



Pengelolaan Air Asam Tambang Dalam Mendukung SDGs Sektor Pertambangan: Perspektif Hukum Lingkungan

Dimas Andrianto^{1*}, Aldri Frinaldi², Dasman Lanin³, Rembrandt⁴, Mhd. Ridha⁵, Iqrima Basri⁶

^{1,5}Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Padang

²Ilmu Administrasi Negara, Universitas Negeri Padang

³Ilmu Sosial, Universitas Andalas

⁴Ilmu Hukum, Universitas Negeri Padang

⁶Ilmu Pendidikan, Universitas Negeri Padang

Email : *¹dmsandrianto@gmail.com, ²aldri@fis.unp.ac.id, ³dasman@fis.unp.ac.id, ⁴rembrandt@fh.unand.ac.id

⁵mhdridha@unp.ac.id, ⁶iqrimbas05@gmail.com

Article History:

Received Oct 31th, 2025

Revised Nov 4th, 2025

Accepted Nov 14th, 2025

Abstrak

Pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) merupakan isu penting dalam pembangunan berkelanjutan sektor pertambangan. Aktivitas pertambangan yang tidak terkendali dapat menghasilkan AAT melalui oksidasi mineral sulfida, yang berdampak pada penurunan kualitas air, kerusakan ekosistem, serta peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) dan sulfur dioksida (SO₂). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas pengelolaan AAT di Indonesia dan keterkaitannya dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Metode yang digunakan adalah studi literatur (library research) melalui analisis hasil penelitian, laporan lembaga internasional, dan regulasi nasional yang relevan. Hasil kajian menunjukkan bahwa perusahaan tambang besar telah menerapkan sistem pengelolaan AAT yang relatif baik, sementara perusahaan skala menengah dan kecil masih menghadapi keterbatasan teknologi, biaya, dan pengawasan. Lemahnya penegakan hukum serta koordinasi antarinstansi menyebabkan kebijakan lingkungan belum optimal, sehingga pencemaran air dan emisi karbon dari sektor pertambangan tetap tinggi. Kajian ini menekankan pentingnya penerapan teknologi ramah lingkungan, penegakan hukum yang tegas, dan kolaborasi lintas sektor antara pemerintah, industri, dan masyarakat. Penelitian ini memberikan perspektif baru mengenai integrasi antara instrumen hukum dan pendekatan teknologi dalam mewujudkan tata kelola pertambangan berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci : Air Asam Tambang, SDG 6, SDG 13, Hukum Lingkungan, Pembangunan Berkelanjutan

Abstract

Acid Mine Drainage (AMD) management is a critical issue in achieving sustainable development in the mining sector. Uncontrolled mining activities can generate AMD through the oxidation of sulfide minerals, leading to water quality degradation, ecosystem damage, and increased emissions of carbon dioxide (CO₂) and sulfur dioxide (SO₂). This study aims to examine the effectiveness of AMD management in Indonesia and its relevance to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action). The research employs a literature review methodology, analyzing previous studies, reports from international organizations, and relevant national regulations. The findings indicate that large-scale mining companies have implemented relatively effective AMD management systems, whereas medium and small-scale enterprises still face technological, financial, and supervisory constraints. Weak law enforcement and poor inter-agency coordination hinder optimal environmental policy implementation, resulting in persistent water pollution and carbon emissions from the mining sector. This study highlights the importance of environmentally friendly technologies, strict



law enforcement, and cross-sector collaboration among government, industry, and society. It offers a novel perspective on integrating legal instruments and technological approaches to achieve sustainable mining governance in Indonesia.

Keyword : Acid Mine Drainage, SDG 6, SDG 13, environmental law, sustainable development

PENDAHULUAN

Isu pengelolaan lingkungan hidup dalam sektor pertambangan dewasa ini menempati posisi strategis dalam diskursus pembangunan berkelanjutan (Robertua, 2020; Arkum, 2024). Kegiatan pertambangan memberikan kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, namun menyisakan jejak ekologis yang kompleks dan sulit dipulihkan (Hasid et al., 2022; Nugraha et al., 2024). Salah satu dampak paling serius yang menjadi perhatian global adalah Air Asam Tambang (AAT) atau Acid Mine Drainage (AMD), yaitu terbentuknya air bersifat asam akibat oksidasi mineral sulfida seperti pirit (FeS_2), yang melarutkan logam berat berbahaya seperti Fe, Cu, dan Mn (Prambudi, 2021). Fenomena ini mengubah karakteristik kimia air, mengancam ekosistem perairan, dan berdampak pada kesehatan masyarakat yang bergantung pada sumber air tersebut.

Secara ideal, pengelolaan tambang harus berjalan berdasarkan prinsip kehati-hatian dan tanggung jawab ekologis, sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UUPPLH), Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (UU Minerba), serta PP Nomor 22 Tahun 2021. Namun, kondisi aktual menunjukkan kesenjangan yang tajam antara norma hukum dan praktik lapangan. Sejumlah penelitian mencatat bahwa pengelolaan AAT di Indonesia masih jauh dari ideal (Johar, 2021), dengan lebih dari sepertiga perusahaan tambang belum memiliki fasilitas pengolahan AAT yang memenuhi baku mutu lingkungan (KLHK, 2024).

Fenomena ini bukan sekadar persoalan teknis, tetapi juga mencerminkan lemahnya tata kelola dan efektivitas hukum lingkungan. Banyak dokumen AMDAL disusun hanya sebagai pemenuhan administratif tanpa implementasi konkret Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL) dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL) (Johar, 2021). Penegakan sanksi administratif dan pidana yang lemah juga menurunkan efek jera bagi pelaku usaha (Wibisana & Jonaidi, 2020), sementara kapasitas pengawasan pemerintah daerah dan partisipasi masyarakat masih terbatas (OECD, 2022). Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, pengelolaan AAT berkaitan langsung dengan pencapaian SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim) (UNEP, 2021; KLHK, 2024). Air yang tercemar asam dan logam berat berpotensi menurunkan ketersediaan air bersih, sedangkan gangguan ekosistem dan emisi karbon dari proses oksidasi tambang memperburuk risiko perubahan iklim.

Beberapa penelitian terdahulu telah menyoroti pendekatan teknologis maupun ekologis, seperti rekayasa biogeokimia dan constructed wetlands (Perala & Mansur, 2022; Fahrudin, 2009). Namun, aspek yuridis, tata kelola, dan integrasi hukum-lingkungan masih jarang dikaji secara mendalam. Bertolak dari hal tersebut, penelitian ini berupaya mengisi celah konseptual dengan menelaah pengelolaan AAT, efektivitas hukum lingkungan, dan kontribusinya terhadap SDG 6 dan SDG 13. Kajian ini diharapkan memberikan rekomendasi aplikatif terkait penguatan penegakan hukum, inovasi teknologi ramah lingkungan, dan kolaborasi multi-stakeholder untuk mendukung tata kelola pertambangan berkelanjutan di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode yuridis normatif. Pendekatan ini digunakan untuk menelaah prinsip, norma, serta pelaksanaan hukum lingkungan dalam pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) di sektor pertambangan. Fokus analisis diarahkan pada keterkaitan antara efektivitas hukum, kebijakan pengelolaan lingkungan, dan pencapaian SDG 6 (Clean Water and Sanitation) serta SDG 13 (*Climate Action*).

Data yang digunakan berasal dari kajian kepustakaan (library research) yang meliputi bahan hukum primer, sekunder, dan tersier. Bahan hukum primer mencakup Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UUPPLH), Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (UU Minerba), serta peraturan turunannya seperti PP Nomor 22 Tahun 2021 dan Permen ESDM Nomor 26 Tahun 2018. Bahan hukum sekunder meliputi jurnal ilmiah, laporan pemerintah, dan publikasi lembaga internasional seperti UNEP, OECD, dan KLHK. Adapun bahan hukum tersier berupa kamus hukum dan literatur pendukung yang menjelaskan konsep *precautionary principle* dan *ecological justice*. Secara lebih spesifik, literature yang digunakan disesuaikan dengan ketentuan yang disajikan pada tabel 1:

**Tabel 1. Kriteria Literatur yang digunakan**

Aspek	Kriteria Inklusi (2010–2025)	Kriteria Eksklusi
Jenis Literatur	Studi akademik, jurnal ilmiah, laporan resmi pemerintah, publikasi lembaga internasional (UNEP, OECD, KLHK)	Opini, artikel populer, literatur tanpa analisis hukum atau data pendukung
Topik	Pengelolaan Air Asam Tambang (AAT/AMD) di Indonesia; aspek hukum, teknis, atau relevansi SDGs 6 & 13	Studi yang tidak terkait dengan pengelolaan AAT/AMD atau pertambangan di Indonesia
Periode Publikasi	2010–2025	Sebelum 2010, kecuali relevan secara historis
Bahasa Konteks	Bahasa Indonesia dan Inggris Fokus pada praktik pengelolaan, regulasi, dan kebijakan terkait AAT	Bahasa lain tanpa terjemahan resmi Fokus pada topik umum pertambangan tanpa membahas AAT/AMD
Dokumen Hukum	Undang-Undang, Peraturan Pemerintah, Peraturan Menteri, serta dokumen pendukung yang relevan	Dokumen hukum tidak terkait lingkungan atau pertambangan

Analisis data dilakukan secara deskriptif-analitis dengan teknik content analysis (Krippendorff, 2019). Setiap data ditelusuri dan dikategorikan berdasarkan tema, yaitu aspek hukum, aspek teknis pengelolaan AAT, serta relevansinya terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan. Instrumen hukum yang menjadi fokus analisis mencakup Undang-Undang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU No. 32/2009), Peraturan Pemerintah tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan terkait pengelolaan air asam tambang. Validitas hasil analisis diperkuat melalui teknik triangulasi sumber, dengan membandingkan berbagai referensi akademik, laporan resmi, dan dokumen hukum (Creswell, 2014).

Tahapan penelitian mencakup empat langkah utama:

- (1) inventarisasi data hukum dan kebijakan terkait AAT,
- (2) analisis literatur akademik dengan menelusuri klausul atau ketentuan terkait pengelolaan AAT,
- (3) klasifikasi tematik berdasarkan isu hukum dan lingkungan serta pencocokan dengan indikator SDGs 6 & 13
- (4) sintesis hasil untuk menarik kesimpulan dan rekomendasi kebijakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Kondisi Aktual Pengelolaan AAT di Indonesia

Permasalahan pengelolaan lingkungan di sektor pertambangan merupakan isu yang kompleks karena melibatkan aspek teknis, ekonomi, sosial, dan hukum secara bersamaan (Arkum, 2024). Dalam konteks Indonesia, tantangan terbesar terletak pada bagaimana aktivitas tambang yang bersifat eksploitasi sumber daya alam dapat dijalankan tanpa mengorbankan daya dukung lingkungan dan keberlanjutan ekosistem (Manik, 2013 ; Cerya & Khaidir, 2021 ; Cadizza & Pratama, 2024). Salah satu bentuk dampak paling serius dari kegiatan tersebut adalah terbentuknya Air Asam Tambang (AAT) yang muncul akibat reaksi oksidasi mineral sulfida seperti pirit dengan air dan udara. Reaksi kimia ini menghasilkan air yang sangat asam dan mengandung logam berat berbahaya seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan tembaga (Cu). Air dengan tingkat keasaman tinggi dapat menurunkan kualitas air tanah, mencemari sungai, dan mengganggu kehidupan biota perairan (Widodo, et.al., 2019).

Dalam tataran ideal, setiap perusahaan tambang berkewajiban mengelola air limbah tambang sesuai kaidah teknik pertambangan yang baik sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, serta PP Nomor 22 Tahun 2021. Ketentuan tersebut mewajibkan pelaku usaha untuk memastikan bahwa air buangan tambang memenuhi baku mutu lingkungan dan tidak menimbulkan dampak negatif bagi masyarakat sekitar. Namun, hasil analisis terhadap berbagai laporan resmi menunjukkan bahwa pelaksanaan kewajiban tersebut belum sepenuhnya berjalan sesuai harapan. Data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2024) memperlihatkan bahwa dari 443 izin usaha pertambangan aktif, hanya sekitar 62% perusahaan yang memiliki sistem pengelolaan AAT yang berfungsi efektif, sementara sisanya masih terbatas pada pengelolaan pasif atau bahkan belum memiliki fasilitas pengolahan yang memadai.

Kajian terhadap berbagai literatur menunjukkan bahwa permasalahan pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) di Indonesia telah lama menjadi isu krusial dalam konteks perlindungan lingkungan hidup dan keberlanjutan sumber daya alam. Sejumlah penelitian terdahulu menyoroti bahwa AAT merupakan hasil reaksi kimia antara mineral sulfida dan oksigen yang menghasilkan air dengan tingkat keasaman tinggi serta kandungan logam berat berbahaya (Suryadi &



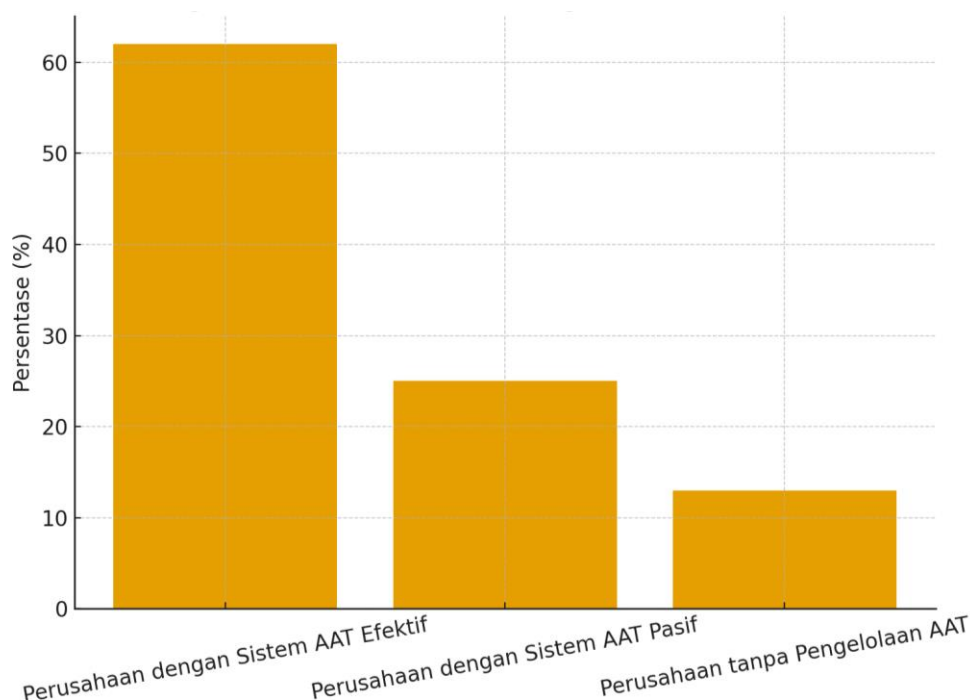
Kusuma, 2019 ; Widodo, et.al., 2019 ; Prambudi 2021). Air asam ini terbukti menurunkan pH perairan, merusak keseimbangan biota, dan mencemari sumber air masyarakat sekitar tambang.

Hasil kajian yang dilakukan oleh Maulida & Purwanti (2023) menunjukkan bahwa perusahaan tambang besar seperti PT Freeport Indonesia dan PT Kaltim Prima Coal telah menerapkan sistem pengolahan AAT berbasis *lime neutralization* dan *constructed wetlands*. Teknologi ini mampu menurunkan tingkat keasaman air dari pH 3,5 menjadi sekitar 6,8–7,0, serta menurunkan kadar logam Fe hingga 80%. Studi lain menemukan bahwa penerapan *bioreactor sulfate reduction* di wilayah tambang batubara Kalimantan Tengah efektif mengurangi kandungan logam berat sebesar 60–70% dalam waktu tiga bulan operasi (Indra, et.al., 2014 ; Parella & Mansur, 2022 ; Kusdarini, et.al., 2024. Temuan-temuan ini memperlihatkan bahwa secara teknis, pengendalian AAT dapat dilakukan secara efektif bila disertai komitmen perusahaan terhadap keberlanjutan.

Sebaliknya, penelitian oleh Johar (2021) dan OECD (2022) memperlihatkan bahwa sebagian besar perusahaan tambang skala kecil dan menengah belum memiliki sistem pengelolaan AAT yang memadai. Di sejumlah daerah tambang batubara di Sumatera Selatan dan Kalimantan Timur, air buangan tambang masih ditemukan dengan pH di bawah 4,0, disertai tingginya kadar Fe dan Mn yang melebihi baku mutu lingkungan (Widodo, et.al., 2019). KLHK (2024) juga mencatat bahwa sekitar 37% perusahaan tambang di Indonesia belum memenuhi kewajiban pengolahan AAT sebagaimana diatur dalam peraturan perundang-undangan. Fakta ini menunjukkan masih lemahnya penerapan prinsip *good mining practice* dan rendahnya tingkat kepatuhan lingkungan di lapangan (Arif, 2021).

b. Kelemahan Tata Kelola dan Hukum Lingkungan

Kesenjangan penerapan sistem pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) di antara perusahaan tambang di Indonesia dapat dilihat dari data nasional yang dirilis oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2024). Data ini memberikan gambaran mengenai sejauh mana pelaku industri pertambangan telah melaksanakan kewajiban pengelolaan lingkungan sesuai kaidah teknik pertambangan yang baik (*good mining practice*). Berikut ditampilkan informasi terkait data pengelolaan Air Asam Tambang di Indonesia:



Gambar 1. Persentase Pengelolaan Air Asam Tambang di Indonesia (KLHK, 2024)

Gambar 1 tersebut menunjukkan bahwa meskipun sebagian perusahaan besar telah mengadopsi teknologi pengelolaan AAT yang baik, masih terdapat kesenjangan signifikan dalam penerapannya di tingkat nasional (Said, 2014). Rendahnya persentase perusahaan yang mengelola AAT secara optimal menggambarkan masih lemahnya kepatuhan terhadap kaidah teknik pertambangan yang baik (*good mining practice*). Hasil ini sejalan dengan temuan Johar (2021) dan OECD (2022) yang menyebutkan bahwa lebih dari sepertiga perusahaan tambang di Indonesia belum memiliki sistem pengolahan air tambang yang memenuhi baku mutu lingkungan.

Secara substantif, ketimpangan dalam penerapan pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) di berbagai perusahaan menunjukkan bahwa efektivitas hukum lingkungan di Indonesia belum berjalan sepenuhnya (Robertua, 2020). Banyak perusahaan masih menjadikan pelaporan Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL) dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL) sebagai formalitas administratif tanpa diikuti pelaksanaan teknis yang konsisten di lapangan (Wibisana & Jonaidi, 2020). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun kerangka regulasi sudah tersedia dengan cukup komprehensif, penerapannya belum sepenuhnya mampu mengarahkan perilaku industri tambang agar selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (Arkum, 2024). Oleh karena itu, grafik sebelumnya menegaskan pentingnya penguatan aspek implementasi, terutama melalui peningkatan kapasitas kelembagaan, pengawasan lapangan yang berkelanjutan, serta penerapan teknologi pengendalian AAT yang terstandarisasi untuk memastikan seluruh perusahaan tambang memenuhi kewajiban hukum yang berlaku.

Kelemahan dalam penerapan kebijakan pada dasarnya bersumber dari belum optimalnya fungsi penegakan hukum dan koordinasi antarinstansi pemerintah. Wibisana dan Jonaidi (2020) menyoroti bahwa efektivitas hukum lingkungan sering terhambat oleh lemahnya sinergi antara otoritas pusat dan daerah serta keterbatasan sumber daya pengawas. Purwendah (2019) menambahkan bahwa sebagian besar pelanggaran lingkungan hanya diselesaikan melalui sanksi administratif tanpa tindak lanjut hukum yang lebih tegas, sementara Chandra (2024) menilai bahwa penegakan hukum lingkungan belum mampu membentuk perilaku korporasi yang berorientasi pada kepatuhan ekologis. Akibatnya, hukum lingkungan lebih berfungsi sebagai mekanisme korektif administratif ketimbang sebagai instrumen perubahan perilaku menuju keberlanjutan.

c. Implikasi Terhadap SDG 6 dan SDG 13

Implikasi dari lemahnya implementasi hukum tersebut terlihat pada pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*), khususnya SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa AAT menjadi salah satu sumber pencemaran utama yang menghambat penyediaan air bersih di sekitar kawasan tambang (UNEP, 2021). Selain itu, proses oksidasi sulfida yang menjadi penyebab terbentuknya AAT juga melepaskan gas karbon dioksida (CO_2) dan sulfur dioksida (SO_2), yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon di atmosfer (Rachman, et.al., 2004 ; Maharini, 2017 ; Budirohmi, et.al., 2025). OECD (2022) memperkirakan bahwa sektor pertambangan mineral dan batubara menyumbang sekitar 7% dari total emisi karbon industri global. Dengan demikian, pengelolaan AAT secara terpadu bukan hanya upaya teknis untuk menekan pencemaran air, tetapi juga bagian dari strategi nasional dalam mendukung agenda aksi iklim dan pencapaian SDG 6 serta SDG 13.

Hubungan antara Air Asam Tambang (AAT) dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan dapat dipahami secara lebih komprehensif melalui diagram konseptual pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Kontribusi Air Asam Tambang terhadap SDG 6 dan SDG 13

Gambar 2 tersebut menunjukkan bahwa pembentukan AAT berawal dari proses oksidasi mineral sulfida seperti pirit (FeS_2) akibat kontak antara batuan tambang dengan air dan udara. Reaksi ini menghasilkan air dengan tingkat



keasaman tinggi dan kandungan logam berat yang tinggi, yang kemudian mengalir ke lingkungan sekitar tambang (Wahyudin. Et.al., 2018 ; Fahrudin, 2022). Dampak utama dari proses ini adalah pencemaran air, ditandai oleh turunnya pH air hingga di bawah batas aman dan meningkatnya kadar logam Fe, Mn, dan Cu (Suryadi & Kusuma, 2019 ; Sitorus, et.al., 2024). Kondisi ini mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, menurunkan kualitas air tanah, serta mengancam ketersediaan air bersih bagi masyarakat sekitar. Oleh karena itu, pencemaran akibat AAT secara langsung berkaitan dengan pencapaian SDG 6, yang menargetkan tersedianya air bersih dan sanitasi yang layak bagi semua (Statistik, 2014).

Selain berdampak terhadap kualitas air, reaksi kimia yang menyebabkan terbentuknya AAT juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) dan sulfur dioksida (SO₂). Gas-gas ini merupakan bagian dari emisi yang mempercepat proses pemanasan global dan memperburuk perubahan iklim (KLHK, 2024; UNEP, 2021). Dengan demikian, AAT tidak hanya menjadi persoalan lokal pada wilayah tambang, tetapi juga berimplikasi global terhadap perubahan iklim yang menjadi fokus SDG 13 (Statistik, 2014).

Secara konseptual, diagram tersebut menegaskan bahwa pengelolaan AAT memiliki kontribusi ganda terhadap pembangunan berkelanjutan. Upaya pengendalian AAT melalui teknologi pengolahan air tambang yang efektif tidak hanya memperbaiki kualitas air, tetapi juga berperan dalam mitigasi emisi karbon. Dengan demikian, keberhasilan pengelolaan AAT akan secara langsung mendukung dua sasaran global utama, yaitu pemenuhan akses terhadap air bersih (SDG 6) dan penguatan aksi terhadap perubahan iklim (SDG 13).

Penelitian Maulida & Purwanti (2023) juga menunjukkan bahwa penerapan sistem *constructed wetlands* berbasis vegetasi alami tidak hanya menurunkan tingkat keasaman air, tetapi juga berfungsi sebagai penyerap karbon melalui fotosintesis tanaman air. Pendekatan ini menegaskan bahwa strategi pengelolaan AAT yang berbasis ekosistem dapat memberikan manfaat ganda: mengurangi pencemaran dan memperkuat mitigasi perubahan iklim (Iwan, 2021). Selain itu, hasil kajian menegaskan pentingnya integrasi antara kebijakan teknis dan regulasi hukum untuk memastikan pengelolaan lingkungan tambang berjalan secara konsisten dan terukur.

Beberapa studi internasional juga mendukung pandangan tersebut. Beberapa penelitian asing (Tong , et.al., 2021 ; Yuan et al., 2022 ; Zhang, et.al., 2023) di China dan Kim & Park (2022) di Korea Selatan melaporkan bahwa penerapan sistem *acid mine drainage treatment plant* yang disertai mekanisme audit lingkungan tahunan terbukti menurunkan pencemaran air tambang secara signifikan dan meningkatkan kepatuhan perusahaan terhadap regulasi. Di Kanada, Kaiyogana, et.al., (2021) menemukan bahwa pengawasan berbasis masyarakat (*community monitoring system*) dapat meningkatkan transparansi dan akuntabilitas perusahaan tambang hingga 40%. Pembelajaran dari berbagai negara ini menunjukkan bahwa keberhasilan pengelolaan AAT tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada keberlanjutan sistem hukum dan partisipasi publik yang kuat.

d. Strategi Perbaikan Kebijakan

Secara umum, hasil sintesis literatur memperlihatkan bahwa pengelolaan AAT di Indonesia telah memiliki kerangka hukum yang cukup komprehensif, namun implementasinya masih belum optimal. Hambatan utama terletak pada lemahnya penegakan hukum, minimnya kapasitas teknis di daerah, dan rendahnya keterlibatan masyarakat dalam pengawasan lingkungan. Oleh karena itu, integrasi antara instrumen hukum, teknologi pengolahan air tambang, dan mekanisme partisipatif menjadi kunci keberhasilan dalam mengelola AAT secara berkelanjutan. Penguatan hukum lingkungan di sektor pertambangan tidak cukup hanya dengan memperbanyak regulasi, tetapi harus disertai peningkatan kapasitas institusional serta penerapan teknologi ramah lingkungan, sejalan dengan gagasan *ecological justice* yang menempatkan keberlanjutan lingkungan sebagai hak dasar masyarakat dan tanggung jawab moral negara.

Dalam konteks strategi, pengelolaan AAT yang efektif memerlukan pendekatan terpadu dan berlapis. Penguatan kapasitas kelembagaan di tingkat pusat maupun daerah menjadi prioritas, termasuk peningkatan kompetensi teknis petugas pengawas dan ketersediaan sarana monitoring yang memadai. Selain itu, penerapan teknologi pengolahan air tambang yang terbukti efektif, seperti lime neutralization, *constructed wetlands*, dan *bioreactor sulfate reduction*, perlu distandarisasi dan disosialisasikan ke seluruh perusahaan tambang, tidak hanya perusahaan besar. Mekanisme partisipasi masyarakat dan audit lingkungan berbasis komunitas juga harus diperluas, sehingga transparansi dan akuntabilitas pelaksanaan pengelolaan AAT meningkat. Dengan strategi terpadu ini, kebijakan hukum tidak hanya menjadi formalitas administratif, tetapi juga mendorong perubahan perilaku korporasi menuju kepatuhan ekologis, sekaligus mendukung pencapaian SDG 6 dan SDG 13 secara konsisten.

KESIMPULAN

Kajian ini menegaskan bahwa pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) merupakan isu strategis yang menentukan keberlanjutan sektor pertambangan di Indonesia. Keberhasilan pengelolaan AAT tidak hanya diukur dari efektivitas teknologinya, tetapi juga dari sejauh mana hukum lingkungan mampu ditegakkan secara konsisten dan kolaboratif. Penguatan tata kelola lingkungan di sektor pertambangan menjadi kunci dalam mendukung pencapaian SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Dengan demikian, pengelolaan



AAT harus dipandang sebagai bagian integral dari kebijakan pembangunan berkelanjutan, bukan sekadar kewajiban teknis perusahaan.

Secara strategi, upaya menuju pengelolaan AAT yang berkelanjutan memerlukan tiga fondasi utama: penegakan hukum lingkungan yang efektif, penerapan inovasi teknologi pengolahan yang adaptif, dan kolaborasi lintas sektor yang melibatkan pemerintah, industri, akademisi, serta masyarakat. Ketiganya menjadi prasyarat bagi terwujudnya pertambangan yang berdaya saing, bertanggung jawab, dan berkeadilan ekologis. Keterbatasan penelitian terletak pada pendekatan konseptual yang belum didukung data empiris lapangan. Arah penelitian lanjutan dapat difokuskan pada evaluasi implementasi hukum lingkungan di perusahaan tambang dengan metode observasi dan wawancara mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Alghifary, A., & Sihombing, Y. I. (2022). Permeable reactive barrier sebagai inovasi remediasi air asam tambang yang berkelanjutan dan ramah lingkungan di Indonesia. *Jurnal Himasapta*, 6(3), 159–170.
- Arkum, D. (2024). *Pembangunan berkelanjutan industri pertambangan timah di Indonesia*. Deepublish.
- Arif, I. I. (2021). *Good mining practice di Indonesia*. Gramedia pustaka utama.
- Awalia, N. A., & Marzuki, I. (2025). Pemanfaatan campuran zeolit dan limestone untuk menurunkan pH air asam tambang pada pengujian skala laboratorium. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 20(1), 13–17.
- Budirohmi, A., Arianti, S. F., Armus, R., Pohan, M. S. A., La Habi, M., Opier, P. N. J., & Purwanto, P. (2025). *Kimia Lingkungan: Dasar Teori dan Aplikasi*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Brundtland Commission. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Chandra, F. (2024). *Hukum lingkungan*. Meja Ilmiah Publikasi.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Fahrudin, F. (2009). Pengaruh jenis sedimen wetland dalam reduksi sulfat pada limbah air asam tambang (AAT). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 10(1), 26–30.
- Fahrudin, M. S. (2022). *Mikrobiologi pengolahan limbah tambang*. Qiara Media.
- Gautama, R. S. (2012). *Pengelolaan air asam tambang*. Institut Teknologi Bandung.
- Hasid, H. Z., Akhmad Noor, S. E., & Kurniawan, E. (2022). *Ekonomi sumber daya alam dalam lensa pembangunan ekonomi*. Cipta Media Nusantara.
- Indra, H., Lepong, Y., Gunawan, F., & Abfer-tiawan, M. S. (2014). Penerapan metode active dan passive treatment dalam pengelolaan air asam tambang Site Lati. *Jurnal Sylva Lestari*, 1(1), 1–9.
- Iskandar, A. H. (2020). *SDGs desa: percepatan pencapaian tujuan pembangunan nasional berkelanjutan*. Yayasan Pustaka Obor Indonesia.
- Iwan Saputra, I. S. (2021). *Efektivitas Sistem Constructed Wetlands dengan Keladi Singonium (Syngonium polophyllum) dan Biochar Tatal Karet dalam Menurunkan Parameter Pencemar Air Lindi* (Doctoral dissertation, Universitas Batanghari).
- Johar, O. A. (2021). Realitas permasalahan penegakan hukum lingkungan di Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(1), 54–65.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). *Laporan kinerja penegakan hukum lingkungan tahun 2024*. KLHK.
- Kim, N., & Park, D. (2022). Biosorptive treatment of acid mine drainage: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), 9115–9128.
- Krippendorff, K. (2019). *Content analysis: An introduction to its methodology* (4th ed.). SAGE Publications.
- Kusdarini, E., Sania, P. R., & Budianto, A. (2024). Netralisasi air asam tambang menggunakan pengolahan aktif dan pasif. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 808–815.
- KLHK. (2024). *Laporan status / ringkasan kondisi lingkungan hidup terkait sektor pertambangan*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Maharini, G. A. K. S. (2017). Studi Reduksi Sulfur Dioksida (SO₂) Udara Ambien oleh Ruang Terbuka (RTH) untuk Wilayah Permukiman dan Transportasi di Kota Surabaya. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. <https://repository.its.ac.id/43243/1/3313100016-Undergraduate-Theses.pdf>.
- Manik, J. I., & Rambe, M. I. I. (2024). Implementasi prinsip-prinsip hukum lingkungan dalam pengelolaan sumber daya alam di Indonesia. *INNOVATIVE: Journal of Social Science Research*, 4(4), 8220–8229.
- Maulida, S. A., & Purwanti, I. F. (2023). Kajian pengolahan air asam tambang industri pertambangan batu bara dengan constructed wetland. *Jurnal Teknik ITS*, 12(1), D46–D51.
- Nugraha, R., Varlitya, C. R., Judijanto, L., Adiwijaya, S., Suryahani, I., Murwani, I. A., & Basbeth, F. (2024). *Green economy: Teori, konsep, gagasan penerapan perekonomian hijau berbagai bidang di masa depan*. Sonpedia Publishing Indonesia.



- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Environmental performance review: Indonesia 2022*. OECD Publishing.
- Perala, I., Yani, M., & Mansur, I. (2022). Bioremediasi air asam tambang batubara dengan pengayaan bakteri pereduksi sulfat dan penambahan substrat organik. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 18(2), 81–95.
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2018 tentang Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. (2018). Jakarta: Kementerian ESDM.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021). Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- Prambudi, R. A. (2021). *Pengaruh oksigen dalam uji potensi pembentukan air asam tambang dengan metode free draining column leach test menggunakan fly ash dan bottom ash sebagai material non-acid forming (NAF)* [Tesis doctoral, Institut Teknologi Nasional Bandung].
- Prno, J., Pickard, M., & Kaiyogana, J. (2021). Effective community engagement during the environmental assessment of a mining project in the Canadian Arctic. *Environmental Management*, 67(5), 1000–1015.
- Purwendah, E. K. (2019). Perlindungan lingkungan dalam perspektif prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*). *Jurnal Media Komunikasi Pendidikan Pancasila dan Kewarganegaraan*, 1(2), 82–94.
- Rachman, R. M., Baturante, H., Delly, J., Gunadi, H., & Manga, J. (2004). Kimia lingkungan.
- Razie, F. (2016). Kajian penanggulangan air asam tambang pada salah satu perusahaan pemegang ijin usaha pertambangan di Desa Lemo, Kabupaten Barito Utara, Kalimantan Tengah. *EnviroScienteeae*.
- Robertua, V. (2020). *Politik lingkungan Indonesia: Teori & studi kasus*.
- Said, N. I. (2014). Teknologi pengolahan air asam tambang batubara: Alternatif pemilihan teknologi. *Jurnal Air Indonesia*, 7(2), 246–269.
- Sitorus, S., Wahyudin, M., & Napitupulu, M. (2024). *Monograf kimia air asam tambang batu bara*. Penerbit NEM.
- Suryadi, M., & Kusuma, G. J. (2019). Pengelolaan air asam tambang dari dinding bekas penambangan sebagai alternatif penanggulangan pencemaran lingkungan: Studi kasus Tambang Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Sosioteknologi*, 18(3), 433–448.
- Tong, L., Fan, R., Yang, S., & Li, C. (2021). Development and status of the treatment technology for acid mine drainage. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(1), 315–327.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara. (2020). Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2009). Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- United Nations Environment Programme. (2021). *Global environment outlook 6: Healthy planet, healthy people*. UNEP.
- Wahyudin, I., Widodo, S., & Nurwaskito, A. (2018). Analisis penanganan air asam tambang batubara. *Jurnal Geomine*, 6(2), 85–89.
- Wibisana, A. G., & Jonaidi, D. P. (2020). Landasan doktriner hak gugat pemerintah terhadap kerugian lingkungan hidup di Indonesia. *Jurnal Bina Mulia Hukum*, 5(1), 156–175.
- Widodo, S., Sufriadin, A., Budiman, A. A., Asmiani, N., Jafar, N., & Babay, M. F. (2019). Karakterisasi mineral pirit pada batubara berdasarkan hasil analisis mikroskopi, proksimat, total sulfur, dan difraksi sinar X; Potensi terjadinya air asam tambang. *Jurnal Geosapta*, 5(2), 121–126.
- Yuan, J., Ding, Z., Bi, Y., Li, J., Wen, S., & Bai, S. (2022). Resource utilization of acid mine drainage (AMD): A review. *Water*, 14(15), 2385.
- Zhang, T., Zhang, C., Du, S., Zhang, Z., Lu, W., Su, P., & Zhao, Y. (2023). A review: The formation, prevention, and remediation of acid mine drainage. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(52), 111871–111890.