

## Tinjauan Literatur: Dampak Kesehatan Akibat Paparan Fly Ash dari Pembakaran Batu Bara pada Pekerja Industri

Rina Widya Astuti<sup>1\*</sup>, Izzatul Alifah Sifai<sup>2</sup>

1 PT. Bhumi Jepara Service, Jepara Jawa Tengah

PT. Bhumi Jepara Service

2 Program Studi S1 Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan, Universitas Dian Nuswantoro Semarang, Indonesia

Jl. Nakula I No. 5-11 Semarang 024 3517261

\*Corresponding Author: [rina.astuti@pt-bjs.co.id](mailto:rina.astuti@pt-bjs.co.id)

### ABSTRACT

#### INFORMASI ARTIKEL

##### Article history

Dikirim : 20 April 2025

Diterima : 25 April 2025

##### Kata Kunci

Kata Kunci 1; Industry workers

Kata Kunci 2; Health Risk

Kata Kunci 3: Coal fly ash exposure

Over the past three decades, global coal consumption has increased significantly. Indonesia has become one of the largest consumers in the ASEAN region. One of the primary by-products of coal combustion is fly ash, a fine particulate material that contains various heavy metals such as lead, arsenic, chromium, and cadmium. Although the concentrations are relatively low, long-term exposure to fly ash poses serious health risks. This study aims to examine the health impacts of fly ash exposure on industrial workers, particularly those working in coal-fired industry. The method used is a narrative literature review by analyzing articles from databases such as Google Scholar, PubMed, and ScienceDirect, published between 2015 and 2025. The results show that fly ash exposure can lead to various health issues, including contact dermatitis, elevated blood lead levels, DNA damage, hemolysis, and apoptosis of bronchial cells. The severity of these impacts is influenced by particle size, chemical composition, duration of exposure, and the use of personal protective equipment (PPE). Therefore, further research and stricter occupational safety policies are needed to protect the health of industrial workers.

### INTISARI

Dalam tiga dekade terakhir, konsumsi batu bara secara global meningkat secara signifikan. Indonesia menjadi salah satu konsumen terbesar di kawasan ASEAN. Salah satu limbah utama dari pembakaran batu bara adalah *fly ash*, yaitu partikel halus yang mengandung berbagai logam berat seperti timbal, arsenik, kromium, dan kadmium. Meskipun konsentrasi relatif rendah, paparan *fly ash* dalam jangka panjang menimbulkan risiko kesehatan yang serius. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak kesehatan akibat paparan *fly ash* pada pekerja industri, khususnya di industri pembakaran batu bara. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur naratif dengan menganalisis artikel dari basis data Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025. Hasil menunjukkan bahwa paparan *fly ash* dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, termasuk dermatitis kontak, peningkatan kadar timbal dalam darah, kerusakan DNA, hemolisis, dan apoptosis sel bronkial. Tingkat keparahan dampak tersebut dipengaruhi oleh ukuran partikel, komposisi kimia, durasi paparan, dan penggunaan alat pelindung diri (APD). Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dan kebijakan keselamatan kerja yang lebih ketat untuk melindungi kesehatan pekerja industri.

## Pendahuluan

Berdasarkan laporan *International Energy Agency (IEA)* pada tahun 2024, dalam tiga dekade terakhir terjadi peningkatan konsumsi batu bara dalam skala global hingga dua kali lipat. Indonesia merupakan salah satu negara dengan konsumsi batu bara tertinggi di kawasan ASEAN, dengan sebagian besar digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik [1]. Salah satu limbah yang dihasilkan dalam proses pembakaran batu bara adalah *fly ash*, yang memiliki ukuran sangat ringan dan berpotensi tesebar melalui udara [2]. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 14 Tahun 2021 *fly ash* telah dihapus dari daftar limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), yang sebelumnya tercantum dalam Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 [3].

Komposisi kimia dalam *fly ash* bervariasi, tergantung pada jenis batu bara yang dibakar juga teknik penanganan dan penyimpanannya. Namun, secara umum komponen kimia utama adalah silikon, aluminium, besi, oksigen dan kalsium [2]. Selain komponen utama tersebut, logam berat juga sering ditemukan di dalam *fly ash*, diantaranya adalah arsenik, timbal, kromium dan kadmium. Meskipun konsentrasi logam berat ini relatif rendah—hanya sebesar beberapa bagian per juta hingga per miliar bagian—paparan jangka panjang terhadap unsur-unsur ini telah menjadi perhatian serius di berbagai negara [4]. Berdasarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No. 5 Tahun 2018, nilai ambang batas (NAB) paparan debu respirabel di lingkungan kerja adalah sebesar 3 mg/m<sup>3</sup> untuk rata-rata paparan selama 8 jam kerja harian [5].

Partikel halus pada *fly ash* bersifat toksik bagi sel paru-paru manusia, yang dapat menyebabkan kerusakan sel, meningkatkan radikal bebas yang merusak tubuh dan bahkan memengaruhi DNA, yang bisa berisiko menyebabkan kanker. Partikel *fly ash* dapat masuk ke dalam bagian terdalam paru-paru dan berpotensi menjadi salah satu faktor risiko terjadinya kanker paru-paru dalam jangka Panjang [6]. Studi terhadap pekerja bagian boiler di salah satu industri kimia di Indonesia menunjukkan bahwa paparan jangka pendek *fly ash* juga dapat menyebabkan dermatitis kontak [7]. Selain itu, studi *in vivo* dan *in vitro* yang pernah dilakukan oleh Demasceno, *et al.* menunjukkan bahwa partikel *fly ash* mengandung kadar arsenic yang tinggi dan bersifat toksik terhadap organisme akuatik [8]. Pekerja pada industri yang melibatkan proses pembakaran batu bara merupakan kelompok dengan risiko paparan *fly ash* tertinggi dalam jangka Panjang [6].

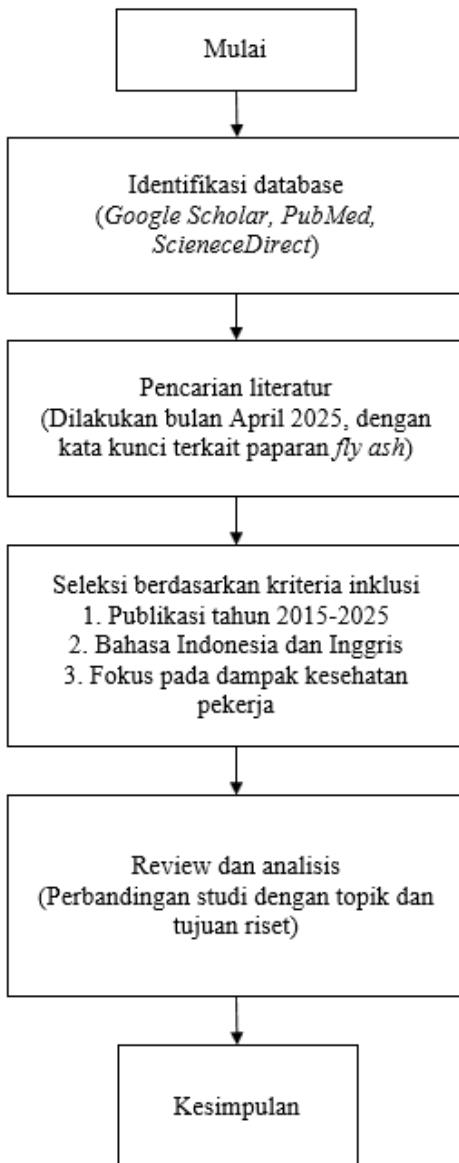
Meskipun telah ada berbagai studi terkait *fly ash* di Indonesia, namun studi-studi tersebut lebih fokus pada pemanfaatan *fly ash* untuk kegiatan konstruksi atau produksi beton. Studi-

studi ini menunjukkan bahwa fly ash dapat digunakan sebagai material untuk pembuatan batako, bahkan genteng, sebagai alternatif material yang lebih ramah lingkungan [9]. Di sisi lain, studi terkait dampak paparan *fly ash* terhadap kesehatan di kalangan pekerja industri masih sangat terbatas, terutama dalam konteks Indonesia. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi “Bagaimana dampak kesehatan akibat paparan fly ash dari pembakaran batu bara pada pekerja industri?” Penelitian ini bertujuan untuk menggali lebih dalam dampak paparan *fly ash* dari pembakaran batu bara terhadap kesehatan pekerja industri.

## Metode

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah *literature review* naratif, yaitu proses pengumpulan dan perbandingan hasil-hasil dari penelitian sebelumnya yang sesuai dengan topik dan tujuan studi [10]. Metode ini dipilih disesuaikan dengan tujuan penelitian ini yang ingin mengetahui dampak paparan *fly ash* dari pembakaran batu bara terhadap kesehatan pekerja industri secara general, sehingga diperlukan penjelasan dari beberapa ahli dan penelitian.

Tiga basis utama digunakan dalam proses peninjauan artikel ini, yaitu *Google Scholar*, *PubMed* dan *ScienceDirect*. Pencarian literatur dilaksanakan pada bulan April 2025. Kriteria inklusi meliputi artikel yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025, baik berbahasa Indonesia maupun bahasa Inggris dan membahas terkait dampak paparan *fly ash* dari pembakaran batu bara terhadap kesehatan manusia, terutama pekerja industri. Kata kunci yang digunakan diantaranya adalah “kajian *fly ash*”, “*fly ash characteristic*”, “*fly ash and human health*”, dan “dampak *fly ash* pada pekerja”. Penelitian ini menggunakan 4 jurnal yang relevan dengan topik dampak paparan *fly ash* terhadap kesehatan pekerja. Jurnal-jurnal tersebut mencakup publikasi nasional juga internasional yang diperoleh dari ketiga basis data tersebut. Berikut merupakan diagram alir yang digunakan dalam proses *literature review* studi ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## Hasil dan Pembahasan

Dalam bagian ini akan disajikan hasil dari proses tinjauan literatur mengenai dampak kesehatan akibat paparan *fly ash* pada pekerja industry. Hasil yang disajikan merupakan ringkasan dari empat jurnal yang telah ditentukan berdasarkan kriteria inklusi, meliputi publikasi internasional dan nasional yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025. Untuk memudahkan pemahaman, hasil analisa dari jurnal tersebut akan dijabarkan dalam bentuk tabel, kemudian dilanjutkan dengan uraian yang mengaitkan temuan-temuan tersebut dengan konteks dan teori yang relevan dalam bagian pembahasan [11].

## Hasil

**Table 1.** Matriks Resume Hasil Penelitian

Penulis	Judul Penelitian	Tahun	Jenis Studi	Objek Penelitian	Hasil Penelitian
Anapis Putri A.	Pengaruh Abu Terbang Batu Bara terhadap Timbulnya Gejala Dermatitis Kontak pada Karyawan Bagian Boiler di PT. Indo Acidatama Tbk, Kemiri, Kebakkramat, Karanganyar	2015	Studi cross-sectional	Pekerja pada bagian boiler dan workshop mekanik	<p>Terdapat pengaruh antara paparan abu terbang (<i>fly ash</i>) terhadap kejadian dermatitis kontak. Lebih lanjut, hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar paparan <i>fly ash</i> di area boiler berada diatas NAB yang telah ditentukan pada Permenakertrans No. 13 tahun 2011. Faktor risiko lain yang meningkatkan risiko timbulnya gejala dermatitis kontak adalah kepatuhan penggunaan alat pelindung diri (APD), riwayat penyakit kulit dan perilaku kebersihan dari karyawan [7].</p>
Izzawati	Hubungan Kadar Timbal Darah dengan Kadar Hemoglobin Karyawan Pembangkit Listrik Tenaga Uap	2024	Studi cross-sectional	Karyawan pada pembangkit listrik	<p>Penelitian ini menjelaskan bahwa kandungan timbal pada <i>fly ash</i> berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan pada pekerja di PLTU. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar timbal dalam darah pada 90% responded melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh <i>Center for Disease Control and Prevention</i> (CDC). Namun, hasil analisa lebih lanjut menunjukkan bahwa tidak ada hubungan antara kadar timbal dalam darah dengan kadar hemoglobin pada karyawan di PLTU tersebut [12].</p>

Penulis	Judul Penelitian	Tahun	Jenis Studi	Objek Penelitian	Hasil Penelitian
Matthew J. Lawson, et al.	<i>Iron-Rich Magnetic Coal Fly Ash Particles Induce Apoptosis in Human Bronchial Cells</i>	2020	Studi in vitro	<i>Coal fly ash</i> dan sel bronkial manusia	Penelitian yang dilakukan di daerah Svalbard menunjukkan bahwa <i>coal fly ash</i> yang berasal dari proses pembangkit listrik batu bara lokal memiliki kadar zat besi magnetic yang tinggi. Hasil uji coba pada model sel paru manusia membuktikan bahwa kadar zat besi magnetik tersebut dapat menghasilkan radikal bebas yang berpotensi menyebabkan kerusakan DNA, hemolisis dan apoptosis. Studi ini menyimpulkan bahwa paparan <i>coal fly ash</i> dapat memberikan dampak buruk pada pekerja dan juga Masyarakat disekitar [13].
Elvira Rozina, et al.	<i>Comparative Toxicity of Fly Ash: An In Vitro Study</i>	2021	Studi in vitro	<i>Coal fly ash</i> dan sel HeLa (sel kanker serviks) dan sel Jurkat (sel limfosit T manusia)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa fly ash dapat mengurangi jumlah sel yang hidup, terutama pada paparan dengan konsentrasi yang lebih tinggi. Ukuran partikel yang lebih kecil cenderung menimbulkan dampak yang lebih besar, termasuk kerusakan DNA dan perubahan bentuk inti sel. Tingkat bahaya fly ash dipengaruhi oleh ukuran partikel serta kandungan zat kimia di dalamnya [14].

Berdasarkan Tabel 1, hasil penelitian secara umum menunjukkan bahwa paparan *fly ash* berdampak negatif terhadap kesehatan pekerja. Dampak tersebut mencakup berbagai aspek, mulai dari keluhan ringan seperti gejala dermatitis kontak, hingga kondisi yang lebih serius seperti peningkatan kadar timbal dalam darah, kerusakan DNA, hemolisis, dan apoptosis sel epitel bronkial. Temuan ini berasal dari beragam pendekatan studi, baik *cross-sectional* dan *in vitro*, yang secara keseluruhan menguatkan kesimpulan bahwa *fly ash* berpotensi membahayakan kesehatan pekerja secara sistemik.

## Pembahasan

Paparan *fly ash* pada manusia dapat terjadi melalui jalur dermal, inhalasi, dan ingesti. Paparan secara dermal terjadi ketika kulit bersentuhan langsung dengan *fly ash*, memungkinkan partikel masuk melalui permukaan kulit, terutama jika terjadi luka atau iritasi. Jalur inhalasi terjadi karena ukuran partikel *fly ash* tergolong debu respirabel, yang mudah terbawa angin dan tersebar ke udara, sehingga dapat terhirup dan masuk ke sistem pernapasan. Sementara itu, jalur ingesti dapat terjadi apabila *fly ash* mencemari sumber air atau tanah, kemudian masuk ke dalam tubuh melalui konsumsi air atau makanan yang telah terkontaminasi [4][7][12].

Merujuk pada studi Anapis Putri A. (2015), salah satu dampak paparan *fly ash* yang teridentifikasi adalah gangguan kulit pada pekerja. Penelitian tersebut menunjukkan adanya hubungan signifikan antara paparan *fly ash* dengan timbulnya gejala dermatitis kontak, yang diperparah oleh tingginya tingkat paparan di area kerja. Selain itu, faktor risiko seperti kepatuhan penggunaan alat pelindung diri (APD), riwayat penyakit kulit, dan perilaku higiene pekerja turut berkontribusi terhadap peningkatan kejadian dermatitis [7]. Temuan ini sejalan dengan studi Mika J. (2017) yang melaporkan bahwa paparan *fly ash* dari pembangkit biomassa dapat menyebabkan kulit kering, rasa tidak nyaman, hingga iritasi atau dermatitis pada individu yang sensitif. Paparan *fly ash* basah bahkan berpotensi menyebabkan luka bakar akibat sifatnya yang korosif [15]. Iritasi kulit akibat paparan *fly ash* diduga berkaitan dengan kandungan mineral seperti besi (Fe), kalsium (Ca), dan silika (Si) di dalamnya. Kulit manusia tidak memiliki mekanisme ekskresi yang efektif terhadap mineral tersebut, sehingga akumulasi jangka panjang dapat memicu reaksi iritatif [7].

Sementara itu, penelitian oleh Izzawati (2024) menunjukkan bahwa *fly ash* berpotensi meningkatkan kadar timbal dalam darah pekerja PLTU. Meskipun tidak ditemukan hubungan yang signifikan antara kadar timbal dan kadar hemoglobin, sebanyak 90% responden tercatat memiliki kadar timbal dalam darah melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC). Kandungan timbal dalam *fly ash* umumnya berasal dari proses geologis selama pembentukan batu bara. Risiko paparan timbal melalui inhalasi cukup tinggi, mengingat ukuran partikel *fly ash* yang kecil dan ringan sehingga mudah terhirup [12]. Paparan timbal kronis, sebagaimana dijelaskan CDC, dapat berdampak pada sistem saraf tepi, menurunkan jumlah sperma, serta meningkatkan risiko hipertensi [16]. Penelitian oleh Izzawati *et al.* juga menyebutkan bahwa durasi paparan dan kepatuhan penggunaan alat

pelindung diri (APD) menjadi faktor risiko penting dalam peningkatan kadar timbal dalam darah. Semakin lama seorang pekerja terpapar *fly ash*, maka semakin besar kemungkinan akumulasi timbal dalam tubuhnya. Penggunaan APD yang sesuai, seperti masker dengan filter HEPA, kacamata pelindung, dan sarung tangan berbahan karet, dinilai efektif dalam meminimalkan risiko paparan timbal melalui jalur inhalasi dan kontak langsung [12].

Lebih jauh, studi *in vitro* oleh Lawson *et al.* (2020) menunjukkan bahwa *coal fly ash* dari pembangkit listrik di Svalbard yang mengandung kadar zat besi magnetik tinggi.. Zat besi magnetik dalam *fly ash* dapat menghasilkan reaksi oksidatif yang menghasilkan ROS (*Reactive Oxygen Species*), yang menyerang membran sel, hemoglobin, dan materi genetik sel. Hasil uji pada sel epitel bronkial manusia menunjukkan terjadinya kerusakan DNA, hemolisis, dan apoptosis [13]. Hasil serupa ditemukan dalam studi oleh Elvira Rozina *et al.* (2021), yang mengonfirmasi bahwa paparan *fly ash* secara *in vitro* berkontribusi terhadap kerusakan DNA. Ukuran partikel yang lebih kecil terbukti cenderung menimbulkan dampak yang lebih besar, termasuk perubahan bentuk inti sel, sementara kandungan kimia dalam *fly ash* juga berperan signifikan terhadap tingkat toksitas [14]. Dukungan lebih lanjut diperoleh dari studi *in vivo* oleh Grethel L. *et al.* (2017), yang membuktikan bahwa tikus yang terpapar partikel batubara dan *fly ash* mengalami gangguan pada sistem pernapasan [17]. Secara keseluruhan, kerusakan DNA dan sel akibat *fly ash* terjadi karena kombinasi kandungan kimia yang berbahaya seperti logam berat, zat besi reaktif dan ukuran partikelnya yang sangat kecil, sehingga memungkinkan partikel masuk ke dalam tubuh, menghasilkan radikal bebas, dan merusak struktur sel dari dalam [13] [14] [17].

Secara umum, uraian dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa *fly ash* dapat menimbulkan beragam dampak terhadap kesehatan pekerja. Tingkat keparahan dampak tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor risiko utama, antara lain ukuran partikel, konsentrasi kandungan zat kimia berbahaya di dalam *fly ash*, durasi paparan, penggunaan APD, serta efektivitas pengendalian lingkungan kerja.

Beberapa penelitian di Indonesia, seperti oleh Anapis (2015) dan Izzawati (2024), sudah mulai membahas dampak *fly ash* terhadap kesehatan pekerja. Namun, jumlahnya masih sangat terbatas. Penelitian yang membahas dampak jangka panjang atau efek yang lebih luas terhadap tubuh pekerja masih jarang ditemukan. Karena itu, penting bagi industri, terutama pembangkit listrik berbasis batu bara untuk lebih serius dalam mencegah risiko paparan *fly ash*. Upaya ini bisa dilakukan dengan menyediakan ventilasi yang baik, memastikan pekerja

menggunakan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, serta melakukan pemeriksaan kesehatan secara rutin. Langkah-langkah ini penting untuk melindungi kesehatan pekerja dan menjaga keselamatan kerja di lingkungan industri.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, dapat disimpulkan bahwa paparan *fly ash* dari pembakaran batu bara berpotensi menimbulkan berbagai dampak kesehatan pada pekerja industri. Dampak yang ditemukan meliputi gangguan kulit seperti dermatitis kontak, peningkatan kadar logam berat dalam darah, hingga kerusakan DNA, hemolisis, dan apoptosis sel. Jenis studi yang dianalisis mencakup observasi langsung pada pekerja serta eksperimen in vitro yang menunjukkan mekanisme biologis dari paparan *fly ash*.

Faktor-faktor yang dapat meningkatkan tingkat keparahan dampak paparan antara lain ukuran partikel, konsentrasi zat kimia berbahaya dalam *fly ash*, durasi paparan, penggunaan APD, serta efektivitas pengendalian di lingkungan kerja. Di Indonesia, kajian mengenai dampak kesehatan *fly ash* masih terbatas dan cenderung berfokus pada aspek lingkungan atau pemanfaatannya dalam sektor konstruksi.

Keterbatasan literatur yang secara spesifik membahas dampak paparan *fly ash* terhadap kesehatan pekerja industri menunjukkan adanya kesenjangan pengetahuan yang signifikan. Dalam konteks tersebut, studi ini menjadi sangat relevan dan memiliki kontribusi ilmiah yang penting karena menghadirkan perspektif baru terkait risiko kesehatan kerja akibat paparan *fly ash*, khususnya di lingkungan industri.

Namun demikian, untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dan mendalam, diperlukan studi lanjutan yang bersifat multidisipliner dan berkelanjutan. Hal ini penting guna mendukung pengembangan strategi pengendalian yang lebih efektif serta memperkuat upaya perlindungan keselamatan dan kesehatan para pekerja.

## Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency (IEA), 2024. *Coal 2024: Analysis and forecast to 2027*. [online] Paris: IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/coal-2024> [Accessed 22 Apr. 2025].
- [2] Chen, Y., Fan, Y., Huang, Y., Liao, X., Xu, W., and Zhang, T., 2024. A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115905>.
- [3] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021. *Keputusan Menteri LHK Nomor 14 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Termal*. Jakarta: KLHK.

- [4] Zierold, K.M. and Odoh, C., 2020. A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence. *Reviews on Environmental Health*, 35(4), pp.401–418. <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0039>.
- [5] Kementerian Ketenagakerjaan, 2018. *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Lingkungan Kerja*. Jakarta: Kementerian Ketenagakerjaan RI.
- [6] Whiteside, M. and Herndon, J.M., 2018. Coal fly ash aerosol: risk factor for lung cancer. *Journal of Advances in Medicine and Medical Research*, 25(4), pp.1–10. <https://doi.org/10.9734/JAMMR/2018/39758>.
- [7] Apriyantri, A.P., 2015. *Pengaruh abu terbang batubara terhadap timbulnya gejala dermatitis kontak pada karyawan bagian boiler di PT. Indo Acidatama Tbk, Kemiri, Kebakkramat, Karanganyar* (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.
- [8] Damasceno, K.C., Cavalcante, A.K., Maziero, J.S., Martini, G.A., Ormênia, M.B., Mamede, F.C., Miranda, C.S., Campello, F.A., Izidoro, J.C., Rogero, S.O., Fungaro, D.A., Lopes-Ferreira, M. and Rogero, J.R., 2018. In vitro and in vivo toxicity of coal fly ash leachate. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 13(1), pp.73–78. <https://doi.org/10.5132/eec.2018.01.08>.
- [9] Ayuningtyas, U., Susila, I.M.A.D., Sihombing, A.L.S.M., Sasongko, N.A., Anggraeni, P., Nugroho, T.P.A. and Darmayanti, N.T.E., 2022. Pemanfaatan fly ash dan bottom ash sebagai material konstruksi ramah lingkungan dalam rangka mendukung kriteria bangunan hijau. *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat 2022*, Pangkalpinang, 11–12 Oktober 2022. Fakultas Teknik, Universitas Bangka Belitung.
- [10] Nurcahyani, H., 2023. Penelitian strategi pengembangan koleksi di perpustakaan pada Google Scholar: sebuah narrative literature review. *Jurnal Pustaka Budaya*, 10(1), pp.32–43.
- [11] Tasidjawa, G.E., Nurkhamim and Firmansyah, A., 2022. Overview risiko dampak debu akibat aktivitas penambangan di Indonesia. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII (ReTII)*, November 2022, pp.312–317.
- [12] Izzawati, 2024. Hubungan kadar timbal darah dengan kadar hemoglobin karyawan pembangkit listrik tenaga uap. *Journal of Nursing and Health (JNH)*, 9(3), pp.341–347.
- [13] Lawson, M.J., Prytherch, Z.C., Jones, T.P., Adams, R.A. and BéruBé, K.A., 2020. Iron-rich magnetic coal fly ash particles induce apoptosis in human bronchial cells. *Applied Sciences*, 10(23), p.8368. <https://doi.org/10.3390/app10238368>.
- [14] Rozhina, E., Ishmukhametov, I., Nigmatzyanova, L., Akhatova, F., Batasheva, S., Taskaev, S., Montes, C., Lvov, Y. and Fakhrullin, R., 2021. Comparative toxicity of fly ash: an in vitro study. *Molecules*, 26, p.1926. <https://doi.org/10.3390/molecules26071926>.
- [15] Jumpponen, M., 2017. *Occupational exposure to components of biomass-fired power plant ash* (Disertasi). Publications of the University of Eastern Finland. Dissertations in Forestry and Natural Sciences, No. 285. Kuopio: University of Eastern Finland.
- [16] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2023. *Physiological effects of lead*. [online] Available at: [https://archive.cdc.gov/www\\_atsdr\\_cdc\\_gov/csem/leadtoxicity/physiological\\_effects.html](https://archive.cdc.gov/www_atsdr_cdc_gov/csem/leadtoxicity/physiological_effects.html) [Accessed 24 Apr. 2025].
- [17] León-Mejía, G., Machado, M.N., Okuro, R.T., Silva, L.F.O., Telles, C., Dias, J., Niekraszewicz, L., Da Silva, J., Henriques, J.A.P. and Zin, W.A., 2018. Intratracheal

instillation of coal and coal fly ash particles in mice induces DNA damage and translocation of metals to extrapulmonary tissues. *Science of the Total Environment*, 625, pp.589–599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.283>.