanan debu respirabel pada penambang adalah 0.93.
4	Dongming Wang, Min Zhou, Yuewei Liu, Jixuan Ma, Meng Yang, Tingming Shi, Weichong Chen. (2020)	Untuk menilai perbedaan faktor-faktor penyebab risiko silikosis di antara penambang mineral dengan pengrajin gabah.	Epidemiologi retrospektif	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: data riwayat konsentrasi pajanan debu silika, riwayat pekerjaan, data karakteristik pekerja penambang dan pengrajin gabah, dan data prevalensi <i>pneumoconiosis</i> berdasarkan kriteria diagnosis <i>rontgen</i> .	Penelitian ini berdasarkan data sebanyak 39.808 pekerja pertambangan dan gerabah dari Januari, 1960 sampai dengan Desember 2003 di Cina.	Rasio bahaya silikosis untuk setiap 1 mg/m ³ per tahun meningkatkan paparan debu silika yang terhirup secara kumulatif sebesar 1,41 (1.33-1,48) untuk penambang besi dan tembaga. Faktor kebiasaan merokok dapat berperan dalam terjadinya perkembangan silikosis pada pekerja.
5	Cornelia Wippich, Jorg Rissler, Dorothea Koppisch, Dietmar Breuer. (2020)	Untuk mengetahui kemungkinan dari faktor-faktor dan tingkat aktivitas yang paling banyak mengonversi partikel debu ter-inhalasi	Observasional retrospektif	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: jenis aktivitas pekerjaan, <i>database</i> pengukuran pajanan debu ter-	Sampel dalam penelitian ini merupakan himpunan 15.120 data pengukuran paparan debu ter-inhalasi dan debu respirabel yang tersimpan dalam	<i>Inhalable dust</i> teridentifikasi sebagai variabel prediktor terpenting, jumlah debu yang ter-inhalasi oleh pekerja memiliki korelasi yang kuat untuk mempengaruhi fungsi

		menjadi debu respirabel.		inhalasi dan debu respirabel dari berbagai jenis aktivitas pekerjaan.	<i>data-base MEGA (Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance)</i>	pernafasan pada pekerja yang terpapar debu dengan koefisien determinasi (R^2) adalah 0,585 untuk keseluruhan set data.
6	Maasago Sepadi, Martha Chadyiwa, Vusumuzi Nkosi. (2020)	Untuk mengevaluasi risiko paparan debu terhadap pekerja dengan membandingkan tingkat paparan di dua fasilitas pengolahan tambang mineral yang berbeda.	<i>Cross sectional</i>	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: karakteristik demografis, riwayat pekerjaan, konsentrasi debu respirabel dan debu inhalasi.	Sampel penelitian 100 responden diambil menggunakan sistem <i>total sampling</i> .	Konsentrasi debu TWA antara fasilitas A dan B berbeda signifikan ($p < 0.026$) konsentrasi debu inhalasi (rentang 0.02-0.7 mg/m^3) lebih besar dibandingkan dengan debu respirabel (rentang 0.02-0.7 mg/m^3). Terjadi peningkatan risiko pernafasan terhadap pekerja diakibatkan kurangnya penggunaan alat pelindung pernafasan dan akumulasi paparan debu tingkat rendah.
7	Hicham Zilaout, Remko Houba, Hans Kromhout. (2020)	Untuk mengetahui tren temporal keseluruhan dari data konsentrasi paparan debu respirabel dan kuarsa selama tahun 2002 hingga 2016.	Observasional retrospektif	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: data konsentrasi debu respirabel dan debu kuarsa selama 15 tahun terakhir sebagai variabel dependen dan variabel kondisi musim, jenis pekerjaan, dan kandungan mineral dalam debu sebagai	Penelitian menggunakan 32.000 data pengukuran paparan debu yang dikumpulkan selama 29 sampling periodik selama 15 tahun dari 2002 hingga 2016. Tren temporal dipelajari dengan menggunakan model efek campuran linier.	Teramati terjadi penurunan tingkat pajanan secara keseluruhan di industri mineral Eropa selama periode 15 tahun. Tren penurunan temporal keseluruhan secara signifikan sebesar -9.0% dan -3.9% per tahun yang teramati masing-masing debu respirabel dan debu kuarsa.

			variabel independen.			
8	Carlos Boente, Adrian Zafra, Juan Carlos, Ana la Campa, Daniel Rodas, Jesus la Rosa. (2023)	Untuk mengetahui konsentrasi PM ₁₀ dan karakterisasi zat kimia serta menganalisis nilai risiko yang disandang penduduk di sekitar area pertambangan.	Cross sectional	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: konsentrasi PM ₁₀ , karakterisasi zat kimia yang terdeteksi, lokasi sumber potensial paparan debu logam.	Pengambilan Sampel secara <i>purposive sampling</i> , sampel penelitian ini berasal dari 248 titik lokasi pengambilan sampel udara di sekitar kawasan pertambangan Rio Tinto yang dilakukan selama periode satu tahun.	Konsentrasi PM ₁₀ tertinggi pada musim panas (56 µg/m ³) dan musim semi (47 µg/m ³) pada populasi terdekat kawasan pertambangan. Terdeteksi kandungan logam tertinggi yakni logam As (6.2 ng/m ³), Cu (70 ng/m ³), Pb (19 ng/m ³), dan Zn (50 ng/m ³) yang terobservasi di semua lokasi.
9	Albert Mensah, Bernd Maschner, Sabry Shaheen, Jiayu Wang, Shan Wang, Jorg Rinklebe. (2020)	Untuk mengetahui kandungan logam arsenik sebagai fraksi geokimia pada partikel halus tanah di sekitar kawasan pertambangan emas dan menilai risiko kesehatan akibat pajanan logam arsenik.	Cross Sectional	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: faktor risiko sebagai jenis dan konsentrasi debu logam (arsenik) di kawasan pertambangan emas.	Pengambilan sampel secara acak di sekitar kawasan pertambangan emas di Ghana dengan total 51 sampel tanah bagian atas terbagi menjadi partikel tanah kasar dan partikel tanah halus.	Penelitian ini menemukan hasil penambangan emas terkontaminasi logam arsenik dengan kandungan total berkisar 1.807 dan 8.400 mg/kg. Potensi mobilitas arsenik lebih tinggi pada partikel halus yang menunjukkan risiko kesehatan lingkungan yang tinggi terpajan melalui rute inhalasi pada manusia.
10	Laura Kurth, Anthony S Laney, David J Blacklet, Cara N Halldin. (2020)	Untuk mengetahui prevalensi kejadian obstruksi saluran pernafasan yang didefinisikan spirometri pada pekerja penambang yang tidak pernah merokok di Amerika Serikat.	Observasional retrospektif	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: hasil pengukuran spirometri dan hasil pengamatan radiografi <i>rontgen</i> dada pada pekerja penambang yang tidak pernah merokok	Sampel data diambil dari September 2005 sampai Agustus 2016, sebanyak 12.592 hasil tes spirometri dan 17.939 hasil observasi radiografi sebagai program surveilans kesehatan pekerja	Prevalensi obstruksi saluran pernafasan pada penambang yang tidak pernah merokok sebagai sampel sebesar 7,7%, 16,4% di antara penambang dengan <i>pneumoconiosis</i> dan 32,3% di antara penambang dengan <i>progressive massive fibrosis</i> . Penyumbatan saluran pernafasan sangat

					pertambangan batu bara.	berkaitan dengan terjadinya <i>pneumoconiosis</i> dan <i>progressive massive fibrosis</i> .
11	Abdollah Gholami, Reza Tajik, Khaula Atif, Amin Allah Zarei, Sedigheh Abbaspour, Gholamheidar Teimori, Mohsen Attar. (2020)	Penelitian ini bertujuan untuk menilai gejala paru dan fungsi paru pekerja yang terpapar debu di tambang bijih besi di Iran.	<i>Cross sectional</i>	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: evaluasi paparan debu inhalasi dan debu respirabel, hasil pengukuran fungsi pernafasan seperti kapasitas vital paksa (FVC), volume ekspirasi paksa detik pertama (FEV ₁), dan rasio FEV ₁ /FVC.	Responden pekerja pada penelitian ini melibatkan 267 pekerja laki-laki yang dikelompokkan menjadi 174 responden pekerja yang terpapar debu dan 93 responden pekerja yang tidak terpapar debu, keduanya memiliki status demografi yang relevan.	Paparan debu ter-inhalasi dan debu mineral yang terespirabel pada kelompok responden pekerja terpapar memiliki rerata masing-masing 15,09±2,34 mg/m ³ dan 3,45±2,57 mg/m ³ . Kapasitas paru-paru kelompok responden pekerja yang terpapar secara signifikan lebih rendah dibandingkan kelompok responden pekerja tidak terpapar (Kapasitas Vital Paksa [FVC] 86,55±13,77 vs. 105,05±21,5; Volume Ekspirasi Paksa dalam 1 detik [FEV ₁] 88,06±16,8 vs. 105,81±21,55; FEV ₁ /FVC 103,03±18,17 vs. 93,3±12,49).
12	Krassi Rumchev, Dong Van Hoang, Andy H. Lee. (2022).	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi usaha pengendalian paparan debu respirabel dan debu ter-inhalasi yang telah dilakukan oleh perusahaan pertambangan di Australia Barat dari tahun 2001 hingga 2012.	<i>Cross sectional</i>	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: konsentrasi paparan debu respirabel dan debu ter-inhalasi sebagai variabel independen, dan parameter fungsi pernafasan dan gejala pernafasan.	Data responden pekerja yang terpapar debu respirabel dan debu ter-inhalasi sebanyak 12.797 yang diambil dari data tahun 2001 hingga 2012.	Dalam penelitian ini menunjukkan masih tingginya prevalensi gejala batuk dan sesak yang dirasakan oleh pekerja ketika terpapar debu respirabel dan debu ter-inhalasi di pertambangan Australia Barat. Tetapi teramati penurunan tingkat paparan debu ter-inhalasi dan debu respirabel sebagai

13	Marjo Sairanen dan Mikael Rinne. (2020)	Penelitian ini untuk mengetahui pengaruh jarak dan faktor angin terhadap lokasi proses penghancuran bijih mineral dengan konsentrasi debu sebagai TSP dan PM ₁₀ yang dihasilkan.	<i>Observational</i>	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: konsentrasi debu (TSP dan PM ₁₀), arah dan kecepatan angin, kondisi cuaca, dan jarak.	Sampel dalam penelitian ini adalah jenis mesin pemecah bijih mineral, jenis bijih mineral.	bentuk hasil pengendalian paparan debu tersebut. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi debu (TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5} , dan PM ₁) menurun seiring dengan bertambahnya jarak dengan semua arah angin. Penurunan konsentrasi yang paling besar terjadi pada lokasi yang melawan arah angin. Konsentrasi debu yang terdispersi ke lingkungan dipengaruhi oleh kelembaban dan curah hujan.
14	Yi-Hsuan Chen, Dorothy Nguyen, Stephen Brindley, Tiancong Ma, Tian Xia, Jürgen Brune, Jared M. Brown & Candace Su-Jung Tsai. (2023).	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek yang terjadi secara <i>in vivo</i> akibat interaksi sel dengan berbagai macam ukuran partikel debu sehingga didapatkan kurva dosis-respon.	Pengujian observasi laboratorium secara <i>in vivo</i> pada pernafasan manusia.	Variabel dalam penelitian ini adalah bentuk, jenis, dan ukuran partikel debu sebagai variabel independen serta efek pada sel yang teramati seperti respon peningkatan LDH, sitokin, <i>inflamatory</i> sel respon.	Sampel debu yang diujikan dalam penelitian ini berasal dari proses <i>crushing</i> pada industri pengolahan bijih mineral di kawasan pertambangan di Colorado, USA. Dihasilkan 3 kelompok variasi ukuran partikel debu dari 100-500 nm, 500-1000 nm, dan >1000 nm yang kemudian akan diujikan terhadap sel paru-paru manusia secara <i>in vivo</i> .	Ukuran partikel yang lebih besar memiliki korelasi yang negatif dengan toksisitas <i>in vitro</i> pada makrofag ($p < 0,05$). Fraksi partikel halus dengan ukuran sekitar 500 nm pada partikel debu bijih mineral, secara eksplisit menginduksi reaksi inflamasi yang lebih kuat daripada partikel yang lebih besar.

15	Baluchova Bozena, Bacik Peter, Mamova Alexandra. (2021).	Untuk mengetahui karakterisasi kimia dan morfologi dari debu mineral yang berasal dari kawasan pertambangan.	<i>Cross sectional</i>	Variabel dalam penelitian ini di antaranya: karakteristik dan morfologi dari debu mineral	Sampel debu tersuspensi didapatkan dari sekitar kawasan pertambangan di Jelsaba-Lubenik Slowakia .	Paparan partikel debu menyebabkan dampak signifikan terhadap pernafasan. Debu mineral dengan ukuran partikel terkecil <2.5 µm melewati dinding alveolar. PM _{2.5} yang tidak larut dapat mengaktifkan fibrosis. Sampel debu terdeteksi sebagai kristal magnetit. Sehingga komposisi mineral dan morfologi debu dapat mempengaruhi fungsi pernafasan manusia.
----	--	--	------------------------	---	--	---

Pembahasan

1. Identifikasi Bahaya Debu Di Industri Pengolahan Bijih Mineral

Rangkaian proses dalam industri pengolahan bijih mineral melibatkan penggunaan mesin *crusher* untuk menghancurkan bijih mineral hasil tambang, proses ini secara dominan menghasilkan debu di lingkungan kerja pengolahan bijih mineral. Debu yang dihasilkan memiliki ukuran bervariasi dari 500 µm hingga terkecil >5 µm, karakteristik aerodinamik debu memungkinkan debu terdispersi di udara dan masuk ke dalam saluran pernafasan yang berpotensi mempengaruhi penurunan fungsi pernafasan pekerja. Tahap pengolahan bijih mineral selanjutnya melibatkan penghancuran dan kompresi dengan dua lempengan logam hingga mencapai ukuran yang diinginkan, yang menghasilkan debu respirabel dan debu silika selama proses kering ini yang memperburuk kualitas udara sekitar. Penggunaan *ball mill* dan *semi autogenous mill* (SAG) dengan penambahan air membantu mengurangi debu secara signifikan. Setelah digiling, bijih mineral masuk ke tahap *floatasi*, di mana bahan kimia dicampurkan untuk menghasilkan konsentrat mineral. Mengingat tingginya potensi paparan debu respirabel dan debu silika pada tahap penghancuran bijih mineral, penting untuk pemantauan paparan pekerja dan menerapkan pengendalian seperti penggunaan *conveyor belt* untuk mengangkat bijih mineral dan mengurangi dispersinya debu ke udara.(13)

2. Efek Paparan Debu Terhadap Fungsi Pernafasan

Paparan debu respirabel dari kawasan pertambangan mineral, terutama PM₁₀, dapat menimbulkan berbagai dampak kesehatan serius pada pekerja. Debu ini dapat menyebabkan inflamasi pada sistem pernafasan, disfungsi sistem vaskular, dan neuroinflamasi pada hewan uji tikus.(14) Pada manusia, paparan debu respirabel dapat memicu *pneumoconiosis*, penyakit paru-paru yang ditandai dengan pembentukan jaringan parut dan peradangan. Kebiasaan merokok dan ketidakpatuhan pekerja untuk menggunakan alat pelindung diri (APD) dapat mempercepat penurunan fungsi pernafasan.(15,16) Penurunan fungsi pernafasan ini erat kaitannya dengan PPOK pada penambang mineral. Risiko kematian akibat PPOK pada penambang dengan riwayat paparan debu respirabel 93% lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak terpapar.(17) PPOK terjadi akibat paparan debu mineral PM_{2.5} dalam bentuk kristal magnetit yang tidak larut dan melewati dinding *alveolar*, memicu proses *fibrosis* dalam paru-paru. Komposisi mineral dan morfologi debu mempengaruhi kesehatan penduduk, terutama fungsi pernafasan.(18) Debu respirabel telah diidentifikasi sebagai variabel prediktif terpenting

penurunan fungsi pernafasan pada pekerja yang terpapar debu. Hubungan ini memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,585.(19)

Penelitian di industri pengolahan bijih mineral besi di Iran ditemukan rata-rata paparan debu terinhalasi dan debu respirabel 15,09 mg/m³ dan 3,45 mg/m³, berdampak signifikan terhadap penurunan fungsi paru pekerja pertambangan. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan kapasitas vital paksa (FVC), volume ekspirasi paksa dalam 1 detik (FEV₁), dan rasio FEV₁/FVC yang lebih rendah pada kelompok responden pekerja terpapar debu dibandingkan kelompok responden yang tidak terpapar debu.(20) Temuan lainnya adalah prevalensi obstruksi saluran pernafasan yang tinggi pada penambang yang tidak pernah merokok namun menderita *pneumoconiosis* dibandingkan dengan yang tidak menderita penyakit tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa *pneumoconiosis*, penyakit paru akibat paparan debu dapat menghambat saluran pernafasan terlepas dari kebiasaan merokok.(21)

3. Karakterisasi Zat Kimia dalam Debu Respirabel

Di beberapa kawasan pertambangan emas, kandungan logam tertinggi dalam debu respirabel adalah arsenik (As), diikuti oleh tembaga (Cu), timbal (Pb), dan seng (Zn). Potensi mobilitas arsenik pada debu ini lebih tinggi, menunjukkan risiko kesehatan lingkungan yang tinggi jika terpapar melalui inhalasi pada manusia.(22,23) Konsentrasi debu sebagai PM₁₀ tertinggi terjadi pada musim panas dibandingkan dengan musim semi. Hal tersebut disebabkan faktor kelembaban udara yang rendah pada musim panas.(24) Faktor lain seperti jarak dan posisi yang melawan arah angin juga menunjukkan penurunan konsentrasi debu (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, dan PM₁) secara signifikan.(25) Upaya manajemen risiko dan pengendalian paparan debu respirabel dan debu kuarsa yang tepat dapat secara signifikan menurunkan tren paparan individu terhadap pekerja di industri pengolahan mineral di Eropa. Selama 15 tahun terakhir, tren penurunan paparan debu respirabel dan debu kuarsa masing-masing sebesar -9.0% dan -3.9% per tahun.

4. Efek pada Tingkat Sel Akibat Paparan Debu yang Dihasilkan Industri Pengolahan Bijih Mineral secara *in vitro*

Sampel debu yang berasal dari proses pengolahan bijih mineral di Amerika Serikat telah dilakukan karakterisasi kandungan unsur logam menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) yang menunjukkan terdapat kandungan unsur Carbon (61,4%), Ca (13,5%), Cu (9,5%), Fe (0,5%), Co (0,3%), Mn (0,2%), dan Si (0,1%). Selanjutnya pengujian toksisitas sel yang diinduksi partikel debu berdasarkan ukuran yang terbagi

menjadi 3 kelompok rentang ukuran 100-500 nm, 500-1000 nm, dan >1000 nm yang kemudian *viabilitas* sel ditentukan melalui uji kadar *adenosine triphosphate* (ATP), dan pelepasan *lactate dehydrogenase* (LDH). Sehingga pada fraksi ukuran debu yang lebih kecil teramati secara konsisten menginduksi pelepasan *cytokine* yang lebih tinggi sebagai respons inflamasi pada sel paru-paru secara *in vitro*.(26)

Kajian mengenai komposisi unsur dan toksisitas sel telah banyak diteliti, tetapi terkait mekanisme pada setiap unsur dalam perubahan biologis masih diperdebatkan. Akan tetapi pada umumnya unsur logam akan mengakibatkan terjadinya peningkatan produksi reaksi stres oksidatif (ROS).(27) Partikel debu yang ter-inhalasi umumnya akan disingkirkan oleh sistem imun, terutama makrofag alveolar. Makrofag yang teraktivasi ini kemudian akan memproduksi ROS (*Reactive Oxygen Species*) dan RNS (*Reactive Nitrogen Species*) yang menyebabkan peroksidasi lipid dan nitrosasi protein, hingga kerusakan DNA. Fraksi debu respirabel yang ter-inhalasi secara khusus memicu stress oksidatif. Permukaan debu yang terkandung radikal bebas yang dihasilkan melalui reaksi fenton karena kandungan logam yang tinggi. ROS dan RNS yang tinggi melemahkan kemampuan paru-paru dalam meredam oksidan, sehingga menyebabkan peradangan. (7) Kontaminan logam berat dan logam transisi yang terikat pada partikel debu berperan dalam menginduksi stres oksidatif, yang mengaktifasi kematian sel melalui mekanisme apoptosis dan *autophagy*.(28)

Melalui mekanisme tersebut maka terjadinya *pneumoconiosis* dan PPOK yang umumnya merupakan penyakit akibat kerja (PAK), pada organ paru-paru dari akibat terakumulasinya material debu organik dan anorganik dan efek reaksi jaringan pulmoner terhadap debu.(6) Proses penyakit tersebut yang mendasari adanya perubahan diameter dan integritas saluran respirasi, menyebabkan peningkatan resistensi aliran udara dari *bronchospasm*, edema mukosa, dan peningkatan produksi *mucus*.(29) 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.(30)

Kesimpulan

Berdasarkan kajian dari 15 jurnal ilmiah yang diperoleh, industri pengolahan bijih mineral terbukti menjadi sumber pajanan debu terhadap pekerja. Debu respirabel dan debu ter-inhalasi dapat menurunkan fungsi pernafasan. Upaya pengendalian secara komprehensif

diperlukan untuk mengatasi permasalahan ini. Pengendalian langsung pada sumber debu menjadi langkah utama. Selain itu, pemantauan paparan, penggunaan alat pelindung diri, dan manajemen risiko yang baik juga harus dilakukan secara konsisten untuk melindungi kesehatan pekerja.

Saran

Berdasarkan hasil tinjauan literatur sistematis ini, saran yang dapat diajukan untuk penelitian lebih lanjut yakni: Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memahami secara mendalam mekanisme bagaimana paparan debu berbagai jenis dan ukuran partikel yang masuk kedalam sistem pernafasan manusia dengan menggunakan pemodelan *multi-path particulate dosimetry* (MPPD).

Daftar Pustaka

1. 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: The American Conference of Governmental Industrial Hygiene (ACGIH); 2022.
2. ISO. International Standardization Organization: 7708:1995(E) Air quality—particle size fraction definitions for health-related sampling. International Organisation for Standardization; 1995.
3. Noble TL, Parbhakar-Fox A, Berry RF, Lottermoser B. Mineral Dust Emissions at Metalliferous Mine Sites. Dalam: Lottermoser B, editor. Environmental Indicators in Metal Mining [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2017 [dikutip 18 April 2024]. hlm. 281–306. Tersedia pada: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_16
4. Putro EK, Kusnadi SNF, Susanto A, Zannah M, Mahalisa R, Manuel AA. Penilaian Risiko Paparan Debu Silika Terhadap Pekerja di Industri Pengolahan Bijih Mineral. *Jurnal Kesehatan Vokasional*. 29 Februari 2024;9(1):74–85.
5. Susanto A, Mauliku NE, Suhat S, Nugrahaeni DK. Penilaian Risiko Paparan Dermal pada Penggunaan Bahan Berbahaya & Beracun (B3) di Industri Pengolahan Bijih Mineral. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan*. 2023;4(1):1–10.
6. Perret JL, Plush B, Lachapelle P, Hinks TSC, Walter C, Clarke P, dkk. Coal mine dust lung disease in the modern era. *Respirology*. 2017;22(4):662–70.

7. Peixoto MS, de Oliveira Galvão MF, Batistuzzo de Medeiros SR. Cell death pathways of particulate matter toxicity. *Chemosphere*. 1 Desember 2017;188:32–48.
8. Valavanidis A, Vlachogianni T, Fiotakis K, Loridas S. Pulmonary oxidative stress, inflammation and cancer: respirable particulate matter, fibrous dusts and ozone as major causes of lung carcinogenesis through reactive oxygen species mechanisms. *Int J Environ Res Public Health*. 27 Agustus 2013;10(9):3886–907.
9. Wood C, Yates D. Respiratory surveillance in mineral dust-exposed workers. *Breathe*. Maret 2020;16(1):190632.
10. World Health Organization WH. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization; 2021.
11. Soemirat J, Ariesyadi HD. Toksikologi Lingkungan. Keenam. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press; 2021.
12. Zilaout H, Houba R, Kromhout H. Temporal trends in respirable dust and respirable quartz concentrations within the European industrial minerals sector over a 15-year period (2002–2016). *Occup Environ Med*. 1 April 2020;77(4):268–75.
13. Chaulya SK, Trivedi R, Kumar A, Tiwary RK, Singh RS, Pandey PK, dkk. Air quality modelling for prediction of dust concentrations in iron ore mines of Saranda region, Jharkhand, India. *Atmospheric Pollution Research*. 1 Mei 2019;10(3):675–88.
14. Zychowski KE, Wheeler A, Sanchez B, Harmon M, Steadman Tyler CR, Herbert G, dkk. Toxic Effects of Particulate Matter Derived from Dust Samples Near the Dzhidinski Ore Processing Mill, Eastern Siberia, Russia. *Cardiovasc Toxicol*. 1 Oktober 2019;19(5):401–11.
15. Wang D, Zhou M, Liu Y, Ma J, Yang M, Shi T, dkk. Comparison of risk of silicosis in metal mines and pottery factories: a 44-year cohort study. *Chest*. 2020;158(3):1050–9.
16. Sepadi MM, Chadyiwa M, Nkosi V. Platinum Mine Workers' Exposure to Dust Particles Emitted at Mine Waste Rock Crusher Plants in Limpopo, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Januari 2020;17(2):655.
17. Neophytou AM, Ferguson JM, Costello S, Picciotto S, Balmes JR, Koutros S, dkk. Diesel exhaust and respiratory dust exposure in miners and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) mortality in DEMS II. *Environment International*. 1 Maret 2024;185:108528.

-
18. Baluchová BM, Bačík P, Mamová A. The health impact of mineral dust air pollution on the global and local scale (on the example from Slovakia). *Neuroendocrinology Letters*. 2019;40:1.
 19. 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*. 1 September 2021;238:113838.
 20. 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/>
 21. Kurth L, Laney AS, Blackley DJ, Halldin CN. Prevalence of spirometry-defined airflow obstruction in never-smoking working US coal miners by pneumoconiosis status. *Occupational and environmental medicine*. 2020;77(4):265–7.
 22. Mensah MK, Mensah-Darkwa K, Drebenstedt C, Annam BV, Armah EK. Occupational respirable mine dust and diesel particulate matter hazard assessment in an underground gold mine in Ghana. *Journal of Health and Pollution*. 2020;10(25):200305.
 23. Markovic Baluchova B, Bacik P, Mamova A. The Health Impact of Mineral Dust Air Pollution on the Global and Local Scale (on the example from Slovakia). *Neuro endocrinology letters*. 8 Oktober 2019;40:24–8.
 24. Boente C, Zafra-Pérez A, Fernández-Caliani JC, Sánchez de la Campa A, Sánchez-Rodas D, de la Rosa JD. Source apportionment of potentially toxic PM₁₀ near a vast metallic ore mine and health risk assessment for residents exposed. *Atmospheric Environment*. 15 Mei 2023;301:119696.
 25. Sairanen M, Rinne M. Dust emission from crushing of hard rock aggregates. *Atmospheric Pollution Research*. 1 Maret 2019;10(2):656–64.
 26. 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.
 27. Fubini B, Hubbard A. Reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) generation by silica in inflammation and fibrosis. *Free radical Biology and medicine*. 2003;34(12):1507–16.
 28. 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
29. Gold WM, Koth LL. Pulmonary function testing. *Murray and Nadel's Textbook of Respiratory Medicine*. 2016;407.
30. Brown JS, Gordon T, Price O, Asgharian B. Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. *Part Fibre Toxicol*. 10 April 2013;10:12.