

LITERATURE REVIEW : DAMPAK PAPARAN PM2.5 TERHADAP GANGGUAN PERNAPASAN PEKERJA YANG BERISIKO TINGGI

Berliana Putri Safitri^{1*}, Muhammad Farid Dimjati Lusno²

Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga^{1,2}

*Corresponding Author : berliana.putri.safitri-2021@fkm.unair.ac.id

ABSTRAK

Polusi udara akibat aktivitas industri merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan peningkatan kadar PM2.5. Paparan PM2.5 dapat menyebabkan efek merugikan bagi kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan bahkan penyakit pernapasan kronis. Gangguan pernapasan yang disebabkan oleh PM2.5 tidak hanya berpengaruh pada produktivitas pekerja, tetapi juga terhadap kualitas hidup secara keseluruhan. Pada pekerja yang bekerja di sektor industri pertambangan, manufaktur, pelabuhan, dan industri kapal berisiko tinggi terhadap paparan PM2.5. Penelitian ini menggunakan metode *literature review* dengan data sekunder dari penelitian lima tahun terakhir dan berkaitan dengan topik pembahasan. Teknik pengambilan data menggunakan database Google Scholar, Pubmed, dan Scopus yang sesuai dengan kriteria inklusi. Artikel yang tidak relevan akan dieliminasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa dari sembilan artikel berbeda, variabel yang diteliti memiliki hubungan yang signifikan dengan gangguan pernapasan pada pekerja. Sebagian besar artikel yang diteliti memiliki konsentrasi PM2.5 yang tinggi. Dampak paparan PM2.5 menyebabkan gangguan pernapasan ringan pada pekerja hingga gangguan fungsi paru. Selain itu, terdapat faktor risiko lain yang berhubungan dengan gangguan pernapasan pada pekerja seperti karakteristik pekerja (seperti umur, status gizi, dan riwayat penyakit), perilaku pekerja (status merokok, dan penggunaan APD), serta karakteristik pekerjaan (lama kerja, masa kerja). Hasil analisis terhadap sembilan artikel menunjukkan bahwa paparan PM2.5 dengan konsentrasi yang melebihi nilai ambang batas memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan pernapasan pekerja.

Kata kunci : gangguan pernapasan, pekerja, PM2.5

ABSTRACT

Air pollution due to industrial activities is one of the main factors that cause an increase in PM2.5 levels. Exposure to PM2.5 can cause adverse health effects such as respiratory tract irritation and even chronic respiratory diseases. Respiratory problems caused by PM2.5 not only affect worker productivity, but also overall quality of life. Workers in the mining, manufacturing, port, and shipbuilding industries are at high risk of PM2.5 exposure. This study uses the literature review method with secondary data from the last five years of research and related to the topic of discussion. The data retrieval technique uses Google Scholar, Pubmed, and Scopus databases that match the inclusion criteria. Irrelevant articles will be eliminated. This study showed that out of nine different articles, the variables studied had a significant association with respiratory distress in workers. Most of the articles studied had high concentrations of PM2.5. The impact of PM2.5 exposure causes mild respiratory distress in workers to impaired lung function. In addition, there are other risk factors associated with respiratory disorders in workers such as worker characteristics (such as age, nutritional status, and medical history), worker behavior (smoking status, and use of PPE), and job characteristics (length of employment, tenure). Analysis of nine articles showed that exposure to PM2.5 with concentrations exceeding the threshold value has a significant impact on workers' respiratory health.

Keywords : PM2.5, respiratory disorders, workers

PENDAHULUAN

Aktivitas industri merupakan salah satu penyumbang utama polusi udara dengan dampak signifikan terhadap kualitas lingkungan hidup dan kesehatan masyarakat. Aktivitas berbagai sektor industri seperti pertambangan, manufaktur, pelabuhan, dan industri kapal sering kali

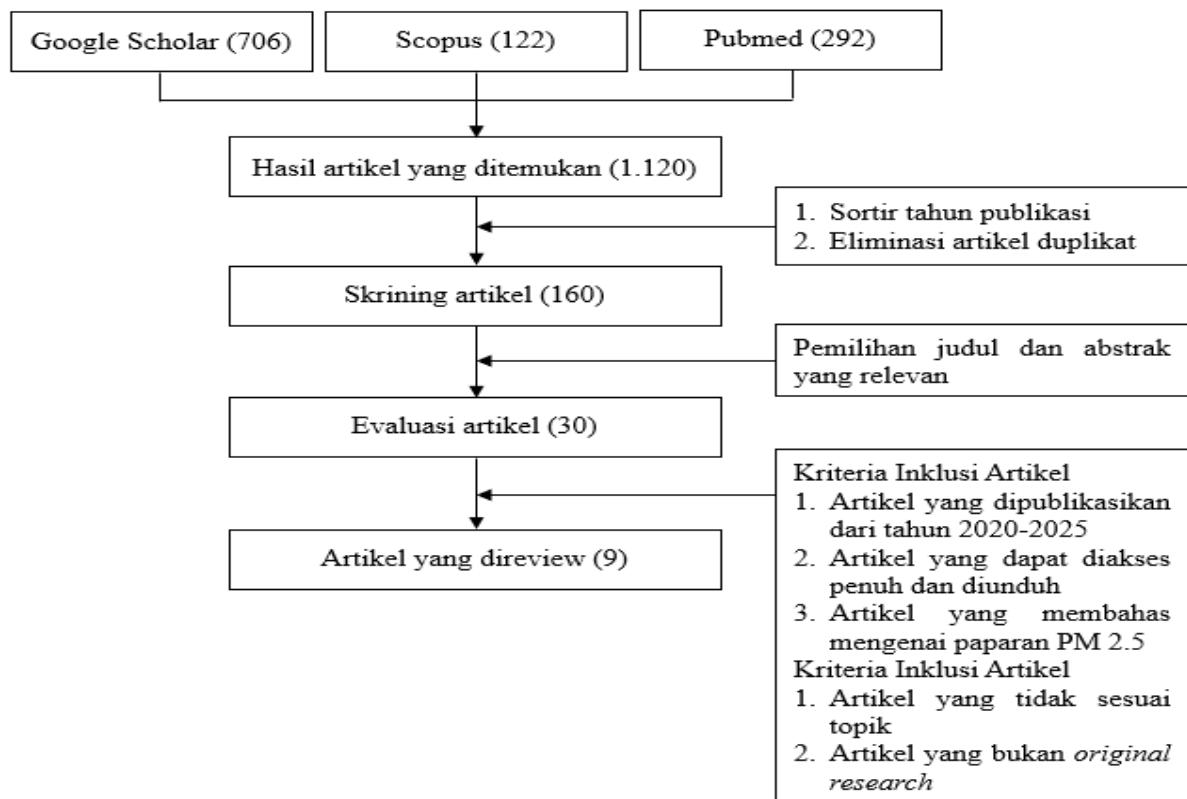
menghasilkan emisi gas dan partikel yang merusak (Hidayat, 2023). Polusi udara yang disebabkan oleh industri dapat berdampak pada iklim global dan perubahan cuaca (Fath, 2021). Sektor industri juga merupakan salah satu penyebab peningkatan konsentrasi berbagai polutan yang dapat memicu gangguan kesehatan masyarakat (Pane & Usiono, 2024). Emisi yang berasal dari cerobong asap industri mampu menyebar hingga ke area pemukiman dan mencemari udara di sekitarnya, sehingga sering kali mengakibatkan gangguan kesehatan pada masyarakat (Febriyanti et al., 2022). Paparan polusi udara dalam jangka panjang dapat mempengaruhi kualitas hidup, memperpendek usia, dan meningkatkan beban penyakit di masyarakat (Laksono & Afiyani, 2023).

Aktivitas industri memainkan peran krusial dalam menghasilkan polusi udara, khususnya melalui emisi *Particulate Matter* (PM2.5) yang dapat membahayakan kesehatan masyarakat (Pane & Usiono, 2024). PM2.5 merupakan partikel udara dengan ukuran yang sangat kecil, yaitu kurang dari 2,5 mikrometer. Proses produksi yang melibatkan pembakaran, pengelasan, pemotongan, pengecoran, serta pengolahan berbagai material dapat melepaskan partikel kecil berukuran kurang dari 2,5 mikrometer ke atmosfer (Tosepu, 2024). Peningkatan aktivitas industri serta mobilitas yang tinggi berkontribusi terhadap tingginya konsentrasi PM2.5 di lingkungan (Fauzan et al., 2024). Polusi udara akibat aktivitas industri menjadi salah satu faktor utama penyebab meningkatnya kadar PM2.5 di udara. Ukuran partikel yang sangat kecil menyebabkan partikel ini mudah untuk terhirup hingga masuk ke dalam paru sehingga dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernapasan dan kardiovaskular (Aghorru & Koprawi, 2023).

Paparan PM2.5 dapat menyebabkan efek merugikan yang luas, mulai dari gangguan jangka pendek seperti iritasi saluran pernapasan, hingga penyakit kronis seperti kanker paru dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) (Anjelicha et al., 2022). Paparan PM2.5 memiliki dampak yang signifikan terhadap kesehatan pernapasan terutama bagi pekerja di sektor industri yang bekerja di lingkungan kerja berisiko tinggi. Pekerja di sektor industri termasuk kelompok berisiko tinggi terhadap paparan PM2.5 karena sering terpapar langsung oleh debu, asap, dan emisi bahan kimia dari proses produksi dan aktivitas industri (Susilo & Tunjungsari, 2022). PM2.5, yang terdiri dari partikel halus berukuran kurang dari 2,5 mikrometer, dapat menembus jauh ke dalam saluran pernapasan dan mengakibatkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan pernapasan akut dan kronis. Paparan debu respirabel di lingkungan kerja, khususnya pada pekerja industri, sangat berisiko menimbulkan penyakit seperti bronkitis, pneumonia, dan asma (Sunuh & Subagyo, 2022).

METODE

Desain penelitian ini adalah *literature review* dengan metode PRISMA. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari penelitian sebelumnya. Studi ini dilakukan dengan mencari literatur yang sesuai dengan kriteria inklusi. Pencarian literatur menggunakan database, yaitu Google Scholar, Pubmed, dan Scopus. Kata kunci yang digunakan sebagai kriteria inklusi adalah paparan PM2.5, polusi udara, dampak PM2.5 pada sistem pernapasan, risiko kesehatan, dan gangguan pernapasan. Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan dan menyimpulkan hasil temuan dari berbagai artikel yang telah ditemukan. Semua artikel akan dievaluasi apakah memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan. Kriteria inklusi ditentukan dengan membaca seluruh artikel yang berfokus pada paparan PM2.5 terhadap keluhan gangguan kesehatan pernapasan.



Gambar 1. PRISMA Method Flow

HASIL

Berdasarkan artikel yang telah dievaluasi sebelumnya, terdapat sembilan artikel yang memenuhi persyaratan yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Tinjauan Artikel Jurnal

No	Nama Peneliti dan Judul	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan dan Temuan Penelitian
1	Nugroho et al., 2024 <i>The Relationship Between PM2.5 and PM10 Dust counter and Exposure and Respiratory Disorders Among Limestone Mining Workers in Kebumen Regency</i>	Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan alat <i>particulate counter</i> dan wawancara kepada pekerja. Sampel penelitian ini sebanyak 62 pekerja yang tersebar di 11 lokasi.	Sebanyak 25,8% pekerja tercatat bekerja di area dengan tingkat PM2.5 melebihi Nilai Ambang Batas (NAB) yaitu sebesar $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sementara 74,2% pekerja berada di area dengan tingkat PM2.5 di bawah NAB. Hasil uji <i>Chi Square</i> menunjukkan tidak ada hubungan signifikan antara tingkat PM2.5 dan gangguan pernapasan pekerja ($p\text{-value} = 0,390 > 0,05$). Dari total 62 responden yang diteliti, ditemukan bahwa 25 pekerja (40,3%) mengalami gangguan pernapasan, sedangkan 37 pekerja (59,7%) tidak mengalami gangguan pernapasan.	Variabel pengalaman kerja, kebiasaan merokok, lama paparan, penggunaan alat pelindung diri, dan riwayat penyakit saluran pernapasan berhubungan dengan gangguan pernapasan ($P\text{ value} < 0,05$). Faktor yang paling berpengaruh adalah kelengkapan APD dan riwayat penyakit yang dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan hingga 82,6%. Sebaliknya, usia, kadar PM2.5, dan PM10 tidak berhubungan dengan gangguan pernapasan.

2	Amalia & Novianus, 2022 <i>Factors Affecting Respiratory Complaints in Workers at PT X, Plant Parung Bogor</i>	Pengukuran PM2.5 dengan alat ukur <i>MiniVol Air Sampler Portable</i> dan wawancara menggunakan lembar kuesioner kepada pekerja. Sampel dalam penelitian yaitu 69 pekerja PT. X Plant Parung, Bogor.	Hasil pengukuran konsentrasi debu PM2.5 di tiga titik lokasi yaitu, 0,41 mg/m ³ , 0,28 mg/m ³ dan 0,27 mg/m ³ . Sebanyak 27 pekerja berada di area kerja titik 1, 23 pekerja berada di area kerja titik 2, dan 19 pekerja di area kerja titik 3. Sebanyak 19 pekerja (27,5%) mengalami keluhan saluran pernapasan. Pada variabel riwayat penyakit pernapasan diperoleh nilai p sebesar 0,404 ($p > 0,05$) sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan antara riwayat penyakit pernapasan dengan keluhan saluran pernapasan.	Hasil uji bivariat menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara umur, masa kerja, status merokok, dan penggunaan masker dengan keluhan saluran pernapasan ($P \text{ value} < 0,05$). Pada variabel riwayat penyakit pernapasan diperoleh nilai p sebesar 0,404 ($p > 0,05$) sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan antara riwayat penyakit pernapasan dengan keluhan saluran pernapasan.
3	Wahab et al., 2024 <i>Exposure to PM10 and PM2.5 among Phinisi Industry Workers in Bonto Bahari District, Bulukumba Regency</i>	Sampel penelitian ini sebanyak 70 pekerja perahu phinisi di, Kecamatan Bonto bahari, Kab Bulukumba yang terbagi menjadi 3 wilayah kerja, yaitu Pantai Mandala, Pantai Bira, dan Tanah lemo.	Hasil pengukuran PM2.5 dilakukan di 3 wilayah kerja yaitu, Pantai Mandala dengan rata-rata 0,94 g/m ³ , Pantai Bira rata-rata <0,1 g/m ³ , dan Tanah Lemo rata-rata 0,91 g/m ³ . Sebanyak 26 pekerja berada di wilayah kerja Pantai Bira, 22 pekerja di wilayah kerja Tanah Lemo, dan 22 pekerja lainnya di wilayah kerja Pantai Mandala. Sebanyak 48 pekerja mengalami keluhan ISPA.	Mayoritas responden yang mengalami keluhan ISPA adalah pekerja berusia 35–41 tahun, merokok, menggunakan masker kain sebagai APD, memiliki lama kerja 1–3 tahun, bekerja sekitar 8 jam dalam sehari, dan berlokasi di Pantai Bira dengan paparan PM2.5 tertinggi sebesar 67 g/m ³ .
4	Fikri et al., 2025 <i>Environmental Health Risk Analysis (EHR) of PM2.5 and PM10 Exposure in Workers of PT Beton Elemenindo Perkasa in 2024</i>	Pengukuran menggunakan instrumen yang meliputi kuesioner, timbangan, dan microtoise serta particulate counter HTI HT-9600. Jumlah sampel sebanyak 89 pekerja PT. Beton Elemenindo Perkasa dan empat titik pengambilan sampel PM2.5.	Pengukuran konsentrasi PM2.5 dilakukan di empat lokasi, dengan hasil tertinggi tercatat di Hall B sebesar 1604 µg/m ³ . Hasil tersebut sangat melebihi nilai baku mutu untuk PM2.5, yaitu 55 µg/m ³ . Nilai Risk Qoutient PM2.5 pada konsentrasi maksimum dinilai berisiko dengan nilai tertinggi mencapai 2,07779.	Pajanan PM2.5 dengan konsentrasi tertinggi berisiko terhadap 39 pekerja (43,3%), yang terdiri dari 14 pekerja di Hall A (46,7%) dan 25 pekerja di Hall B (69,4%). Variabel IMT dan waktu kerja menunjukkan bahwa adanya hubungan yang signifikan dengan nilai RQ PM2.5 pada konsentrasi maksimum. Sementara pada variabel masa kerja, usia, dan kebiasaan merokok tidak menunjukkan hubungan dengan nilai RQ PM2.5 pada konsentrasi maksimum.
5	Rahmadini & Haryanto, 2020 <i>Impact Of Particulate Matter 2.5 (PM2.5) Exposure On Symptoms Of Chronic</i>	Penelitian ini menggunakan instrumen yaitu alat <i>Haz Dust EPAM 5000</i> dan spirometer. Sampel penelitian ini sebanyak 75	Hasil pengambilan sampel pencemaran PM2.5 dari 30 titik pengukuran, diperoleh konsentrasi terendah sebesar 42,59 µg/m ³ dan tertinggi sebesar 517,80 µg/m ³ , dengan nilai rata-rata sebesar 181,874 µg/m ³ . Angka rata-rata ini	Hasil analisis karakteristik pekerja tidak ada variabel yang menunjukkan hubungan signifikan dengan kejadian gejala PPOK eksaserbasi akut. Secara keseluruhan tidak ada variabel yang

	<i>Obstructive Pulmonary Disease (COPD) Acute Exacerbation In Workers At Tanjung Priok Harbor, 2018</i>	pekerja di pelabuhan Tanjung Priok dan 30 titik pengambilan sampel PM2.5.	menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 di lokasi tersebut telah melebihi nilai ambang batas yang ditetapkan, yaitu $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dari 75 responden, 29 terindikasi mengalami obstruksi paru dan 4 di antaranya mengalami PPOK eksaserbasi akut.	berpengaruh signifikan terhadap gejala PPOK eksaserbasi akut. Selain itu, hasil analisis juga menunjukkan bahwa tidak ada hubungan signifikan antara kadar PM2.5 dan gejala PPOK eksaserbasi akut.
6	Riski & Haryanto, 2020 <i>The Relationship Of Exposure To Chronic Obstructive Pulmonary Disease (PPOK) In Workers At The Tanjung Priok Port Gate In 2018</i>	Instrumen yang digunakan yaitu alat Haz Dust EPAM 5000 dan alat spirometri. Sampel penelitian sebanyak 75 pekerja dan sampel lingkungan diukur pada 30 titik di pintu masuk pelabuhan Tanjung Priok.	Hasil pengukuran PM2.5 di 30 titik menghasilkan rata-rata sebesar $178,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan konsentrasi terendah $42,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan tertinggi mencapai $517,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sebanyak 58 pekerja (77,3%) memiliki fungsi paru normal, sementara 17 pekerja (22,7%) mengalami gejala PPOK.	Hasil uji statistik menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara paparan PM2.5 dengan kejadian PPOK. Sementara itu, hasil uji yang menganalisis hubungan antara karakteristik pekerja, perilaku pekerja, serta karakteristik pekerjaan terhadap kejadian PPOK menunjukkan bahwa hanya variabel penggunaan APD yang memiliki hubungan secara signifikan dengan kejadian PPOK.
7	Tampubolon & Ramdhani, 2024 <i>Relationship between PM2.5 Concentration and Respiratory Distress in Mechanical Test Workers UP PKB Pulo Gadung</i>	Penelitian ini menggunakan instrumen berupa kuesioner dan alat ukur Real-time Monitoring Heat Index dan PM2.5. Sampel penelitian yaitu, 19 pengujii mekanis di UP PKB Pulo Gadung dan 19 di kelompok tidak terpajang.	Hasil pengukuran konsentrasi PM2.5 di area kerja uji mekanis UP PKB Pulo Gadung menunjukkan fluktuasi dengan pengukuran terendah sebesar $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan hasil tertinggi mencapai $651 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan rata-rata secara keseluruhan adalah $100,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada kelompok pekerja uji mekanis sebanyak 16 orang (84,22%) mengalami gejala gangguan pernapasan, sedangkan pada kelompok sampel pembanding 17 orang (89,47%) juga mengalami gejala gangguan pernapasan.	Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan signifikan antara konsentrasi PM2.5 dan keluhan gangguan pernapasan. Di sisi lain, karakteristik individu tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan keluhan gangguan pernapasan. .
8	Tran et al., 2024 <i>Effects Of Occupational Exposure To Metal Fume PM2.5 On Lung Function And Biomarkers Among Shipyard Workers: A 3-Year Prospective Cohort Study</i>	Penelitian ini menggunakan instrumen yaitu kuisisioner dan alat ukur berupa Personal Environmental Monitor (PEM), Spirometer, Bio-Plex Multiplex Immunoassay, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.	Hasil pengukuran paparan PM2.5 menunjukkan rata-rata pada kunjungan pertama sebesar $464,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kunjungan kedua sebesar $455,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan kunjungan ketiga $309,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pekerja dengan paparan PM2.5 tinggi yaitu pekerja las (71,1% atau sekitar 128 orang), sementara sisanya (28,9% atau sekitar 52 orang) adalah pekerja kantor.	Hasil uji statistik menunjukkan bahwa seluruh temuan memiliki signifikansi statistik ($p < 0,05$) yang mengindikasikan adanya hubungan paparan PM2.5 dengan penurunan fungsi paru serta peningkatan biomarker inflamasi dan stres oksidatif. Pengaruh paparan PM2.5 tampak paling jelas pada saluran napas kecil (FEF25–75%) dan biomarker urin α -

		Sampel dalam penelitian ini sebanyak 180 pekerja galangan kapal yang terdiri dari pekerja las dan pekerja kantor.	antitrypsin & ITIH4 yang dapat berperan sebagai indikator dini gangguan paru.
9	Nasri et al., 2023 <i>PM2.5 Exposure And Lung Function Impairment Among Fiber-Cement Industry Workers</i>	Pengukuran PM2.5 dengan menggunakan <i>Sioutas cascade impactor</i> yang terhubung ke <i>Leland Legacy pump</i> dan <i>Spirometer Portable</i> serta kuesioner. Sampel penelitian ini sebanyak 131 pekerja yang terbagi di area produksi dan area non-produksi.	Hasil pengukuran diperoleh rata-rata PM2.5 di area produksi sebesar 151,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan rentang nilai antara 108,61 hingga 199,51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara itu, di area non-produksi, rata-rata PM2.5 tercatat sebesar 91,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan rentang nilai antara 66,23 hingga 99,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Jumlah pekerja di area produksi sebanyak 71 orang (54,2%), sedangkan di area non-produksi sebanyak 60 orang (45,8%). Pada area produksi tercatat 21 orang (29,6%) mengalami gangguan fungsi paru. Sementara itu, di area non-produksi terdapat 8 orang (13,3%) mengalami gangguan fungsi paru.

Berdasarkan hasil tinjauan dari beberapa artikel dalam tabel 1, diketahui bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara paparan partikel debu halus PM2.5 dengan gangguan pernapasan pada pekerja. Pekerja yang terpapar PM2.5 dalam jangka waktu tertentu menunjukkan peningkatan kejadian gejala gangguan pernapasan seperti batuk, sesak napas, hingga penurunan fungsi paru. Selain itu, beberapa penelitian juga mengidentifikasi adanya faktor risiko lain yang turut berkontribusi terhadap gangguan pernapasan, seperti durasi kerja, penggunaan alat pelindung diri (APD) yang tidak optimal, status merokok, serta kondisi ventilasi di tempat kerja.

PEMBAHASAN

Karakteristik PM2.5 dan Sumber Paparannya

PM2.5 merupakan partikel bergerak yang berdiameter lebih kecil dari 2,5 mikrometer. Karakteristik utama dari PM2.5 yaitu kemampuannya untuk menembus jauh ke dalam sistem pernapasan, sehingga dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan pernapasan (Zulfahmi et al., 2020). Sumber utama dari PM2.5 dalam industri mencakup emisi dari industri pertambangan, manufaktur, pelabuhan, dan industri perkapalan. Beberapa penelitian menunjukkan hasil pengukuran kadar PM2.5 di berbagai sektor industri lebih besar dari nilai ambang batas yang telah ditentukan pada Permenkes No. 2 Tahun 2023, yaitu sebesar 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal tersebut menyebabkan adanya gangguan kesehatan pernapasan pada pekerja. Pada industri pertambangan batu kapur, tercatat sebanyak 25,8% pekerja berada di area kerja dengan tingkat PM2.5 melebihi nilai ambang batas (Nugroho et al., 2024). PM2.5 tersebut berasal dari kegiatan penggalian, pengangkutan, dan pemrosesan batu kapur sehingga partikel debu terlepas ke udara. Sektor industri lain menghasilkan partikel PM2.5 dari proses produksi yang melibatkan pembakaran bahan bakar dan penggunaan bahan kimia pada industri manufaktur.

Sebagai contoh, hasil pengukuran PM2.5 di industri *fiber-cement* diperoleh rata-rata konsentrasi sebesar 151,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada area produksi (Nasri et al., 2023). Selama proses produksi berlangsung dapat melepaskan emisi PM2.5 yang tinggi dan berdampak buruk terhadap kualitas udara (Rahman et al., 2023).

Pelabuhan dan industri perkapalan juga menyumbang emisi PM2.5. Aktivitas bongkar muat barang serta pembakaran bahan bakar kapal berkontribusi pada polusi udara (Fadillah et al., 2024). Penelitian yang dilakukan di pintu gerbang pelabuhan Tanjung Priok menghasilkan rata-rata sebesar 178,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dari 30 titik (Riski & Haryanto, 2020). Penelitian lain pada pekerja galangan kapal juga menunjukkan nilai rata-rata tertinggi pengukuran PM2.5 di atas nilai ambang batas, yaitu sebesar 464,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pekerja dengan paparan PM2.5 tinggi merupakan pekerja las (Tran et al., 2024).

Gangguan Pernapasan yang Dialami Pekerja

Gangguan pernapasan merupakan keluhan yang umum dialami oleh pekerja di berbagai sektor industri. Sebagian besar gangguan pernapasan yang dialami pekerja berkaitan dengan paparan partikel-partikel debu di lingkungan kerja seperti PM2.5. Penelitian yang dilakukan di industri pertambangan batu kapur Kabupaten Kebumen, ditemukan bahwa 40,3% pekerja mengalami gangguan pernapasan (Nugroho et al., 2024). Keluhan pernapasan yang dialami pekerja beragam jenisnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa dampak terhadap kesehatan pekerja berbeda-beda. Berbagai jenis gangguan pernapasan yang dikeluhkan oleh pekerja di PT. X, Plant Parung Bogor di antaranya adalah batuk (42%), sakit tenggorokan (46,4%), sesak napas (46,4%), batuk berdahak (39,1%), mengi (29%), dan hidung tersumbat (53,6%) (Amalia & Novianus, 2022). Selain itu, keluhan ISPA juga dialami oleh pekerja industri phinisi dengan prevalensi Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) yang tinggi sebesar 68,6% di kalangan pekerja (Wahab et al., 2024).

Sejumlah pekerja teridentifikasi adanya gangguan pernapasan kronis. Kondisi tersebut dapat dipicu salah satunya oleh paparan polutan dalam jangka waktu yang lama. Gejala PPOK ditemukan pada 5,3% pekerja pelabuhan Tanjung Priok dengan terindikasi gejala PPOK Eksaserbasi Akut. Sebagian besar kasus pekerja yang menderita obstruksi berada pada tingkat obstruksi sedang (Rahmadini & Haryanto, 2020). Sementara itu, penelitian lain pada di industri fiber-cement menemukan penurunan fungsi paru melalui uji spirometri akibat pajanan PM2.5. Temuan kelainan berupa restriksi paru (13,7%), obstruksi paru (6,9%), dan campuran (1,5%) (Nasri et al., 2023).

Dampak Gangguan Pernapasan Akibat Paparan PM2.5

Paparan partikel PM2.5 di lingkungan kerja dapat menyebabkan berbagai gangguan pernapasan pada pekerja, mulai dari keluhan ringan hingga gangguan pernapasan serius seperti gangguan fungsi paru. Kadar PM2.5 memiliki hubungan dengan gangguan pernapasan pada pekerja di berbagai sektor industri. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar PM2.5 dalam jangka panjang mengalami keluhan seperti sesak napas, mengi, batuk berdahak, sakit tenggorokan, dan ISPA. Pada pekerja uji mekanis di UP PKB Pulo Gadung, ditemukan bahwa 84,22% pekerja pengujinya mengalami gangguan pernapasan dengan rata-rata keluhan sebanyak empat per orang. Penelitian ini menunjukkan hubungan signifikan antara paparan PM2.5 dengan keluhan pernapasan ($p = 0,050$), di mana pekerja yang bekerja di lingkungan dengan konsentrasi PM2.5 tinggi memiliki peluang 4,8 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan dibandingkan dengan pekerja di lingkungan dengan kadar PM2.5 lebih rendah (Tampubolon & Ramdhani, 2024). Paparan PM2.5 dengan konsentrasi tinggi secara signifikan meningkatkan risiko gangguan pernapasan. Penelitian lain di industri phinisi di Kecamatan Bonto Bahari menunjukkan bahwa tingginya konsentrasi PM2.5 sejalan dengan keluhan pernapasan pekerja. Konsentrasi PM2.5 tertinggi mencapai 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan

sebanyak 68,6% pekerja mengalami keluhan ISPA (Wahab et al., 2024). Hasil pengukuran PM2.5 tertinggi melebihi batas aman yang direkomendasikan.

Dampak paparan PM2.5 tidak hanya berupa gangguan pernapasan ringan, tetapi dapat menjadi kronis akibat paparan PM2.5 dengan konsentrasi tinggi dan jangka waktu yang lama. Penelitian yang dilakukan pada pekerja galangan kapal mengungkapkan bahwa paparan PM2.5 dari asap logam berhubungan dengan penurunan fungsi paru yang signifikan, seperti penurunan FEV1 dan FVC yang merupakan indikator awal PPOK. Paparan asap logam yang mengandung PM2.5 berkorelasi dengan penurunan fungsi paru yang signifikan, termasuk penurunan FEV1 (2,157%), PEF (2,806%), serta peningkatan biomarker inflamasi dan stres oksidatif (Tran et al., 2024). Paparan PM2.5 dalam jangka panjang dapat merusak kondisi paru dan meningkatkan risiko PPOK. Pada pekerja di industri fiber-cement, paparan PM2.5 meningkatkan risiko gangguan restriksi paru (13,7%) dan gangguan obstruksi paru (6,9%). Hal tersebut ditandai dengan meningkatnya kejadian mengi (66,67%) dan sesak napas (43,75%). Pekerja dengan fungsi paru yang terganggu memiliki risiko 8,61 kali lebih besar mengalami gangguan pernapasan dibandingkan pekerja dengan fungsi paru normal (Nasri et al., 2023).

Faktor Risiko Pekerja terhadap Gangguan Pernapasan

Gangguan pernapasan pada pekerja di sektor industri bukan hanya disebabkan pajanan PM2.5. Melainkan dapat juga dipengaruhi berbagai faktor risiko yang dimiliki oleh pekerja. Faktor-faktor tersebut dapat meningkatkan maupun menurunkan kemungkinan gangguan pernapasan pada pekerja. Berdasarkan hasil beberapa penelitian, faktor risiko yang berperan dalam kejadian gangguan pernapasan pada pekerja meliputi karakteristik pekerja (seperti umur, status gizi, dan riwayat penyakit), perilaku pekerja (status merokok, dan penggunaan APD), serta karakteristik pekerjaan (lama kerja, masa kerja).

Karakteristik Pekerja

Seiring bertambahnya umur, pekerja lebih rentan untuk mengalami gangguan pernapasan karena adanya penurunan kapasitas paru. Gangguan pernapasan tidak hanya disebabkan oleh faktor fisiologis, tetapi lingkungan kerja terutama jika telah terpapar polutan udara seperti PM2.5 dapat memengaruhi kesehatan paru. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pekerja yang berusia lebih tua lebih berisiko mengalami gangguan pernapasan dibandingkan pekerja yang lebih muda. Penelitian menunjukkan bahwa pekerja usia ≥ 30 tahun berisiko 4,8 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan seperti mengi, sesak napas, batuk, dan hidung tersumbat dibandingkan pekerja yang lebih muda dengan nilai $p = 0,014$ (Amalia & Novianus, 2022). Sementara itu, dalam penelitian yang dilakukan pada pekerja galangan kapal, ditemukan bahwa pajanan PM2.5 dari asap logam berkontribusi terhadap penurunan fungsi paru yang lebih signifikan pada pekerja berusia lebih tua. Parameter fungsi paru seperti FEV1, PEF, FEF25%, FEF50%, dan FEF75% mengalami penurunan yang lebih besar pada pekerja dengan usia lebih lanjut, menunjukkan bahwa umur mempengaruhi kecepatan penurunan kapasitas paru akibat pajanan polusi udara di tempat kerja (Tran et al., 2024).

Riwayat penyakit pernapasan dapat memperburuk dampak paparan polutan udara terhadap kesehatan pernapasan pekerja. Pekerja dengan riwayat penyakit pernapasan rentan mengalami gejala yang lebih parah saat terpapar polutan udara, terutama PM2.5 di lingkungan kerja. Paparan berulang terhadap partikel halus ini dapat memicu kekambuhan, mempercepat penurunan fungsi paru, dan meningkatkan risiko infeksi saluran pernapasan. Riwayat penyakit pernapasan, seperti asma, tuberkulosis, bronkitis kronis, dan PPOK memiliki pengaruh besar terhadap keluhan atau gangguan pernapasan yang dialami oleh pekerja. Penelitian pada industri pertambangan batu kapur menemukan bahwa pekerja dengan riwayat penyakit pernapasan berisiko 3,3 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan dibandingkan dengan pekerja tanpa riwayat penyakit. Sebanyak 17 pekerja (70,8%) dengan riwayat penyakit mengalami

gangguan pernapasan. Faktor yang paling berpengaruh dalam meningkatkan risiko gangguan pernapasan hingga 82,6% adalah kelengkapan APD dan riwayat penyakit (Nugroho et al., 2024).

Penelitian lain juga mendukung temuan ini, dengan menemukan bahwa pekerja di Pelabuhan Tanjung Priok yang memiliki riwayat asma atau bronkitis mengalami perburukan gejala setelah bekerja di lingkungan dengan kadar PM2.5 tinggi. Dua pekerja pernah didiagnosis asma, dan tiga pekerja mengalami bronkitis setelah mulai bekerja di pelabuhan. Mereka melaporkan bahwa setelah terpapar polusi udara secara terus-menerus, mereka mengalami sesak napas yang lebih sering, batuk kronis yang memburuk, serta peningkatan frekuensi mengi. Sebanyak 20 pekerja juga mengaku bahwa sejak bekerja di pelabuhan merasa pernapasan mereka memburuk (Rahmadini & Haryanto, 2020).

Status gizi pekerja yang umumnya diukur menggunakan Indeks Massa Tubuh (IMT) adalah salah satu faktor yang dapat memengaruhi kerentanan terhadap keluhan atau gangguan pernapasan khususnya pada pekerja yang terpapar partikel polutan seperti PM2.5. Pekerja dengan berat badan tidak normal baik kegemukan (*overweight/obesitas*) maupun kekurangan berat badan (*underweight*) berpotensi mengalami gangguan sistem pernapasan karena keterbatasan fungsi fisiologis tubuh dalam menangani paparan polutan secara optimal. Penelitian di industri *fiber-cement* menunjukkan adanya hubungan antara IMT pekerja dengan risiko gangguan pernapasan akibat paparan PM2.5, dengan *Prevalence Ratio* (PR) sebesar 1,992. Dalam penelitian tersebut, pekerja dengan IMT tidak normal (baik rendah maupun tinggi) cenderung menunjukkan nilai *intake* PM2.5 yang berbeda. Pekerja dengan IMT rendah cenderung memiliki nilai *intake* PM2.5 lebih tinggi, sedangkan pekerja dengan IMT tinggi berisiko mengalami gangguan ekspansi paru (Fikri et al., 2025).

Perilaku Pekerja

Penggunaan Alat Pelindung Diri khususnya masker pernapasan menjadi salah satu upaya preventif dalam mencegah gangguan pernapasan pada pekerja. Penggunaan APD sangat penting terutama di lingkungan kerja yang terpapar polutan udara seperti PM2.5. APD berfungsi sebagai *barrier* fisik yang membatasi masuknya partikel polutan ke dalam saluran pernapasan, sehingga mencegah terjadinya iritasi, peradangan, atau gangguan fungsi paru. Berbagai penelitian yang dianalisis menunjukkan bahwa penggunaan APD yang benar, lengkap, dan konsisten berkontribusi dalam menurunkan keluhan pernapasan pada pekerja. Penelitian yang dilakukan pada pekerja tambang batu kapur menemukan bahwa pekerja yang tidak menggunakan APD lengkap memiliki risiko 2,7 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan dibandingkan dengan mereka yang menggunakan APD lengkap. Penelitian ini juga menyebutkan bahwa kelengkapan APD dan riwayat penyakit merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam meningkatkan risiko gangguan pernapasan hingga 82,6% (Nugroho et al., 2024).

Hubungan penggunaan masker dengan gangguan pernapasan yang signifikan pada pekerja di PT. X Plant Parung Bogor. Pekerja yang menggunakan masker memiliki risiko gangguan pernapasan 0,259 kali daripada pekerja yang tidak menggunakan masker (Amalia & Novianus, 2022). Hal tersebut menunjukkan pekerja yang rutin memakai masker memiliki risiko yang lebih kecil untuk mengalami keluhan pernapasan. Sementara itu, penelitian pada pekerja di pintu masuk pelabuhan Tanjung Priok menemukan bahwa penggunaan APD merupakan satunya variabel yang secara statistik signifikan berhubungan dengan kejadian PPOK. Pekerja yang tidak pakai masker atau menggunakan masker tidak sesuai standar memiliki risiko 6,9 kali lebih tinggi mengalami PPOK (Riski & Haryanto, 2020). Selain penggunaan masker, jenis masker yang digunakan juga mempengaruhi efektivitasnya dalam menyaring PM2.5. Penelitian Wahab et al., (2024) menunjukkan bahwa pekerja yang menggunakan masker kain sebagian besar mengalami keluhan ISPA yaitu, 70,2%. Meskipun hampir seluruh pekerja

menggunakan masker, 65,2% pekerja tetap mengalami ISPA terutama pada pekerja yang hanya memakai masker kain. Pekerja menggunakan masker medis memiliki insiden ISPA yang lebih rendah dibandingkan pengguna masker kain.

Status merokok dapat berpengaruh terhadap gangguan pernapasan pada pekerja, terutama bagi mereka yang bekerja di lingkungan dengan paparan polutan udara seperti PM2.5. Pekerja yang merokok lebih rentan mengalami gangguan pernapasan karena kombinasi antara asap rokok dan polutan industri memperburuk kondisi paru-paru. Penelitian yang dilakukan di industri batu kapur menemukan bahwa pekerja perokok berisiko 2,6 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan daripada pekerja non perokok (Nugroho et al., 2024). Hasil yang sama juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan di PT. X Plant Bogor yang menunjukkan bahwa perokok berisiko 5,8 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan dibandingkan non-perokok (Amalia & Novianus, 2022).

Hubungan status merokok dengan gangguan fungsi paru juga ditemukan pada penelitian pekerja industri *fiber-cement*. Pekerja perokok berisiko 6,0 kali lebih tinggi mengalami gangguan fungsi paru daripada pekerja yang tidak merokok. Selain itu, hasil uji multivariat menunjukkan bahwa merokok menjadi salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap gangguan fungsi paru (Nasri et al., 2023). Penelitian di industri phinisi menunjukkan bahwa 70,7% pekerja perokok mengalami ISPA. Pekerja yang merokok lebih dari 10 batang per hari memiliki tingkat keluhan ISPA tertinggi, yaitu 66,7%. Hal tersebut menunjukkan bahwa rokok meningkatkan risiko infeksi saluran pernapasan akibat paparan PM2.5 (Wahab et al., 2024).

Karakteristik Pekerjaan

Lama paparan merujuk pada durasi waktu pekerja terpapar polutan udara seperti PM2.5 setiap harinya. Lama paparan menjadi salah satu faktor yang dapat memengaruhi tingkat keparahan gangguan pernapasan yang dialami oleh pekerja. Semakin lama pekerja terpapar maka akan banyak partikel PM2.5 yang terhirup dan tertahan di saluran pernapasan. Berdasarkan penelitian pada pekerja batu kapur ditemukan bahwa pekerja dengan lama paparan ≥ 8 jam per hari berisiko 6,3 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan daripada mereka yang terpapar dalam waktu <8 jam. Sebanyak 49% pekerja yang terpapar ≥ 8 jam per hari mengalami gangguan pernapasan (Nugroho et al., 2024). Hubungan lama paparan dengan gangguan pernapasan juga ditemukan pada penelitian pekerja industri Phinisi yang menunjukkan bahwa pekerja yang bekerja ≥ 8 jam per hari memiliki prevalensi ISPA tertinggi, yakni 73% (Wahab et al., 2024). Penelitian lain menemukan bahwa pekerja yang bekerja >9 jam per hari memiliki risiko 2,25 kali lebih tinggi mengalami gangguan pernapasan. Dalam penelitian tersebut, pekerja yang bekerja selama 12 jam per hari mempunyai nilai *intake* tertinggi (Fikri et al., 2025).

Masa kerja merupakan faktor yang dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan atau keluhan pernapasan pada pekerja akibat paparan polutan seperti PM2.5 dalam jangka waktu yang lama. Hasil penelitian pada pekerja di industri batu kapur menunjukkan bahwa pekerja dengan masa kerja ≥ 5 tahun berisiko 2,5 kali lebih besar mengalami gangguan pernapasan daripada mereka yang bekerja kurang dari 5 tahun (Nugroho et al., 2024). Hubungan masa kerja dengan gangguan pernapasan juga ditemukan dalam penelitian yang menunjukkan pekerja dengan masa kerja ≥ 5 tahun berisiko 3,2 kali lebih besar mengalami keluhan pernapasan daripada mereka yang bekerja kurang dari 5 tahun (Amalia & Novianus, 2022). Hal ini terjadi karena pekerja yang lebih lama berada dalam lingkungan kerja yang terpapar PM2.5 memiliki risiko lebih tinggi mengalami penurunan fungsi paru secara bertahap. Penelitian pada pekerja industri *fiber-cement*, ditemukan bahwa pekerja yang telah bekerja selama 20 tahun atau lebih berisiko 2,7 kali lebih tinggi mengalami gangguan fungsi paru. Gangguan ini meliputi restriksi paru (13,7%), obstruksi paru (6,9%), dan gangguan campuran (1,5%), dengan gejala mengi dan sesak napas yang sering terjadi pada pekerja dengan masa

kerja lebih panjang. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa lama kerja ≥ 20 tahun menjadi faktor yang paling berpengaruh terhadap gangguan fungsi paru (Nasri et al., 2023).

KESIMPULAN

PM2.5 merupakan indikator pencemaran udara yang berbahaya bagi kesehatan manusia terutama pada sistem pernapasan. Paparan PM2.5 di lingkungan kerja dengan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan gangguan pernapasan seperti iritasi saluran pernapasan hingga gangguan fungsi paru. Berdasarkan hasil tinjauan dari sembilan penelitian terdahulu, paparan PM2.5 berhubungan signifikan dengan gangguan pernapasan. Pekerja yang terpapar PM2.5 konsentrasi tinggi berisiko lebih tinggi untuk mengalami gangguan pernapasan daripada pekerja yang terpapar PM2.5 konsentrasi rendah. Gangguan pernapasan pada pekerja juga dapat disebabkan oleh faktor risiko lain, meliputi karakteristik pekerja (seperti umur, status gizi, riwayat penyakit), perilaku pekerja (status merokok, penggunaan APD), dan karakteristik pekerjaan (lama kerja, masa kerja).

UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang terlibat atas dukungan, arahan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghorru, R., & Koprawi, M. (2023). Rancang Bangun Sistem Pemantau Kualitas Dan Polusi Udara PM2.5 Yang Terintegrasi Dengan Platform IOT. *Technologia : Jurnal Ilmiah*, 14(3), 311. <https://doi.org/10.31602/tji.v14i3.12029>
- Amalia, N., & Novianus, C. (2022). Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Keluhan Saluran Pernapasan Pada Pekerja di PT. X Plant Parung Bogor. *Jurnal Fisioterapi Dan Kesehatan Indonesia*, 2(1), 32–42. <https://doi.org/10.59946/jfki.2022.79>
- Anjelicha, D., Riwanto, M., & Wijayantono, W. (2022). Analisis Risiko Penyakit Paru Obstruksi Kronis Akibat Paparan Debu Pm2.5 pada Pekerja Mebel Kayu CV Mekar Baru Kota Padang. *Jurnal Sehat Mandiri*, 17(1), 115–125. <https://doi.org/10.33761/jsm.v17i1.598>
- Fath, M. A. (2021). Pengaruh Kualitas Udara dan Kondisi Iklim terhadap Perekonomian Masyarakat (Literature Review). *Media Gizi Kesmas*, 10(2), 329. <https://doi.org/10.20473/mgk.v10i2.2021.329-342>
- Fauzan, F. D., Rayhan, D. A., Putri, H. M., & Kartiasih, F. (2024). Peramalan Konsentrasi PM2.5 Menggunakan Model ARCH/GARCH dan Long Short-Term Memory (Studi Kasus: Kota Jakarta Pusat). *Infomatek*, 26(1), 27–44. <https://doi.org/10.23969/infomatek.v26i1.12603>
- Febriyanti, A. L., Pancahayani, S., & Faisal, M. (2022). Model Matematika Penyebaran Polusi Udara untuk Menentukan Jarak Aman Pemukiman dari Cerobong Asap Industri. *SPECTA Journal of Technology*, 6(1), 35–46. <https://doi.org/10.35718/specta.v6i1.692>
- Fikri, E., Dewi, D. R., & Juariah, L. (2025). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Pajanan PM2.5 dan PM10 Pada Pekerja PT. Beton Elemenindo Perkasa Tahun 2024. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(1), 116–123.
- Hidayat, A. (2023). Dampak Polusi Udara Pada Kesehatan. <https://doi.org/10.31219/osf.io/wam46>
- Laksono, S., & Afifyani, N. (2023). Polusi Udara Dan Penyakit Kardiovaskular: Tinjauan Pustaka. *Menara Medika*, 6(1), 55–64. <https://doi.org/10.31869/mm.v6i1.4696>

- Nasri, S. M., Putri, F. A., Sunarno, S., Fauzia, S., & Ramdhan, D. H. (2023). *PM2.5 exposure and lung function impairment among fiber-cement industry workers*. *Journal of Public Health Research*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1177/22799036221148989>
- Nugroho, P. A., Setiani, O., & Hanani, Y. (2024). Hubungan Pajanan Debu PM10 dan PM2.5 dengan Gangguan Pernapasan Pada Pekerja Penambang Batu Kapur Kabupaten Kebumen. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(12), 10204–10214. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i12.9276>
- Pane, S. K. R., & Usono. (2024). Dampak Lingkungan Perkotaan Terhadap Kesehatan Paru-Paru Masyarakat. *Jurnal Studi Multidisipliner*, 8(12), 707–712.
- Rahmadini, A. D., & Haryanto, B. (2020). Dampak Pajanan Particulate Matter 2,5 (PM2,5) Terhadap Gejala Penyakit Paru Obstruktif (PPOK) Kronis Eksaserbas Akut Pada Pekerja Di Pelabuhan Tanjung Priok, 2018. *Jurnal Nasional Kesehatan Lingkungan Global*, 1(1), 17–26.
- Rahman, Z. A., Handajani, L., & Kartikasari, N. (2023). Pengaruh Penerapan Green Accounting Terhadap Profitabilitas. *Monex Journal Research Accounting Politeknik Tegal*, 12(2), 251–263. <https://doi.org/10.30591/monex.v12i2.5255>
- Riski, M., & Haryanto, B. (2020). Hubungan Pajanan Pm2.5 Terhadap Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK) Pada Pekerja Di Pintu Gerbang Pelabuhan Tanjung Priok Tahun 2018. *Jurnal Nasional Kesehatan Lingkungan Global*, 1(3), 222–232.
- Sunuh, H., & Subagyo, I. (2022). Gambaran Kadar Debu Respirabel pada Pekerja Bagian Produksi di PT. Bintang Manunggal Persada Kelurahan Buluri Kota Palu. *Banua: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.33860/bjkl.v2i1.1223>
- Susilo, J., & Tunjungsari, F. (2022). Resiko Gangguan Pernapasan pada Industri Besi Baja. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*, 3(2), 110–121. <https://doi.org/10.37148/comphijournal.v3i2.109>
- Tampubolon, A. W., & Ramdhan, D. H. (2024). Hubungan Konsentrasi PM2,5 dengan Keluhan Gangguan Pernapasan pada Pekerja Uji Mekanis UP PKB Pulo Gadung. *National Journal of Occupational Health and Safety*, 5(2), 85–97. <https://doi.org/10.59230/njohs.v5i2.1055>
- Tosepu, R. (2024). Analisis Kualitas Lingkungan. *Uwais Inspirasi Indonesia*.
- Tran, H. M., Lai, C.-H., Chen, W.-L., Wang, C. C., Liang, C.-W., Chien, C.-Y., Pan, C.-H., Chuang, K.-J., & Chuang, H.-C. (2024). *Effects of occupational exposure to metal fume PM2.5 on lung function and biomarkers among shipyard workers: a 3-year prospective cohort study*. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 97(4), 401–412. <https://doi.org/10.1007/s00420-024-02055-1>
- Wahab, W., Saleh, M., Amansyah, M., Susilawaty, A., & Basri, S. (2024). Paparan PM10 dan PM2,5 Pada Pekerja Industri Phinisi di Kecamatan Bonto Bahari Kabupaten Bulukumba. *HIGIENE: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(1), 41–49. <https://doi.org/10.24252/higiene.v10i1.47991>
- Zulfahmi, I., Nasution, D. N., Nisa, K., & Akmal, Y. (2020). Logam berat pada hiu tikus (*Alopias pelagicus*) dan hiu kejen (*Loxodon macrorhinus*) dari Pelabuhan Perikanan Samudera Lampulo, Banda Aceh. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 23(1), 47–57. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v23i1.30724>