



DOI: <https://doi.org/10.38035/jmpis.v7i1>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Model Sosialisasi dan Pembelajaran Lingkungan dalam Pengoperasian *Dust Collector* Bagi Pekerja Tambang melalui Penerapan IADL

Yafi Nur Hanif^{1*}, Anton Irawan², Moh. Fawaid³

¹Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Banten, Indonesia, Yafihanif97@gmail.com

²Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Banten, Indonesia, Antonirawan@untirta.ac.id

³Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Banten, Indonesia, Fawaid80@untirta.ac.id

*Corresponding Author: Yafihanif97@gmail.com

Abstract: *The Socialization Strategy for the Development of Identification of Environmental Aspects and Impacts (IADL) for Workers in Dust Collector Operations in Mining Areas aims to develop a systematic approach in recognizing and controlling the potential environmental impact of dust collector operational activities in mining areas. This study uses a risk assessment method with a life-cycle approach and a four-cell risk matrix to assess the possibilities and consequences of each activity that has the potential to cause air pollution. The results showed that the highest risk activity was in routine operation and filtration system failure, which can increase the emission of fine particles into the surrounding environment. Control efforts are carried out through preventive maintenance, emission monitoring, implementation of Standard Operational Procedures, and environmental awareness training for workers. In conclusion, the implementation of IADL accompanied by a socialization and continuous training strategy is able to increase workers' understanding of environmental impacts, strengthen the work culture of caring for the environment, and support the application of sustainable mining principles.*

Keywords: *Environmental Aspect, Dust Collector, Risk Assessment, Sustainable Mining, Worker Socialization*

Abstrak: Strategi Sosialisasi Pengembangan *Identification of Environmental Aspects and Impacts* (IADL) bagi Pekerja dalam Pengoperasian *Dust Collector* di Area Pertambangan bertujuan untuk mengembangkan pendekatan sistematis dalam mengenali dan mengendalikan potensi dampak lingkungan dari kegiatan operasional *dust collector* di area pertambangan. Penelitian ini menggunakan metode penilaian risiko dengan pendekatan daur hidup (*life-cycle approach*) dan matriks risiko empat sel untuk menilai kemungkinan dan konsekuensi dari setiap aktivitas yang berpotensi menimbulkan pencemaran udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas dengan tingkat risiko tertinggi terdapat pada operasi rutin dan kegagalan sistem filtrasi, yang dapat meningkatkan emisi partikulat halus ke lingkungan sekitar. Upaya pengendalian dilakukan melalui pemeliharaan preventif, pemantauan emisi, penerapan *Standard Operational Procedure*, serta pelatihan kesadaran lingkungan bagi

pekerja. Kesimpulannya, penerapan IADL yang disertai strategi sosialisasi dan pelatihan berkelanjutan mampu meningkatkan pemahaman pekerja terhadap dampak lingkungan, memperkuat budaya kerja peduli lingkungan, serta mendukung penerapan prinsip pertambangan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Environmental Aspect, Dust Collector, Risk Assessment, Sustainable Mining, Sosialisasi Pekerja*

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan memiliki potensi besar terhadap timbulnya dampak lingkungan, terutama akibat emisi debu yang dihasilkan dari proses pengolahan dan pemindahan material (Molnar et al., 2021). *Dust collector* berfungsi sebagai sistem pengendali pencemaran udara yang penting untuk menjaga kualitas lingkungan kerja serta mencegah penyebaran partikel debu ke area sekitar (Kaikkonen et al., 2021; Okanigbe et al., 2017). Namun, efektivitas alat ini sangat bergantung pada perilaku dan pemahaman pekerja dalam mengoperasikan serta memeliharanya (Helser et al., n.d.; Lemos et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis dalam mengenali dan mengelola aspek serta dampak lingkungan yang muncul selama kegiatan operasional melalui penerapan *Identification of Environmental Aspects and Impacts* (IADL) (Burns et al., 2021).

Dalam praktiknya, rendahnya kesadaran dan keterlibatan pekerja sering menjadi kendala dalam penerapan IADL secara optimal (Wang et al., 2022). Untuk itu, strategi sosialisasi yang efektif perlu dikembangkan agar pekerja memahami pentingnya identifikasi aspek dan dampak lingkungan sebagai bagian dari tanggung jawab operasional dan budaya kerja berkelanjutan (Fatemi et al., 2022). Sosialisasi yang terarah diharapkan mampu meningkatkan partisipasi aktif pekerja dalam menjaga kinerja lingkungan, mengurangi potensi pencemaran udara, serta mendukung implementasi sistem manajemen lingkungan di area pertambangan secara konsisten dan berkelanjutan (Gopinathan et al., 2023).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode penilaian risiko dengan pendekatan daur hidup (life-cycle approach) untuk mengembangkan *Identification of Environmental Aspects and Impacts* (IADL) pada kegiatan pengoperasian *dust collector* di area pertambangan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menilai potensi dampak lingkungan dari setiap tahap kegiatan secara sistematis, mulai dari kondisi normal, abnormal, hingga darurat.

Penilaian risiko dilakukan menggunakan matriks risiko empat sel (four-cell risk assessment matrix) yang dikembangkan oleh Bird & Germain (1996). Melalui matriks ini, setiap potensi dampak seperti emisi debu, kebisingan, konsumsi energi, serta kemungkinan kebocoran debu akibat kegagalan sistem, dinilai berdasarkan dua parameter utama, yaitu tingkat kemungkinan (likelihood) dan tingkat konsekuensi (severity) (Iqbal et al., 2021). Kombinasi keduanya menghasilkan kategori risiko (*Low, Medium, High*) yang digunakan sebagai dasar penentuan prioritas pengendalian (Kanojiya et al., 2021).

Indikator penilaian kemungkinan dan konsekuensi disusun dengan mengacu pada karakteristik industri pertambangan. Indikator kemungkinan mencakup frekuensi kejadian dari “jarang” hingga “sangat sering”, sedangkan indikator konsekuensi meliputi dampak dari berbagai aspek seperti finansial, hukum dan kepatuhan, reputasi, lingkungan, komunitas lokal, pemangku kepentingan, produksi, dan jadwal operasional (Susanto & Mulyono, 2018).

Sebagai tindak lanjut dari hasil penilaian, dilakukan strategi sosialisasi kepada pekerja yang terlibat dalam pengoperasian *dust collector*. Kegiatan sosialisasi ini meliputi pelatihan pemahaman aspek dan dampak lingkungan, simulasi penanganan kondisi darurat (misalnya

kebocoran debu atau kegagalan filtrasi), serta pembinaan budaya kerja yang berorientasi pada kesadaran lingkungan (*environmental awareness*). Dengan demikian, pengembangan IADL tidak hanya menjadi dokumen administratif, tetapi juga berperan dalam meningkatkan kinerja lingkungan dan keselamatan operasional di area pertambangan.

		Consequences			
Likelihood		1	2	3	4
	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

Rating Level
Actionable
Monitor
Medium
Low

Gambar 1. Four-Cells Risk Matrix

Tabel 1. Indikator kemungkinan dalam penilaian risiko pada Industri Pertambangan

Kategori	Frekuensi	Definisi
Frekuensi Dampak Potensial	Jarang (1)	Mungkin terjadi lebih dari sekali selama fasilitas beroperasi
	Mungkin (2)	Mungkin terjadi sekali atau lebih selama fasilitas beroperasi, tetapi kurang dari sekali dalam 20 tahun
	Sering (3)	Mungkin terjadi sekali atau lebih setiap 20 tahun tetapi kurang dari sekali dalam setahun
	Sangat sering (4)	Mungkin terjadi sekali atau lebih setiap tahun
Frekuensi Deskripsi	Jarang (1)	Kejadian yang jarang terjadi <1 kali per fasilitas beroperasi
	Mungkin (2)	Kejadian yang mungkin terjadi <1 kali setiap 20 tahun; >1 kali per fasilitas beroperasi
	Sering (3)	Kejadian yang sering terjadi <1 kali per tahun; >1 kali setiap 20 tahun
	Sangat sering (4)	Terjadi secara teratur ≥1 kali per tahun

Tabel 2. Indikator konsekuensi dalam penilaian risiko pada Industri Pertambangan

Kategori	Tingkat (Level)	Deskripsi (Description)
Finansial (Financial)	Minor (1)	\$0 – \$25 juta
	Moderate (2)	\$25 – \$50 juta
	Significant (3)	\$50 – \$100 juta
	Major (4)	≥ \$100 juta
Hukum / Kepatuhan (Legal / Compliance)	Minor (1)	Tidak termasuk isu kepatuhan terhadap peraturan atau hanya berupa pemberitahuan informal
	Moderate (2)	Pelanggaran terhadap peraturan dengan tingkat sedang dan hanya dikenakan sanksi minimum
	Significant (3)	Pelanggaran signifikan terhadap peraturan yang disertai pemberitahuan pelanggaran dengan potensi penalti ≥ \$100.000
	Major (4)	Pelanggaran berat dan/atau kronis terhadap administrasi peraturan
Reputasi (Reputation)	Minor (1)	Tidak ada liputan berita
	Moderate (2)	Liputan lokal atau perhatian dari pemangku kepentingan dengan tingkat rendah

Lingkungan (Environment)	Significant (3)	Liputan di tingkat provinsi atau regional, atau dari pemangku kepentingan penting
	Major (4)	Liputan berita internasional atau nasional, atau kritik dari pemangku kepentingan
	Minor (1)	Dampak bersifat sementara dan terukur
	Moderate (2)	Dampak jangka pendek namun dapat diperbaiki
Komunitas Lokal (Local Community)	Significant (3)	Kerusakan signifikan, tetapi dampak di dalam atau luar organisasi masih dapat dipulihkan ke kondisi semula
	Major (4)	Kerusakan besar atau berbahaya di luar organisasi yang sulit diperbaiki
	Minor (1)	Reaksi minimal dari pihak luar, sebagian besar dari individu, atau tidak ada keluhan
	Moderate (2)	Keluhan sedang dengan liputan media kecil dan terdapat perselisihan
Pemangku Kepentingan (Stakeholders regional, nasional, internasional)	Significant (3)	Keluhan besar dengan perhatian media dan adanya perselisihan yang terjadi
	Major (4)	Keluhan utama dengan liputan nasional/internasional serta kehilangan izin sosial dan/atau dukungan dari komunitas
	Minor (1)	Reaksi minimal dari pihak luar dan sebagian besar dari individu, atau tidak ada keluhan
	Moderate (2)	Keluhan sedang dan terdapat perselisihan dari beberapa kelompok
Produksi (Production)	Significant (3)	Keluhan signifikan dengan liputan media tingkat regional dan adanya perselisihan
	Major (4)	Keluhan utama dengan liputan nasional/internasional serta kehilangan izin sosial dan/atau dukungan dari komunitas
	Minor (1)	<1%
	Moderate (2)	1 – 5%
Jadwal (Schedule)	Significant (3)	5 – 90%
	Major (4)	Produksi terhenti (shutdown)
	Minor (1)	<1 bulan keterlambatan
	Moderate (2)	1 – 3 bulan keterlambatan
	Significant (3)	3 – 12 bulan keterlambatan
	Major (4)	>1 tahun keterlambatan

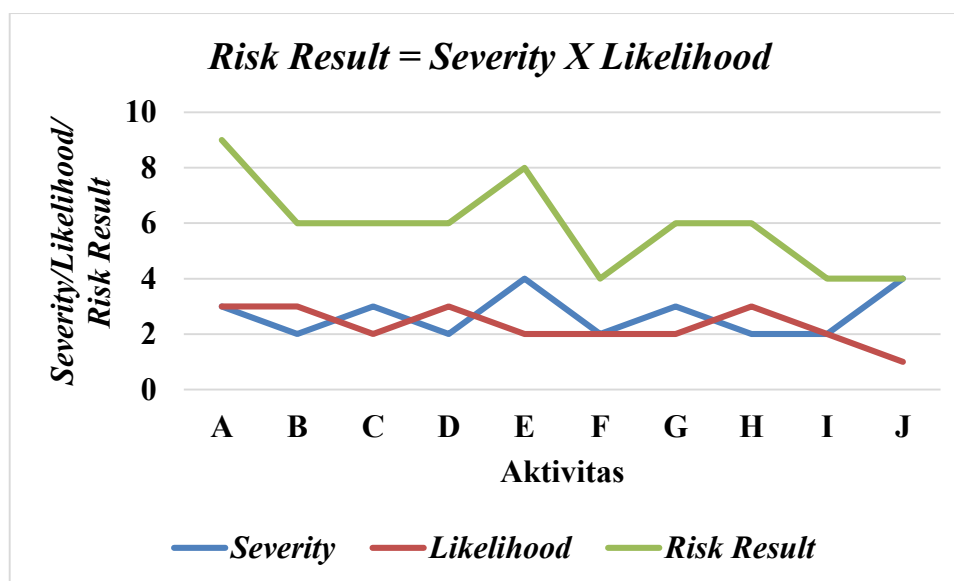
Sebagai bentuk penjaminan mutu data dan kesesuaian metode penelitian, hasil penyusunan identifikasi aspek dan dampak lingkungan (IADL) ini telah melalui proses validasi oleh **ahli lingkungan yang berkompeten** dan memiliki sertifikasi sesuai peraturan perundangan (Muazu et al., 2021). Validasi tersebut memastikan bahwa pendekatan penilaian risiko, indikator kemungkinan dan konsekuensi, serta rekomendasi pengendalian yang digunakan dalam penelitian ini telah sesuai dengan prinsip-prinsip penilaian dampak lingkungan dan standar pengelolaan lingkungan di sektor pertambangan (Nassiri et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3. Hasil Penilaian Risiko IADL *Dust Collector* di Industri Pertambangan

No	Aktivitas	Aspek Lingkungan	Potensi Risiko	Konsekuensi	S	L	R	Planning & Control (Perencanaan & Pengendalian)
1	Operasi rutin dust collector	Emisi udara (debu) dari sistem filtrasi	Kelebihan emisi debu halus (PM10, PM2.5)	Pencemaran udara lokal, gangguan kesehatan pekerja & masyarakat sekitar	3	3	High	Pastikan filter dalam kondisi baik, jadwal penggantian filter rutin, monitoring emisi berkala, kalibrasi alat sensor.
2	Penggantian bag filter	Penanganan limbah debu hasil filtrasi	Tumpahan dan penyebaran debu ke lingkungan	Pencemaran udara dan tanah sekitar area kerja	2	3	Medium	Gunakan kantong tertutup, sistem pengemasan limbah kering, housekeeping area, ventilasi lokal.
3	Pembuangan limbah debu ke area disposal	Pengangkutan limbah debu kering	Debu beterbangan saat transportasi atau pembuangan	Polusi udara, iritasi pada pekerja, kontaminasi area	3	2	Medium	Gunakan wadah tertutup, tutup rapat kendaraan pengangkut, area disposal terkontrol, penyiraman periodik.
4	Pembersihan area sekitar dust collector	Debu sisa operasi menumpuk di lantai	Debu terbang akibat aktivitas pembersihan	Pencemaran udara lokal	2	3	Medium	Lakukan pembersihan dengan metode basah, gunakan vacuum industrial, APD masker dan goggles.
5	Kegagalan sistem dust collector (misalnya bag bocor)	Emisi langsung ke atmosfer	Terlepasnya partikel berbahaya ke udara bebas	Gangguan kualitas udara, keluhan masyarakat	4	2	High	Alarm tekanan diferensial, inspeksi filter harian, shutdown otomatis bila tekanan abnormal, preventive maintenance.

6	Pembuangan material panas dari hopper	Material sisa masih panas	Uap atau asap dari partikel panas	Polusi udara, bau, gangguan visual	2	2	Medium	Pendinginan sebelum pembuangan, sistem ventilasi, APD tahan panas, SOP pembuangan material panas.
7	Kebocoran sistem pneumatik	Tekanan negatif tidak stabil	Pelepasan partikel ke udara bebas	Polusi udara, penurunan efisiensi filtrasi	3	2	Medium	Periksa pipa dan sambungan secara berkala, sistem alarm tekanan, perawatan rutin blower.
8	Pengumpulan abu hasil penyaringan	Penanganan abu dengan cara manual	Debu tercecer di lantai dan terbawa angin	Kontaminasi area kerja dan lingkungan sekitar	2	3	Medium	Gunakan vacuum tertutup, sistem transfer otomatis, SOP pembersihan harian.
9	Shutdown atau start-up sistem	Tekanan udara tidak stabil	Debu terlepas akibat perubahan tekanan mendadak	Peningkatan emisi sesaat	2	2	Low	SOP start-up/shutdown bertahap, kontrol tekanan, koordinasi dengan operator operator furnace.
10	Pembuangan akhir limbah debu	Pengelolaan limbah padat	Limbah tidak dikelola sesuai prosedur	Pencemaran tanah dan air permukaan	4	1	Medium	Penyimpanan di area B3 (jika terklasifikasi), izin pembuangan limbah, kerja sama dengan pihak pengelola limbah berizin.



Gambar 2. Grafik Penilaian Risiko IADL *Dust Collector* di Industri Pertambangan

Tabel 4. Catatan Lanjutan dari Grafik Penilaian Risiko IADL *Dust Collector* di Industri Pertambangan

Catatan :	
	Aktivitas
A	Operasi rutin dust collector
B	Penggantian bag filter
C	Pembuangan limbah debu ke area disposal
D	Pembersihan area sekitar dust collector
E	Kegagalan sistem dust collector (misalnya bag bocor)
F	Pembuangan material panas dari hopper
G	Kebocoran sistem pneumatik
H	Pengumpulan abu hasil penyaringan
I	Shutdown atau start-up sistem
J	Pembuangan akhir limbah debu

Pada **Gambar 2**. Menggambarkan hasil penilaian risiko IADL pada sistem *dust collector* di industri pertambangan menunjukkan bahwa sebagian besar aktivitas memiliki tingkat risiko sedang hingga tinggi (Wiafe et al., 2022). Risiko tinggi terutama terdapat pada kegiatan penggantian bag filter, kegagalan sistem akibat bag bocor, pembuangan material panas dari hopper, serta proses *shutdown* atau *start-up* sistem, yang berpotensi menimbulkan paparan debu, kebakaran, atau kerusakan peralatan (Hong et al., 2021; Kumari & Kumar, 2022). Sementara itu, aktivitas rutin seperti operasi, pembersihan, pengumpulan abu, dan pembuangan limbah debu termasuk kategori risiko sedang yang tetap memerlukan pengendalian melalui penggunaan APD, penerapan prosedur kerja aman, serta inspeksi dan pemeliharaan berkala (Breitenstein et al., 2021). Secara keseluruhan, sistem *dust collector* membutuhkan pengawasan ketat, penerapan prosedur keselamatan yang disiplin, dan pengendalian teknis untuk mencegah dampak terhadap pekerja maupun lingkungan (Kelvin et al., 2022; Lachaux et al., 2022).

Hasil analisis risiko terhadap pengoperasian *dust collector* di area pertambangan (Tabel 3) memperlihatkan bahwa setiap kegiatan memiliki potensi dampak lingkungan yang berbeda, terutama yang berkaitan dengan pencemaran udara dan aspek kesehatan pekerja. Dari hasil identifikasi, sebagian besar sumber risiko muncul akibat emisi debu yang timbul selama proses penyaringan, pengangkutan, hingga pembuangan limbah debu hasil filtrasi.

Aktivitas dengan tingkat risiko tertinggi (*High*) ditemukan pada kegiatan operasi rutin *dust collector* dan kondisi kegagalan sistem filtrasi, seperti kebocoran *bag filter*. Dalam kondisi ini, terdapat kemungkinan peningkatan emisi partikulat halus (PM10 dan PM2.5) yang berpotensi mencemari udara sekitar dan mengganggu kesehatan pekerja maupun masyarakat di sekitar area operasi. Untuk menekan risiko tersebut, diperlukan langkah pengendalian teknis yang terencana, antara lain pemeliharaan serta penggantian filter secara berkala, pengukuran emisi dengan sensor yang terkalibrasi, serta penerapan sistem alarm tekanan dan *shutdown* otomatis jika terdeteksi tekanan abnormal. Dengan langkah tersebut, efektivitas kinerja *dust collector* dapat terjaga dan risiko pencemaran udara dapat diminimalkan.

Risiko dengan kategori sedang (*Medium*) mencakup sebagian besar aktivitas, antara lain penggantian *bag filter*, pengangkutan limbah debu kering, pembersihan area sekitar *dust collector*, dan pengumpulan abu hasil penyaringan. Potensi risiko dari kegiatan ini umumnya berupa penyebaran debu ke lingkungan, penurunan efisiensi filtrasi, serta kontaminasi area kerja dan tanah di sekitarnya. Upaya pengendalian dilakukan melalui penerapan prosedur operasi standar (SOP), penggunaan sistem tertutup, penambahan ventilasi lokal, serta penerapan kebersihan kerja (*housekeeping*) secara rutin. Selain itu, penggunaan alat pelindung diri (APD) seperti masker danacamata keselamatan wajib diterapkan untuk mengurangi paparan langsung terhadap debu halus.

Sementara itu, kegiatan seperti *shutdown* dan *start-up* sistem dikategorikan memiliki risiko rendah (*Low*), karena emisi debu yang muncul bersifat sementara akibat perubahan tekanan udara mendadak. Namun demikian, agar risiko tetap terkendali, diperlukan prosedur pengoperasian yang bertahap dan koordinasi yang baik antaroperator untuk menjaga kestabilan tekanan udara selama proses berlangsung.

Secara umum, hasil evaluasi menunjukkan bahwa aspek udara merupakan sumber risiko paling dominan dalam pengoperasian *dust collector*. Pengendalian risiko yang diterapkan menitikberatkan pada kombinasi pengendalian teknis dan administratif, dengan tujuan menjaga kualitas udara, efisiensi sistem, serta kepatuhan terhadap ketentuan ISO 14001:2015 tentang pengelolaan aspek dan dampak lingkungan.

Selain penerapan teknis, keberhasilan pengendalian juga bergantung pada tingkat pemahaman dan kepedulian pekerja terhadap dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas mereka (Sun et al., 2022). Oleh karena itu, pelaksanaan sosialisasi dan pelatihan secara berkelanjutan sangat diperlukan untuk meningkatkan kesadaran lingkungan (*environmental awareness*). Melalui pelatihan berkala, simulasi penanganan kondisi darurat, dan pembiasaan budaya kerja yang peduli lingkungan, penerapan IADL tidak hanya menjadi dokumen formalitas, tetapi berfungsi sebagai sarana pembinaan yang mendorong peningkatan kinerja lingkungan dan keselamatan kerja di area pertambangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegiatan pengoperasian *dust collector* di area pertambangan memiliki risiko lingkungan sedang hingga tinggi, terutama dari emisi debu halus (PM10 dan PM2.5) yang dapat mencemari udara dan mengganggu kesehatan pekerja. Untuk mengurangi risiko tersebut, dilakukan pengendalian teknis melalui perawatan rutin, penggunaan sistem tertutup, ventilasi lokal, penerapan SOP, dan pemakaian APD. Selain itu, dikembangkan Model Sosialisasi dan Pembelajaran IADL Berbasis Tempat Kerja yang bertujuan meningkatkan pemahaman dan kepedulian pekerja terhadap dampak lingkungan. Model ini mencakup pelatihan langsung di lapangan, pemasangan media visual edukatif, penyusunan panduan sederhana, evaluasi rutin, dan pemberian penghargaan bagi pekerja yang disiplin menjaga lingkungan (Machairas & Varouchakis, 2023). Dengan model ini, sosialisasi IADL menjadi lebih mudah dipahami dan diterapkan karena melibatkan pekerja secara aktif, serta mampu memperkuat budaya kerja peduli lingkungan dan mendukung penerapan prinsip pertambangan berkelanjutan (Salgado-Almeida et al., 2022).

Sebagai langkah akhir, hasil analisis risiko dan rekomendasi pengendalian dalam penelitian ini telah divalidasi oleh ahli lingkungan yang berkompeten, guna memastikan kesesuaian dengan prinsip-prinsip pengelolaan lingkungan hidup dan ketentuan peraturan perundangan yang berlaku (Larionov et al., 2021). Validasi ini menegaskan bahwa metode identifikasi dan pengendalian risiko yang digunakan telah memenuhi standar penilaian dampak lingkungan (AMDAL) serta mendukung penerapan sistem manajemen lingkungan pada kegiatan operasional dust collector di area pertambangan.

KESIMPULAN

Penerapan Identification of Environmental Aspects and Impacts (IADL) pada pengoperasian *dust collector* di area pertambangan sangat penting untuk mengendalikan risiko pencemaran udara dan menjaga kesehatan pekerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar kegiatan memiliki tingkat risiko sedang hingga tinggi, terutama akibat emisi debu halus dari sistem filtrasi. Upaya pengendalian dilakukan melalui pemeliharaan rutin, penerapan SOP, penggunaan APD, dan sistem pemantauan emisi yang teratur. Selain itu, penerapan Model Sosialisasi dan Pembelajaran IADL Berbasis Tempat Kerja terbukti efektif dalam meningkatkan pemahaman dan kesadaran pekerja terhadap dampak lingkungan. Model ini menjadikan kegiatan sosialisasi lebih praktis dan mudah diterapkan di lapangan karena melibatkan pekerja secara langsung. Dengan demikian, kombinasi penerapan teknis dan model sosialisasi ini mampu memperkuat budaya kerja peduli lingkungan serta mendukung penerapan prinsip pertambangan yang aman dan berkelanjutan. Seluruh hasil dan rekomendasi dalam penelitian ini telah divalidasi oleh ahli lingkungan yang berkompeten untuk memastikan bahwa penerapan Identification of Environmental Aspects and Impacts (IADL) dan strategi pengendalian yang diusulkan sesuai dengan standar pengelolaan lingkungan yang berlaku. Validasi ini memperkuat bahwa pendekatan yang diterapkan tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga sejalan dengan prinsip keberlanjutan dan kepatuhan lingkungan di industri pertambangan.

REFERENSI

- Breitenstein, M., Nguyen, D. K., & Walther, T. (2021). ENVIRONMENTAL HAZARDS AND RISK MANAGEMENT IN THE FINANCIAL SECTOR: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW. *Journal of Economic Surveys*, 35(2), 512–538. <https://doi.org/10.1111/joes.12411>
- Burns, E. E., Csiszar, S. A., Roush, K. S., & Davies, I. A. (2021). National scale down-the-drain environmental risk assessment of oxybenzone in the United States. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(5), 951–960. <https://doi.org/10.1002/ieam.4430>
- Fatemi, F., Dehdashti, A., & Jannati, M. (2022). Implementation of Chemical Health, Safety, and Environmental Risk Assessment in Laboratories: A Case-Series Study. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.898826>
- Gopinathan, P., Subramani, T., Barbosa, S., & Yuvaraj, D. (2023). Environmental impact and health risk assessment due to coal mining and utilization. In *Environmental Geochemistry and Health* (Vol. 45, Issue 10, pp. 6915–6922). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01744-z>
- Helser, J., Vassilieva, E., & Cappuyns, V. (n.d.). *Environmental and human health risk assessment of sulfidic mine waste: bioaccessibility, leaching and mineralogy*.
- Hong, H., Adam, V., & Nowack, B. (2021). Form-Specific and Probabilistic Environmental Risk Assessment of 3 Engineered Nanomaterials (Nano-Ag, Nano-TiO₂, and Nano-ZnO) in European Freshwaters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(9), 2629–2639. <https://doi.org/10.1002/etc.5146>

- Iqbal, A., Tabinda, A. B., & Yasar, A. (2021). Environmental risk assessment of a young landfill site and its vicinity for possible human exposure. *Human and Ecological Risk Assessment*, 27(1), 258–273. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1706152>
- Kaikkonen, L., Parviainen, T., Rahikainen, M., Uusitalo, L., & Lehtikainen, A. (2021). Bayesian Networks in Environmental Risk Assessment: A Review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(1), 62–78. <https://doi.org/10.1002/ieam.4332>
- Kanojiya, M. T., Mandavgade, N., Kalbande, V., & Padole, C. (2021). Design and fabrication of cyclone dust collector for industrial Application. *Materials Today: Proceedings*, 49, 378–382. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.254>
- Kelvin, M., Whiteman, E., & Leybourne, M. (2022). Characterization of Particulate Matter Generated at a Nickel Smelter Using Quantitative Mineralogy. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.817759>
- Kumari, M., & Kumar, A. (2022). Environmental and human health risk assessment of mixture of Covid-19 treating pharmaceutical drugs in environmental waters. *Science of the Total Environment*, 812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152485>
- Lachaux, N., Cossu-Leguille, C., Poirier, L., Gross, E. M., & Giamberini, L. (2022). Integrated environmental risk assessment of rare earth elements mixture on aquatic ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.974191>
- Larionov, A., Nezhnikova, E., & Smirnova, E. (2021). Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132413539>
- Lemos, J., Gaspar, P. D., & Lima, T. M. (2022). Environmental Risk Assessment and Management in Industry 4.0: A Review of Technologies and Trends. In *Machines* (Vol. 10, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines10080702>
- Machairas, E., & Varouchakis, E. A. (2023). Cost–Benefit Analysis and Risk Assessment for Mining Activities in Terms of Circular Economy and Their Environmental Impact. In *Geosciences (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/geosciences13100318>
- Molnar, E., Maasz, G., & Pirger, Z. (2021). Environmental risk assessment of pharmaceuticals at a seasonal holiday destination in the largest freshwater shallow lake in Central Europe. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(42), 59233–59243. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09747-4>
- Muazu, R. I., Rothman, R., & Maltby, L. (2021). Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 293). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126120>
- Nassiri, O., Rhoujjati, A., & EL Hachimi, M. L. (2021). Contamination, sources and environmental risk assessment of heavy metals in water, sediment and soil around an abandoned Pb mine site in North East Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 80(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09387-y>
- Okanigbe, D. O., Popoola, A. P. I., & Adeleke, A. A. (2017). Characterization of Copper Smelter Dust for Copper Recovery. *Procedia Manufacturing*, 7, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.032>
- Salgado-Almeida, B., Falquez-Torres, D. A., Romero-Crespo, P. L., Valverde-Armas, P. E., Guzmán-Martínez, F., & Jiménez-Oyola, S. (2022). Risk Assessment of Mining Environmental Liabilities for Their Categorization and Prioritization in Gold-Mining Areas of Ecuador. *Sustainability (Switzerland)*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/su14106089>

- Sun, S., Mao, T., Lv, P., & Pang, L. (2022). Dust Explosion Risk Assessment for Dry Dust Collector Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Processes*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/pr10122616>
- Susanto, A., & Mulyono, N. B. (2018). Risk assessment method for identification of environmental aspects and impacts at ore processing industry in Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 19(2), 72–80. <https://doi.org/10.12911/22998993/81781>
- Wang, Y., Wang, G., Sun, M., Liang, X., He, H., Zhu, J., & Takahashi, Y. (2022). *Environmental risk assessment of the potential “Chemical Time Bomb” of ion-adsorption type rare earth elements in 2 urban areas.*
- Wiafe, S., Awuah Yeboah, E., Boakye, E., & Ofosu, S. (2022). Environmental risk assessment of heavy metals contamination in the catchment of small-scale mining enclave in Prestea Huni-Valley District, Ghana. *Sustainable Environment*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2022.2062825>