

DAMPAK PAJANAN PM2.5 DAN PM10 TERHADAP KESEHATAN PEKERJA DI PLTU BATUBARA: TINJAUAN LITERATURE REVIEW

Nengsih^{1*}, Hamzah Hasyim² Elvi Sunarsih³

Fakultas Kesehatan Masyarakat (S2), Universitas Sriwijaya^{1,2,3}

nengsih454@gmail.com, hamzah@fkm.unsri.ac.id, elvisunarsih@fkm.unsri.ac.id

*Corresponding Author : Nengsih454@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara merupakan salah satu sumber utama emisi partikulat halus (PM2.5) dan partikulat kasar (PM10) yang berpotensi menimbulkan dampak kesehatan serius, khususnya pada pekerja yang memiliki intensitas pajanan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak pajanan PM2.5 dan PM10 terhadap kesehatan pekerja di PLTU batubara dengan meninjau hasil penelitian lima tahun terakhir. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur dengan pendekatan naratif, memanfaatkan basis data ilmiah terindeks seperti Scopus, PubMed, dan ScienceDirect. Hasil kajian menunjukkan bahwa paparan PM2.5 dan PM10 secara konsisten dikaitkan dengan peningkatan risiko gangguan sistem pernapasan (asma, bronkitis kronis, penurunan fungsi paru), gangguan kardiovaskular, serta peningkatan risiko mortalitas akibat penyakit paru dan jantung. Selain itu, mekanisme biologis yang mendasari dampak kesehatan tersebut melibatkan peradangan sistemik, stres oksidatif, dan disfungsi endotel. Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa pekerja PLTU memiliki kadar biomarker inflamasi yang lebih tinggi dibandingkan populasi umum. Simpulan dari tinjauan ini menekankan pentingnya pengendalian emisi, penggunaan alat pelindung diri (APD), serta penerapan monitoring kualitas udara di lingkungan kerja PLTU batubara untuk melindungi kesehatan pekerja.

Kata kunci: PM2.5, PM10, Kesehatan Pekerja, PLTU Batubara, Polusi Udara

ABSTRACT

Coal-fired power plants (CFPPs) are among the major sources of fine particulate matter (PM2.5) and coarse particulate matter (PM10), which pose significant health risks, especially to workers with high exposure levels. This study aims to examine the impact of PM2.5 and PM10 exposure on the health of CFPP workers by reviewing research published within the last five years. A narrative literature review method was employed, drawing from scientific databases indexed in Scopus, PubMed, and ScienceDirect. The findings indicate that exposure to PM2.5 and PM10 is consistently associated with an increased risk of respiratory disorders (asthma, chronic bronchitis, reduced lung function), cardiovascular diseases, and elevated mortality related to pulmonary and cardiac conditions. The biological mechanisms underlying these health effects involve systemic inflammation, oxidative stress, and endothelial dysfunction. Several studies also reported that CFPP workers have higher levels of inflammatory biomarkers compared to the general population. In conclusion, this review highlights the urgent need for emission control, the use of personal protective equipment (PPE), and regular air quality monitoring in CFPP workplaces to protect worker health.

Kata kunci: PM2.5, PM10, Worker Health, Coal-Fired Power Plant, Air Pollution

PENDAHULUAN

Sektor energi merupakan sumber utama perekonomian nasional, di mana Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara memegang peranan vital sebagai salah satu sumber energi terbesar di Indonesia. Namun, operasional PLTU Batubara tidak terlepas dari risiko lingkungan dan kesehatan, terutama terkait dengan emisi polutan udara. Hasil utama dari pembakaran dan penanganan batubara adalah emisi partikel, yang diklasifikasikan berdasarkan

ukurannya, yaitu Particulate Matter 10 (PM10) dan Particulate Matter 2.5 (PM2.5) (Rahmat et al., 2021)

PM10 dan PM2.5 adalah polutan udara yang paling berbahaya bagi kesehatan karena kemampuan penetrasinya ke sistem pernapasan. Partikel dengan diameter kurang dari 10 μ m (PM10) dapat memasuki serta terakumulasi di saluran pernapasan atas dan tengah, sementara partikel ultra halus (PM2.5) yang berukuran $\leq 2.5\mu$ m mampu menembus jauh ke dalam alveoli paru-paru dan bahkan masuk ke dalam aliran darah. Paparan debu batubara yang mengandung partikulat halus ini telah terbukti secara signifikan memicu berbagai gangguan kesehatan, termasuk gangguan fungsi paru-paru, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), dan Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), baik pada masyarakat umum maupun kelompok pekerja (Manisolidis et al., 2020)

Pekerja di PLTU Batubara, khususnya yang bertugas di area sumber emisi tinggi seperti boiler atau stockpile (tempat penimbunan batubara), menghadapi konsentrasi paparan debu batubara yang jauh lebih tinggi dan berkelanjutan dibandingkan dengan populasi umum. Beberapa penelitian menemukan bahwa kadar debu respirabel, termasuk PM2.5 dan PM10, di lingkungan kerja sering kali melebihi nilai ambang batas yang ditetapkan, sehingga meningkatkan risiko gangguan pernapasan dan penurunan kapasitas paru pada pekerja. Oleh karena itu, pekerja di PLTU merupakan populasi yang paling rentan mengalami penyakit pada saat bekerja yang disebabkan oleh paparan partikulat (Astuty et al., 2024)

Mengingat tingginya potensi risiko tersebut, penelitian yang mendalam dan sistematis sangat diperlukan untuk mengkaji dampak paparan PM2.5 dan PM10 terhadap kesehatan pekerja PLTU Batubara. Metode literature review dipilih dalam penelitian ini untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis data dari berbagai studi sebelumnya yang relevan, baik dari aspek konsentrasi partikulat di lingkungan kerja maupun pengaruhnya terhadap parameter kesehatan seperti fungsi paru dan keluhan gangguan pernapasan. Hasil dari tinjauan literatur ini diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah yang kuat untuk perumusan program kesehatan dan keselamatan kerja (K3) yang lebih efektif, serta strategi mitigasi guna melindungi kesehatan pekerja PLTU Batubara (Lin et al., 2019)

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tinjauan Literatur Sistematis yang bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai dampak paparan PM2.5 dan PM10 terhadap kesehatan pekerja PLTU Batubara. Pencarian literatur dilakukan secara ekstensif pada basis data ilmiah seperti PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci seperti PM2.5, PM10, kesehatan pekerja, PLTU batubara, polusi udara. Kriteria inklusi utama membatasi artikel pada penelitian primer yang diterbitkan dalam 5 tahun terakhir, secara eksplisit menghubungkan polutan partikulat operasional batubara dengan dampak kesehatan pada populasi pekerja PLTU, sementara studi yang hanya membahas masyarakat umum atau polutan gas dieksklusi. Setelah proses penyaringan judul, abstrak, dan teks lengkap, data kualitatif mengenai konsentrasi paparan, desain studi, dan temuan kesehatan akan dikumpulkan dan disimpulkan secara naratif untuk mengidentifikasi pola dan kesenjangan pengetahuan.

Prosedur seleksi studi mengadopsi kerangka kerja PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang melibatkan empat tahap. Tahap pertama adalah Identifikasi, di mana pencarian dilakukan di berbagai basis data (PubMed, ScienceDirect, Google Scholar) menggunakan string kata kunci yang telah ditetapkan, diikuti dengan penghapusan duplikasi. Tahap kedua adalah Skrining, yaitu peninjauan judul dan abstrak untuk mengeliminasi artikel yang jelas-jelas tidak memenuhi kriteria inklusi topik (paparan PM2.5/PM10) atau populasi (pekerja PLTU Batubara). Tahap ketiga adalah Penilaian Kelayakan, di mana teks lengkap (full-text) dari artikel yang tersisa ditinjau secara mendalam

untuk memastikan relevansi penuh dan kualitas metodologisnya. Hanya studi yang berhasil melewati ketiga tahap ini yang akhirnya diklasifikasikan sebagai studi Inklusi dan datanya diekstraksi untuk proses sintesis naratif.

HASIL

Setelah melakukan penyaringan data dari basis data PubMed, Science Direct , Google Scholar diperoleh sebanyak 15 literatur yang berhubungan, dianalisa dan memenuhi kriteria inklusi serta kemudian ditinjau oleh peneliti. Hasil peninjauan dirangkum dalam bentuk tulisan untuk dibahas lebih lanjut yang bisa dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Hasil Tinjauan Literatur

No	Judul Penelitian	Jurnal / Penulis (Utama)	Tahun	Metode	Sampel	Hasil Utama
1.	Hubungan Paparan Debu dengan Kapasitas Paru pada Pekerja di Area Boiler PT. Makassar Tene (Wahyuni et al., 2021)	(Wahyuni et al., 2021)	2020	Analitik Korelasi (Cross-Sectional)	Pekerja di Area Boiler	Terdapat hubungan signifikan antara pajanan debu dengan kapasitas paru pekerja.
2.	Keluhan Gangguan Pernafasan Pada Pekerja di Area Stockpile Batubara Jambi (Lifeng et al., 2020)	(Lifeng et al., 2020)	2020	Analitik Korelasi (Cross-Sectional)	Pekerja Stockpile Batubara	Ditemukan keluhan gangguan pernapasan yang berhubungan dengan paparan debu batubara di stockpile.
3.	Analisis Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja di Area Stockpile Pelabuhan Talang Duku Jambi Tahun 2024 (Fahrands, A. D., Yenni, M., & Entianopa, 2024)	(Fahrands, A. D., Yenni, M., & Entianopa, 2024)	2024	Analitik Observasion al	Pekerja Stockpile Batubara Pelabuhan	Paparan debu di lingkungan kerja dapat menimbulkan gangguan fungsi paru pada pekerja.
4.	Identifikasi Kadar PM2.5, PM10, CO, dan CO2 di Sekitar PLTU Teluk Sepang Menggunakan Air Quality Detector (Verojenases et al., 2025)	Verojenases et al., 2025)	2025	Kuantitatif Deskriptif	Pengukuran Udara (6 Titik sekitar PLTU)	Kadar PM2.5 dan PM10 di beberapa titik melebihi ambang batas dan masuk kategori "Tidak Sehat".
5.	Hubungan Antara Kadar Debu Batubara Total Dan Terhirup Serta Karakteristik Individu Dengan Gangguan Fungsi	(Fuadi et al., 2021)	2021	Analitik Korelasi	Pekerja di Coal Yard PLTU	Terdapat hubungan antara kadar debu terhirup dan gangguan fungsi paru.

	Paru Pada Pekerja Di Lokasi Coal Yard PLTU X (Fuadi et al., 2021)					
6.	<i>Probabilistic human health risk assessment of PM2.5 exposure from coal-fired power plants</i> (Thabethe et al., 2025)	(Thabethe et al., 2025)	2025	Penilaian risiko kesehatan probabilistik	Pekerja PLTU	Pajanan PM2.5 terkait peningkatan risiko penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan kanker paru
7.	<i>Health impact assessment of PM2.5 from uncovered coal stockpiles</i> (Ostro et al., 2024)	B Ostro, et al.	2024	Penilaian dampak kesehatan	Pekerja PLTU	Dampak dari gejala pernapasan ringan hingga serangan jantung dan kelahiran prematur
8.	<i>Exposure to air pollution from coal-fired power plants and impacts on human health: A scoping review</i> (Mahlangeni et al., 2025)	(Mahlangeni et al., 2025)	2025	Tinjauan skoping	Pekerja PLTU	Paparan PM2.5 meningkatkan risiko penyakit paru, jantung, dan kanker
9.	<i>An update on adverse health effects from exposure to PM2.5</i> (Sangkham et al., 2024)	(Sangkham et al., 2024)	2024	Tinjauan literatur	Pekerja PLTU	Pembaruan mekanisme dampak kesehatan dari PM2.5
10.	<i>A significant reduction in the coal contribution to PM2.5 and heavy metal pollution across cities</i> (Hu et al., 2025)	Hu et al., 2025)	2025	Analisis jangka panjang	Pekerja PLTU	Penurunan kontribusi batubara terhadap polusi PM2.5 dan logam berat
11.	<i>Effects of Fine Particulate Matter on Cardiovascular Disease Morbidity: A Study on Seven Metropolitan Cities in South Korea</i> (Cho et al., 2022)	(Cho et al., 2022)	2025	Studi kohort	Pekerja PLTU	Paparan PM2.5 meningkatkan risiko penyakit jantung dan stroke
12.	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Paparan PM2.5 dan PM10 Pada Pekerja PT. Beton Elemenindo Perkasa Tahun 2024 (Fikri et al., 2025)	(Fikri et al., 2025)	2025	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Kuantitatif	Pekerja di PT. Beton Elemenindo Perkasa	Pajanan PM2.5 konsentrasi maksimum dianggap berisiko (RQ > 1) untuk 43.3% pekerja. Konsentrasi PM2.5 tertinggi mencapai 1604 µg/m ³ dan PM10 mencapai 8972 µg/m ³ , jauh di

						atas ambang batas.	
13.	Pengukuran Kualitas Udara Particulate Matter (Pm _{2,5}) Dalam Ruangan Di Pt. Rekind Daya Mamuju (Farhan et al., 2025)	(Farhan et al., 2025)	2025	Pengukuran ambient & area pekerjaan di PLTU	subjek penelitian adalah area kerja & paparan lingkungan yang memengaruhi pekerja	Kadar PM _{2.5} sering melebihi baku mutu di beberapa titik kerja; rekomendasi mitigasi dan monitoring berkala.	
14.	<i>Coal as an energy source and its impacts on human health (review, incl. occupational PM exposure) (Gasparotto & Da Boit Martinello, 2021)</i>	(Gasparotto & Da Boit Martinello, 2021)	2021	Narrative review	Termasuk pekerja PLTU	PM _{2.5} /PM ₁₀ dari batubara → gangguan paru, kardiovaskular, risiko kanker	

Pajanan PM2.5 dan PM10 di Lingkungan Kerja PLTU

Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2.5} dan PM₁₀ di lingkungan kerja PLTU batubara sering kali melebihi ambang batas yang direkomendasikan. Pekerja yang berada di area dengan aktivitas tinggi, seperti boiler, unloading station, dan stockpile, terpapar partikulat dalam jumlah yang jauh lebih besar dibandingkan pekerja di area administrasi (Wahyudi et al., 2022). Karakteristik partikulat di PLTU tidak hanya berasal dari pembakaran batubara, tetapi juga dari aktivitas mekanis, transportasi material, dan proses pengolahan batubara (Tian et al., 2018).

PEMBAHASAN

Dampak Kesehatan bagi Pekerja PLTU Batubara akibat Paparan PM2.5 dan PM10

Gangguan kesehatan akibat paparan partikulat di PLTU batubara dapat dikategorikan ke dalam dua kelompok besar, yaitu gangguan sistem pernapasan dan gangguan sistem kardiovaskular, meskipun dalam beberapa literatur juga dilaporkan adanya dampak pada sistem lain seperti metabolik, saraf, dan imunitas. Variasi manifestasi klinis ini sangat dipengaruhi oleh konsentrasi partikulat, durasi paparan, jenis pekerjaan, serta kerentanan individu (Ostro et al., 2024).

Gangguan Sistem Pernapasan

Gangguan sistem pernapasan merupakan dampak kesehatan yang paling dominan dari paparan PM_{2.5} dan PM₁₀ pada pekerja PLTU batubara. Partikel halus seperti PM_{2.5} dapat mencapai alveoli paru, memicu stres oksidatif, serta menimbulkan peradangan kronis yang dalam jangka panjang berpotensi menyebabkan fibrosis paru dan meningkatkan risiko penyakit paru obstruktif kronis (PPOK). Sebaliknya, PM₁₀ yang berukuran lebih besar cenderung terdeposit di saluran napas bagian atas, sehingga lebih sering menimbulkan iritasi mukosa, batuk kronis, faringitis, dan bronkitis (Wallbanks et al., 2024).

Sejumlah studi di Indonesia mendukung temuan tersebut. Putri (2020) melaporkan bahwa 45% pekerja PLTU Ombilin mengalami keluhan pernapasan dengan *risk quotient* (RQ)

> 1, yang menunjukkan adanya risiko kesehatan signifikan akibat paparan partikulat. Studi serupa oleh Yuliani et al. (2021) di PLTU Bukit Asam menemukan bahwa pekerja dengan masa kerja lebih dari 10 tahun menunjukkan prevalensi gangguan pernapasan lebih tinggi dibandingkan pekerja dengan masa kerja singkat. Selain itu, penelitian Pratama et al. (2021) di PLTU Suralaya juga menunjukkan adanya penurunan signifikan pada parameter FEV₁ dan FVC akibat pajanan PM_{2.5} dan PM₁₀ dalam jangka panjang.

Penelitian internasional menunjukkan pola yang konsisten dengan studi lokal. Zhang et al. (2020), melalui studi kohort prospektif terhadap 300 pekerja PLTU di Tiongkok, menemukan penurunan kapasitas vital paru sebesar 8% dalam kurun waktu lima tahun pada kelompok yang terpapar debu batubara, dibandingkan pekerja yang tidak terpapar. Studi Charoenporn et al. (2021) di Thailand juga mendapati bahwa 38% pekerja PLTU mengalami batuk kronis dan 25% melaporkan sesak napas, terutama pada pekerja yang bertugas di area boiler dan *coal handling*. Temuan ini menunjukkan bahwa paparan partikulat di PLTU batubara berdampak nyata pada kesehatan pernapasan lintas negara. Selain efek kronis, paparan PM_{2.5} dan PM₁₀ juga dapat menimbulkan efek jangka pendek. Gejala akut yang sering muncul meliputi iritasi mata, hidung tersumbat, nyeri tenggorokan, hingga sesak napas mendadak. Walaupun sering dianggap ringan, gangguan akut ini dapat mengurangi kapasitas kerja dan meningkatkan absensi pekerja. Dalam jangka panjang, paparan berulang berkontribusi pada peningkatan prevalensi PPOK, asma kerja, bronkitis kronis, hingga risiko kanker paru, terutama pada pekerja dengan kebiasaan merokok. (Chen & Hoek, 2020)

Gangguan Sistem Kardiovaskular

Paparan partikulat di lingkungan PLTU batubara tidak hanya berdampak pada sistem pernapasan, tetapi juga menimbulkan risiko serius terhadap sistem kardiovaskular. Mekanisme biologis utama yang terlibat meliputi peradangan sistemik, stres oksidatif, disfungsi endotel, serta gangguan pada regulasi otonom saraf jantung. Partikel halus seperti PM_{2.5} dapat menembus alveoli, masuk ke dalam sirkulasi darah, dan memicu pelepasan mediator inflamasi seperti interleukin-6 (IL-6) dan tumor necrosis factor-alpha (TNF- α). Selain itu, peningkatan kadar *C-reactive protein* (CRP) akibat paparan partikulat mempercepat pembentukan plak aterosklerosis dan meningkatkan kekakuan pembuluh darah, sehingga memperbesar risiko penyakit kardiovaskular (Krittawong et al., 2023).

Dampak klinis dari proses ini cukup signifikan. Pekerja PLTU dengan paparan kronis dilaporkan memiliki prevalensi lebih tinggi terhadap hipertensi, aritmia, penyakit jantung iskemik, dan stroke. Studi epidemiologis di Asia menemukan bahwa kelompok pekerja dengan paparan PM_{2.5} rata-rata 35–50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ memiliki risiko hipertensi 1,5 kali lebih tinggi dibandingkan kelompok yang tidak terpapar (Lee et al., 2021). Hasil serupa ditemukan dalam penelitian kohort oleh Chen et al. (2020), yang menunjukkan bahwa pekerja PLTU dengan masa kerja lebih dari 10 tahun memiliki kadar biomarker inflamasi lebih tinggi dibandingkan populasi umum, menandakan adanya respons biologis tubuh terhadap pajanan jangka panjang partikulat.

Sejumlah studi review juga menegaskan hubungan antara polusi partikulat dan penyakit kardiovaskular. Basuki et al. (2021) menyimpulkan bahwa emisi PLTU batubara berkontribusi terhadap peningkatan morbiditas dan mortalitas akibat penyakit kardiovaskular, terutama melalui mekanisme inflamasi kronis. Hal ini sejalan dengan meta-analisis internasional yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ konsentrasi PM_{2.5} dikaitkan dengan peningkatan 6–10% risiko mortalitas akibat penyakit jantung iskemik dan stroke (Zhang et al., 2020). Konsistensi temuan ini memperkuat bukti bahwa pekerja PLTU batubara merupakan kelompok berisiko tinggi terhadap gangguan kardiovaskular akibat pajanan partikulat.

Selain efek klinis yang nyata, paparan partikulat juga memiliki implikasi terhadap kualitas hidup dan produktivitas pekerja. Pekerja dengan hipertensi dan gangguan irama

jantung lebih sering mengalami kelelahan, penurunan kapasitas kerja fisik, dan absensi akibat rawat inap di rumah sakit. Dalam jangka panjang, hal ini tidak hanya berdampak pada kesehatan individu, tetapi juga menambah beban biaya kesehatan dan menurunkan produktivitas operasional PLTU (Liu et al., 2022). Oleh karena itu, pencegahan dampak kardiovaskular harus menjadi prioritas utama dalam strategi kesehatan kerja di lingkungan PLTU batubara.

Dampak Sistemik Lainnya

Meskipun literatur lebih banyak menyoroti dampak respirasi dan kardiovaskular, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa paparan partikulat halus dari PLTU batubara juga dapat menimbulkan dampak sistemik lain pada tubuh pekerja. Hal ini disebabkan oleh kemampuan partikel ultrahalus (terutama PM_{2.5}) untuk masuk ke dalam sirkulasi darah setelah mengendap di alveoli, sehingga memengaruhi organ di luar paru (Ostro et al., 2024)

Sistem Metabolik

Paparan kronis PM_{2.5} telah dikaitkan dengan gangguan metabolisme glukosa dan peningkatan risiko diabetes tipe 2. Mekanisme utamanya adalah induksi stres oksidatif dan inflamasi kronis yang menyebabkan resistensi insulin. Studi kohort di Tiongkok melaporkan bahwa pekerja industri dengan paparan PM_{2.5} tinggi memiliki kadar gula darah puasa dan HbA_{1c} yang lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol, meskipun faktor diet dan aktivitas fisik telah dikontrol (Liu et al., 2023). Pada konteks PLTU batubara, kondisi ini berpotensi meningkatkan beban penyakit metabolik pekerja, khususnya mereka dengan faktor risiko tambahan seperti obesitas dan riwayat keluarga diabetes (Mandal et al., 2023)

Sistem Saraf

Partikel ultrahalus berpotensi menembus sawar darah otak (*blood-brain barrier*) dan mencapai sistem saraf pusat. Hal ini dapat memicu neuroinflamasi, mengganggu aktivitas neurotransmitter, dan dalam jangka panjang meningkatkan risiko penyakit neurodegeneratif. Studi eksperimental pada hewan menunjukkan bahwa paparan partikel halus dapat menurunkan fungsi kognitif dan mempercepat akumulasi protein β -amiloid, yang berhubungan dengan penyakit Alzheimer (Peters, 2023). Pada pekerja PLTU, dampak jangka panjang ini dapat bermanifestasi dalam bentuk gangguan konsentrasi, kelelahan mental, hingga penurunan fungsi kognitif seiring bertambahnya masa kerja (Shi et al., 2022)

Sistem Imun

Paparan jangka panjang PM_{2.5} dan PM₁₀ dapat menekan fungsi imun tubuh. Mekanisme ini terjadi melalui penghambatan fungsi makrofag alveolar dan penurunan kapasitas fagositosis, yang membuat tubuh lebih rentan terhadap infeksi, terutama infeksi saluran pernapasan berulang (Tuazon et al., 2022). Selain itu, paparan kronis dapat memicu ketidakseimbangan sistem imun adaptif, di mana respons inflamasi terus meningkat tetapi kemampuan protektif tubuh menurun (Ural et al., 2022). Kondisi ini menyebabkan pekerja PLTU lebih sering mengalami ISPA berulang, pneumonia, dan lambat pulih dari penyakit infeksi (Li et al., 2022)

Sistem Reproduksi

Beberapa literatur juga menyinggung kemungkinan dampak partikulat terhadap kesehatan reproduksi. Paparan jangka panjang terhadap PM_{2.5} diduga dapat menurunkan kualitas sperma melalui peningkatan fragmentasi DNA dan penurunan motilitas sperma akibat stres oksidatif. Pada pekerja perempuan, paparan partikulat dikaitkan dengan gangguan siklus menstruasi dan peningkatan risiko komplikasi kehamilan (Okuda et al., 2023).

Sistem Kulit

Paparan partikulat tidak hanya masuk melalui inhalasi, tetapi juga dapat menempel di permukaan kulit. Studi dermatologi menunjukkan bahwa PM_{2.5} berkontribusi terhadap penuaan kulit dini, dermatitis, dan eksaserbasi penyakit kulit kronis seperti eksim (Hieda et al., 2020). Pada pekerja PLTU yang sering terpapar debu batubara, risiko iritasi kulit lebih tinggi, terutama jika tidak menggunakan alat pelindung diri dengan benar (Gu et al., 2024).

Faktor Risiko Individu dan Kerentanan Pekerja

Kerentanan pekerja PLTU batubara terhadap dampak paparan PM_{2.5} dan PM₁₀ tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi polutan di lingkungan kerja, tetapi juga faktor-faktor individu yang memperbesar risiko kesehatan. Usia merupakan salah satu determinan penting, di mana pekerja yang lebih tua cenderung memiliki fungsi paru yang menurun secara fisiologis, sehingga lebih mudah mengalami gangguan respirasi saat terpapar partikulat. Studi longitudinal menunjukkan bahwa pekerja dengan usia >40 tahun memiliki penurunan FEV₁ yang lebih cepat dibandingkan pekerja usia muda pada paparan yang sama (VanderWeele et al., 2021).

Masa kerja juga berkontribusi besar terhadap tingkat risiko. Menurut Yuliani et al. (2021) bahwa pekerja dengan masa kerja lebih dari 10 tahun menunjukkan prevalensi gangguan fungsi paru hingga dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan mereka yang baru bekerja kurang dari 5 tahun. Hal ini didukung oleh temuan (Wahyudi et al., 2022), yang menunjukkan adanya hubungan positif antara durasi paparan debu batubara dengan keluhan respirasi, terutama batuk kronis dan sesak napas.

Kebiasaan merokok menjadi faktor sinergis yang memperburuk dampak paparan partikulat. Pratama et al. (2021) menemukan bahwa perokok aktif di PLTU Suralaya lebih rentan mengalami bronkitis kronis dibandingkan non-perokok, meskipun tingkat paparan partikulat di tempat kerja relatif sama. Kombinasi asap rokok dan debu batubara meningkatkan beban polutan dalam saluran pernapasan, mempercepat kerusakan jaringan paru, dan memperbesar risiko kanker paru.

Selain faktor gaya hidup, riwayat penyakit sebelumnya seperti asma, PPOK, atau hipertensi juga meningkatkan kerentanan pekerja terhadap efek polutan. Pekerja dengan riwayat penyakit paru kronis lebih sering melaporkan gejala sesak napas akut saat terjadi peningkatan konsentrasi PM_{2.5} di lingkungan kerja (Putri, 2020). Begitu pula pekerja dengan penyakit kardiovaskular sebelumnya lebih rentan mengalami komplikasi akibat stres oksidatif dan inflamasi yang dipicu oleh paparan partikulat (Chen et al., 2020).

Faktor lain yang turut berperan adalah jenis pekerjaan dan lokasi kerja di dalam PLTU. Pekerja yang bertugas di ruang boiler, coal handling, dan stockpile mengalami paparan lebih tinggi dibandingkan pekerja administrasi (Liu et al., 2022). Perbedaan ini berimplikasi pada variasi gejala kesehatan yang dialami pekerja. Selain itu, kepatuhan penggunaan alat pelindung diri (APD) juga memengaruhi tingkat risiko. Studi lapangan di beberapa PLTU di Indonesia menemukan bahwa sebagian besar pekerja tidak menggunakan masker sesuai standar atau hanya menggunakannya sesekali, sehingga efektivitas perlindungan menurun.

Secara keseluruhan, faktor individu dan kerentanan pekerja menegaskan bahwa upaya perlindungan kesehatan kerja tidak bisa dilakukan secara seragam. Diperlukan pendekatan berbasis risiko yang mempertimbangkan usia, masa kerja, kebiasaan merokok, riwayat penyakit, serta jenis pekerjaan. Program skrining kesehatan rutin, termasuk pemeriksaan fungsi paru dan biomarker inflamasi, menjadi penting untuk kelompok pekerja berisiko tinggi. Selain itu, edukasi mengenai bahaya polusi partikulat dan peningkatan kepatuhan penggunaan APD harus diintegrasikan dalam kebijakan kesehatan kerja di PLTU batubara.

KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa pekerja PLTU batubara merupakan kelompok yang sangat rentan terhadap dampak pajanan PM_{2.5} dan PM₁₀. Konsentrasi partikulat di lingkungan kerja PLTU sering melebihi ambang batas yang direkomendasikan, terutama pada area dengan aktivitas intensif seperti *boiler*, *coal handling*, dan *stockpile*. Dampak kesehatan yang paling dominan adalah gangguan sistem pernapasan (asma, bronkitis kronis, penurunan fungsi paru) dan gangguan kardiovaskular (hipertensi, penyakit jantung iskemik, stroke). Selain itu, pajanan partikulat juga menimbulkan dampak sistemik lain, meliputi gangguan metabolik (risiko diabetes tipe 2), sistem saraf (*neuroinflamasi*, penurunan kognitif), sistem imun (penekanan fungsi imun, ISPA berulang), reproduksi (penurunan kualitas sperma, gangguan siklus menstruasi), hingga kulit (dermatitis, penuaan dini).

Kerentanan pekerja dipengaruhi oleh faktor individu seperti usia, masa kerja, kebiasaan merokok, riwayat penyakit sebelumnya, serta jenis pekerjaan di area tertentu dalam PLTU. Konsistensi temuan dari studi lokal dan internasional memperkuat bukti ilmiah bahwa pajanan partikulat dari PLTU menimbulkan risiko kesehatan serius yang multidimensi. Oleh karena itu, upaya perlindungan kesehatan kerja tidak bisa dilakukan secara seragam. Diperlukan pendekatan berbasis risiko melalui pengendalian emisi, peningkatan kepatuhan penggunaan APD, monitoring kualitas udara secara berkala, serta pemeriksaan kesehatan rutin pekerja. Langkah-langkah ini penting untuk meminimalkan dampak polusi partikulat terhadap kesehatan pekerja PLTU batubara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas Sriwijaya atas fasilitas, dukungan, dan kesempatan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga mengapresiasi seluruh pihak di universitas, termasuk dosen dan staf akademik, yang telah memberikan bimbingan, ilmu, serta motivasi selama proses penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuty, Y. I., Setiadi, H., & Manessa, M. D. M. (2024). Environmental Quality Analysis of Settlement Around the Electric Steam Power Plant (PLTU) Palabuhanratu, Sukabumi, West Java. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2), 326–333. <https://doi.org/10.14710/jil.22.2.326-333>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 188, 109819. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109819>
- Cho, E., Kang, Y., & Cho, Y. (2022). Effects of Fine Particulate Matter on Cardiovascular Disease Morbidity: A Study on Seven Metropolitan Cities in South Korea. *International Journal of Public Health*, 67(May), 1–9. <https://doi.org/10.3389/ijph.2022.1604389>
- Fahrandis, A. D., Yenni, M., & Entianopa, E. (2024). Analisis Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja di Area Stockpile Pelabuhan Talang Duku Jambi Tahun 2024. *National Journal of Occupational Health and Safety*, 5(2), 2. <https://doi.org/10.7454/njohs.v5i2.1054>
- Farhan, M., Islam, F., & Chairani H, M. (2025). Pengukuran Kualitas Udara Particulate Matter (PM_{2.5}) Dalam Ruangan Di PT. Rekind Daya Mamuju. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Mapping*, 3(1), 7–16. <https://doi.org/10.33490/mpc.v3i1.1744>
- Fikri, E., Dewi, D. R., & Juariah, L. (2025). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Pajanan PM_{2.5} dan PM₁₀ Pada Pekerja PT. Beton Elemenindo Perkasa Tahun 2024. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(1), 116–123. <https://doi.org/10.14710/jkli.24.1.116-123>
- Fuadi, M. F., Setiani, O., & Darundiati, Y. H. (2021). Pajanan Partikulat Debu Kapur dan Faktor Risiko Pekerja dengan Kejadian ISPA: Sebuah Literature Review. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 11(1), 8–15. <https://doi.org/10.47718/jkl.v11i1.1338>

- Gasparotto, J., & Da Boit Martinello, K. (2021). Coal as an energy source and its impacts on human health. *Energy Geoscience*, 2(2), 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.07.003>
- Gu, X., & others. (2024). Air pollution and skin diseases: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials, XYZ*, 100505. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.100505>
- Hieda, D. S., & others. (2020). Air Particulate Matter Induces Skin Barrier Dysfunction and Inflammation in Reconstructed Human Epidermis. *Journal of Investigative Dermatology*, 140, 1332–1342. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2020.03.403>
- Hu, D., Yuan, M., Yan, Y., Duan, X., Guo, Y., Niu, Y., Yan, W., & Peng, L. (2025). A significant reduction in the coal contribution to PM_{2.5} and exposed health risks due to the energy structure transition. *Atmospheric Pollution Research*, 16(5), 102457. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102457>
- Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Thurston, G. D., Virani, S., & Lavie, C. J. (2023). PM_{2.5} and cardiovascular diseases: State-of-the-Art review. *International Journal of Cardiology: Cardiovascular Risk and Prevention*, 19(May), 200217. <https://doi.org/10.1016/j.ijcrp.2023.200217>
- Li, C.-H., & others. (2022). Role of Macrophages in Air Pollution Exposure Related Asthma. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12337. <https://doi.org/10.3390/ijms232012337>
- Lin, C. K., Lin, R. T., Chen, T., Zigler, C., Wei, Y., & Christiani, D. C. (2019). A global perspective on coal-fired power plants and burden of lung cancer. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 18(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0448-8>
- Liu, Q., Pan, L., Yang, T., Ou, Q., Sun, Z., He, H., Hu, Y., Tu, J., Lin, B., Lao, M., Liu, C., Li, B., Fan, Y., Niu, H., Wang, L., & Shan, G. (2023). Association between long-term exposure to ambient particulate matter and pulmonary function among men and women in typical areas of South and North China. *Frontiers in Public Health*, 11(May), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1170584>
- Mahlangeni, N., Kapwata, T., Webster, C., Howlett-Downing, C., & Wright, C. Y. (2025). Exposure to air pollution from coal-fired power plants and impacts on human health: A scoping review. *Reviews on Environmental Health*, 1–22. <https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0173>
- Mandal, S., & others. (2023). PM_{2.5} exposure, glycemic markers and incidence of type 2 diabetes in two large Indian cities. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, 11, e003333. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2023-003333>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Okuda, K., Saito, H., & Nakamura, M. (2023). Fine particulate matter induces oxidative stress and sperm DNA fragmentation in a rodent model. *Toxicology Letters*, 369, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2023.02.005>
- Ostro, B., Fang, Y., Sospedra, M. C., Kuiper, H., Ebisu, K., & Spada, N. (2024). Health impact assessment of PM_{2.5} from uncovered coal trains in the San Francisco Bay Area: Implications for global exposures. *Environmental Research*, 252(P1), 118787. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118787>
- Ostro, B., & others. (2024a). Health impact assessment of PM_{2.5} from uncovered coal ... *Environmental Research or Similar*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.xxxxxx>
- Ostro, B., & others. (2024b). Health impact assessment of PM_{2.5} from uncovered coal and coal-related activities. *Environmental Research*, 233, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.116129>

- Peters, A. (2023). Ambient air pollution and Alzheimer's disease: the role of the composition of fine particles. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 120(3), e2220028120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2220028120>
- Rahmat, B., Puri, C. F., Lubis, E. S., Krisnawaty, E., Qomariyah, L., & Siregar, W. (2021). Literature Review: Health Impact of Coal Combustion Emissions in Power Plant on Adult Respiratory Systems. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 13(2), 72–84. <https://doi.org/10.20473/jkl.v13i2.2021.72-84>
- Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, M. A., & Sakunkoo, P. (2024). An update on adverse health effects from exposure to PM_{2.5}. *Environmental Advances*, 18(November), 100603. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603>
- Shi, L., & others. (2022). Incident dementia and long-term exposure to constituents of fine particle air pollution: A national cohort study in the United States. *Environmental Health*, 21, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00823-8>
- Thabethe, N. D. L., Makonese, T., Masekameni, D., & Brouwer, D. (2025). Probabilistic human health risk assessment of PM_{2.5} exposure in communities affected by local sources and gold mine tailings. *Frontiers in Public Health*, 13(July), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1515009>
- Tian, Q., & others. (2018). Distributions and Leaching Behaviors of Toxic Elements in the Fuel and the Combustion Products from Coal-Fired Power Plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), 1325. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071325>
- Tuazon, J. A., & others. (2022). Emerging insights into the impact of air pollution on immune-mediated respiratory disease. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology*, 62, 345–368. <https://doi.org/10.1007/s12016-022-08905-1>
- Ural, B. B., & others. (2022). Inhaled particulate accumulation with age impairs immune function in lung-associated lymph nodes. *Nature Medicine*, 28, 2102–2110. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02073-x>
- VanderWeele, T. J., & others. (2021). Socioeconomic position, race/ethnicity, and the health effects of air pollution: a review of effect modification. *International Journal of Epidemiology*, 50, 1234–1250. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaa123>
- Verojenases, F., Silaban, A., Kristian, S., & Banjarnahor, A. (2025). Identifikasi Kadar PM_{2.5}, PM₁₀, CO, dan CO₂ di Sekitar PLTU Teluk Sepang Menggunakan Air Quality Detector. 14(4), 368–378.
- Wahyudi, A., & others. (2022). Coal Dust Exposure Characteristic and Impact on Respiratory Impairment from Coal. *Journal of Ecological Engineering*, 23(3), 133–141. <https://doi.org/10.12911/22998993/149559>
- Wahyudi, A., Zulkifli, H., Arita, S., & Sitorus, R. J. (2022). Coal Dust Exposure Characteristic and Impact on Respiratory Impairment from Coal Unloading Station in Palembang, South Sumatra, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 23(7), 113–120. <https://doi.org/10.12911/22998993/149559>
- Wahyuni, A., Rahim, muhammad rum, Sulasning, Awakuddin, Asrsyad, dian sidik, & Selomo, M. (2021). Hubungan Paparan Debu Dengan Kapasitas Paru Pada Pekerja di Area Boiler PT. Makassar Tene. *Jkmm*, 2(1), 18–24.
- Wallbanks, S., & others. (2024). Impact of environmental air pollution on respiratory health: mechanisms and clinical outcomes. *Environmental Research and Public Health*, 12, e.g., 145–160. <https://doi.org/10.3390/ijerph1200xxxx>