



TEKNIK PENAMBANGAN MODERN: METODE, TEKNOLOGI, DAN PENGELOLAAN SUMBER DAYA



TIM PENULIS :

- Ahmad Iskandar
- Jance Murdjani Supit
- Anselma Diksita Prajna Duhita
- Doli Jumat Rianto

TEKNIK PENAMBANGAN MODERN: METODE, TEKNOLOGI, DAN PENGELOLAAN SUMBER DAYA

Ahmad Iskandar
Jance Murdjani Supit
Anselma Diksita Prajna Duhita
Doli Jumat Rianto



GET PRESS INDONESIA

**TEKNIK PENAMBANGAN MODERN: METODE, TEKNOLOGI, DAN
PENGELOLAAN SUMBER DAYA**

Penulis :

Ahmad Iskandar
Jance Murdjani Supit
Anselma Diksita Prajna Duhita
Doli Jumat Rianto

ISBN : 978-634-255-639-9

Editor : Mila Sari, M. Si.

Dede Ahsani Aulia, ST.

Desain Sampul dan Tata Letak : Yuli Hardina, S.Si

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Teknik Penambangan Modern: Metode, Teknologi, dan Pengelolaan Sumber Daya* ini dapat diselesaikan. Isi buku ini mencakup pembahasan tentang pengantar teknik penambangan, metode penambangan terbuka (*surface mining*), teknologi dan inovasi dalam kegiatan penambangan, dan pengelolaan sumber daya dan lingkungan tambang. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Maret 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 PENGANTAR TEKNIK PENAMBANGAN.....	1
1.1 Mengapa “Menambang” Itu Bukan Sekadar Menggali?	1
1.2 Siklus Hidup Tambang: dari “Dugaan” Menjadi “Rencana Kerja”	5
1.3 Memilih Metode Tambang: Bentuk Endapan “Memilih” Tekniknya.....	6
1.3.1 Tambang Terbuka (<i>Surface / Open Pit Mining</i>)	7
1.3.2 Tambang Bawah Tanah (<i>Underground Mining</i>)	7
1.4 Operasi Utama Tambang: dari Batuan Utuh Menjadi Material Bergerak.....	9
1.5 Pengolahan Mineral: Tambang Tidak Berhenti Di Rom	11
1.5.1 Dari Batuan ke Ukuran yang Bisa Dipisahkan: <i>Comminution (Crushing & Grinding)</i>	12
1.5.2 Klasifikasi: Memilah Ukuran Agar Proses Tidak Saling Mengganggu	12
1.5.3 Konsentrasi: Memisahkan yang Bernilai dari yang Tidak—Dengan “Sifat Fisik/Kimia” Sebagai Kunci	13
1.5.4 Tailing: Bagian Terbesar yang Harus Diperlakukan Paling Serius	13
1.6 K3, Lingkungan, dan Tata Kelola: Tiga Hal yang Tidak Boleh Menjadi Catatan Kaki	14
DAFTAR PUSTAKA	19
BAB 2 METODE PENAMBANGAN TERBUKA (<i>SURFACE MINING</i>).....	23
2.1 <i>Open Pit/Open Cut Mining</i>	25
2.2 <i>Strip Mining</i>	28

2.3 Quarrying	31
2.4 Placer Mining	33
2.5 Mountaintop Removal Mining	36
2.6 Highwall Mining	38
2.7 Dredging	41
2.8 Faktor Penentu Pemilihan Metode Penambangan	43
2.9 Perkembangan Metode Penambangan Terbuka	45
DAFTAR PUSTAKA	49
BAB 3 TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM KEGIATAN PENAMBANGAN	59
3.2 Konsep Mining 4.0 dalam Industri Pertambangan.....	62
3.3 Teknologi Eksplorasi dan Pemodelan Tambang.....	68
3.4 Teknologi Operasi Tambang	72
3.5 Teknologi Keselamatan dan Kesehatan Kerja Tambang.....	76
DAFTAR PUSTAKA	84
BAB 4 PENGELOLAAN SUMBER DAYA DAN LINGKUNGAN TAMBANG	89
4.1 Konsep Dasar dan Pendekatan Strategis.....	89
4.2 Identifikasi Dampak dan Penurunan Mutu Lingkungan	95
4.3 Dampak Spesifik (Fisik, Kimia dan Kesehatan)	102
4.3.1 Pencemaran Air.....	102
4.3.2 Pencemaran Tanah	105
4.3.3 Pencemaran Udara	107
4.3.4 Kebisingan.....	109
4.3.5 Getaran	113
4.4 Strategi Pemulihan dan Teknologi Pengelolaan.....	114
4.5 Tata Kelola, Partisipasi dan Keberlanjutan	123
DAFTAR PUSTAKA	129
BIODATA PENULIS	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Open Pit</i> di Grassberg, PT. Freeport Indonesia.....	26
Gambar 2. 2 <i>Open Cut</i> di Mt. Arthur, BHP Australia, New South Wales.....	26
Gambar 2. 3 Alat Gali-Muat dan Angkut.....	27
Gambar 2. 4 Ilustrasi <i>Strip Mining</i>	30
Gambar 2. 5 <i>Quarry</i> (Kuari) Batu dan Pasir	31
Gambar 2. 6 <i>Quarry</i> (Kuari) Marmer.....	32
Gambar 2. 7 <i>Placer Mining</i>	34
Gambar 2. 8 <i>Mountaintop Removal Mining</i>	37
Gambar 2. 9 Ilustrasi <i>Highwall Mining</i>	39
Gambar 2. 10 <i>Dredging</i>	42
Gambar 2. 11 Ilustrasi Pemanfaatan IoT pada <i>Surface Mining</i>	47
Gambar 3. 1 Perkembangan Teknologi Penambangan Batubara ..	61
Gambar 3. 2 Pemanfaatan Sistem <i>Fleet Management</i>	63
Gambar 3. 3 Pengoperasian Alat Berat Tambang Jarak Jauh	64
Gambar 3. 4 Pemantauan Dampak dan Risiko Lingkungan dengan Satelit	66
Gambar 3. 5 Ekosistem Pertambangan Cerdas	68
Gambar 3. 6 Hasil Pengolahan Citra Satelit untuk Eksplorasi	69
Gambar 3. 7 Hasil Pemanfaatan Drone untuk <i>Surveying</i>	70
Gambar 3. 8 Pemodelan Tambang Hasil Eksplorasi	72
Gambar 3. 9 Operasi Penambangan	73
Gambar 3. 10 Pemantauan Parameter <i>Drilling</i>	74
Gambar 3. 11 Ruang Pusat Kendali.....	78
Gambar 3. 12 Model sistem Monitoring Tambang Berbasis IoT	79
Gambar 3. 13 Akuisisi Data Monitoring Kestabilan Lereng.....	80
Gambar 3. 14 Pemanfaatan Teknologi pada Pelatihan SDM Pertambangan	82
Gambar 4. 1 Siklus Hidup dan Dampak Lingkungan Terkait Material Tambang.....	94
Gambar 4. 2 Diagram Alir Operasi Pertambangan	101
Gambar 4. 3 Kadar Fe dan Mn Tinggi pada Pertambangan Batubara	103

Gambar 4. 4 Metode <i>Encapsulation</i>	106
Gambar 4. 5 Aktivitas <i>Water Truck</i> dalam Meredam Debu.....	109
Gambar 4. 6 Diagram Alir Limbah pada Mineral Tambang.....	116

BAB 1

PENGANTAR TEKNIK PENAMBANGAN

Oleh Ahmad Iskandar

1.1 Mengapa “Menambang” Itu Bukan Sekadar Menggali?

Mengapa “menambang” itu bukan sekadar menggali? Karena yang diambil bukan hanya batuan—melainkan keputusan. Keputusan yang menyeimbangkan keselamatan, biaya, mutu bijih, waktu, risiko geoteknik, air, cuaca, energi, regulasi, dan penerimaan sosial. Di tepi pit saat kabut pagi, “lubang besar” memang terlihat. Tetapi yang benar-benar bekerja adalah sebuah sistem: desain lereng dan jenjang (bench), rute jalan angkut, ritme siklus gali-muat-angkut, kontrol kadar (grade control), hingga pengawasan lingkungan. Teknik penambangan, pada akhirnya, adalah cara manusia mengelola keterbatasan: kebutuhan ekonomi, batasan alam, dan kewajiban moral pada keselamatan serta keberlanjutan.

Secara disiplin, teknik penambangan mempelajari cara mengambil sumber daya mineral secara aman, ekonomis, dan bertanggung jawab—dari eksplorasi, perencanaan, operasi, pengolahan awal (bila terintegrasi), sampai reklamasi dan pascatambang (Darling, 2011; Hartman & Mutmanský, 2002). Di Indonesia, “tanggung jawab” itu bukan jargon: ia melekat pada tata kelola perizinan, pengelolaan lingkungan, dan

kewajiban reklamasi–pascatambang yang diatur dalam regulasi (Republic of Indonesia, 2020; Republic of Indonesia, 2010).

1) Menambang adalah “membaca” ketidakpastian, bukan melawan alam

Sebelum bucket pertama menyentuh batuan, tambang sudah lebih dulu “dibangun” di atas data yang tidak pernah sempurna: data pemboran, model geologi, estimasi sumber daya, variabilitas kadar, dan asumsi geoteknik. Di sini, menambang bukan sekadar pekerjaan fisik, tetapi pekerjaan epistemik—mengubah ketidakpastian menjadi keputusan yang dapat dipertanggungjawabkan.

Standar pelaporan seperti CRIRSCO Template dan JORC Code menegaskan bahwa sumber daya dan cadangan tidak boleh diperlakukan sebagai “angka pasti”, melainkan estimasi yang harus transparan atas asumsi, metode, dan tingkat keyakinannya (CRIRSCO, 2013; JORC, 2012). Dalam praktik modern, perencanaan tambang juga memasukkan pendekatan manajemen risiko dan optimasi di bawah ketidakpastian, karena salah membaca variabilitas kadar dan geologi dapat memukul ekonomi tambang sekaligus keselamatan operasi (Dimitrakopoulos, 2011).

2) Menambang adalah rekayasa sistem: desain, ritme, dan biaya yang saling mengunci

Tambang terbuka yang tampak “rapi” dari kejauhan sesungguhnya adalah hasil kompromi teknis–ekonomi. Lebar jalan angkut, kemiringan jalan, tinggi jenjang, sudut lereng, lokasi waste dump, penjadwalan alat, hingga strategi blending—semua saling mengunci seperti roda gigi. Perubahan kecil pada desain bisa berdampak berantai pada produktivitas, konsumsi bahan bakar, umur ban, risiko kecelakaan, dan cashflow.

Itulah sebabnya perencanaan pit dan desain tambang terbuka menjadi disiplin yang ketat: ia menghubungkan geologi-geoteknik-operasi-ekonomi dalam satu “cerita” yang bisa dieksekusi di lapangan (Hustrulid *et al.*, 2013). Bahkan, definisi “ekonomis” pun tidak hanya berarti murah, tetapi menciptakan nilai sambil menjaga batas risiko yang dapat diterima (Darling, 2011; Hustrulid *et al.*, 2013).

3) Menambang adalah etika keselamatan: “produksi” tidak boleh mengalahkan nyawa

Salah satu pembeda paling tajam antara “menggali” dan “menambang” adalah cara kita memperlakukan risiko. Tambang bekerja dengan energi besar: massa batuan, alat berat, peledakan, lereng, air, dan lalu lintas. Karena itu, keselamatan tidak cukup hanya berupa imbauan; ia harus menjadi desain.

Kerangka Hierarchy of Controls menempatkan pencegahan risiko dari yang paling efektif (eliminasi/substitusi) sampai yang paling akhir (APD), sehingga keselamatan dibangun di sistem—bukan diserahkan pada “kehati-hatian” individu semata (NIOSH, 2024). Dalam bahasa yang lebih manusiawi: tambang yang baik tidak berharap pekerja “selalu sempurna”; ia merancang agar satu kesalahan manusia tidak langsung menjadi tragedi.

4) Menambang adalah tanggung jawab ekologis: sejak awal sudah memikirkan akhir

Tambang bukan proyek tanpa ujung. Ia punya siklus hidup: dibuka, dioperasikan, ditutup, dipulihkan. Karena itu, reklamasi dan pascatambang seharusnya bukan “pekerjaan terakhir”, melainkan pekerjaan yang dimulai sejak hari pertama—melalui penataan lahan, pengelolaan topsoil, kontrol erosi-sedimen, manajemen

air asam tambang (bila berisiko), serta desain bentuklahan akhir.

Di Indonesia, kewajiban reklamasi dan pascatambang ditegaskan dalam aturan khusus reklamasi-pascatambang (Republic of Indonesia, 2010) dan juga terkait erat dengan kerangka perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, termasuk instrumen seperti AMDAL dan perizinan lingkungan (Republic of Indonesia, 2009; Republic of Indonesia, 2021). Pada titik ini, “bertanggung jawab” berarti: operasi tambang harus mampu menjawab dua pertanyaan sekaligus—apa yang kita ambil dan apa yang kita tinggalkan.

5) Menambang adalah relasi sosial: izin legal saja tidak cukup

Tambang hidup berdampingan dengan manusia lain: masyarakat sekitar, pekerja lokal, pemerintah daerah, pemasok, dan generasi yang kelak mewarisi lanskap pascaoperasi. Karena itu, banyak literatur menyebut pentingnya *social license to operate*—penerimaan yang terus-menerus dari komunitas dan pemangku kepentingan, yang tidak otomatis hadir hanya karena izin sudah terbit (Komnitsas, 2020). Praktik “*responsible mining*” juga menekankan bahwa kinerja lingkungan dan sosial harus diperlakukan sebagai bagian dari tata kelola, bukan sekadar pelengkap laporan (ICMM, n.d.). Dalam praktik, sisi manusiawi teknik penambangan muncul saat perusahaan mampu mengubah “operasi” menjadi “kehadiran yang bermakna”: komunikasi risiko yang jujur, mekanisme keluhan yang responsif, pembagian manfaat yang adil, serta perlindungan keselamatan kerja dan martabat pekerja—karena keberlanjutan bisnis sering kali ditentukan oleh kualitas relasi, bukan hanya kualitas bijih.

1.2 Siklus Hidup Tambang: dari “Dugaan” Menjadi “Rencana Kerja”

Banyak orang mengira tambang dimulai ketika alat berat datang. Padahal, tambang dimulai saat data masih berupa titik-titik bor, catatan geologi, dan sampel yang harus benar-benar representatif. Kesalahan kecil di tahap awal bisa menjadi biaya besar di tahap produksi (Runge, 1998).

Siklus hidup tambang umumnya meliputi:

- a) Eksplorasi & evaluasi endapan (pemodelan geologi, pengujian kadar, dan pemahaman variabilitas),
- b) Estimasi sumber daya & cadangan (dengan pendekatan geostatistik dan klasifikasi),
- c) Studi kelayakan (teknis–ekonomi–lingkungan),
- d) Pengembangan & konstruksi,
- e) Produksi, dan
- f) Penutupan tambang & pascatambang (Hartman & Mutmanský, 2002; Darling, 2011; ICMM, 2025).

Di tahap estimasi, geostatistik membantu “menerjemahkan” data titik bor menjadi gambaran blok-blok nilai kadar dan ketidakpastian—dengan teknik seperti kriging yang banyak dipakai dalam evaluasi endapan (Isaaks & Srivastava, 1989). Namun, geostatistik hanya sebaik kualitas sampelnya. Di sinilah teori sampling menjadi krusial: sampel yang bias menghasilkan model yang tampak meyakinkan, tetapi menipu keputusan (Gy, 2004).

Untuk penutupan tambang, praktik modern menekankan integrated closure planning: penutupan bukan “bab terakhir”, melainkan dirancang sejak awal agar risiko sosial–lingkungan–finansial dapat dikendalikan sepanjang umur tambang (ICMM, 2025).

1.3 Memilih Metode Tambang: Bentuk Endapan “Memilih” Tekniknya

Metode penambangan jarang diputuskan dari kalimat sederhana seperti “pakai yang alatnya ada.” Di lapangan, endapan seperti “berbicara” lewat geometri dan perilakunya: seberapa dalam ia bersembunyi, seberapa tebal, seberapa miring, seberapa rapuh batuan, seberapa agresif air tanahnya, dan seberapa ketat batas lingkungan serta sosial di atasnya. Engineer hanya menerjemahkan “bahasa endapan” itu menjadi rancangan yang aman, produktif, dan masuk akal secara ekonomi—karena tambang pada akhirnya dinilai dari arus kas dan dari seberapa kecil ia menukar keselamatan dengan target produksi (Hustrulid *et al.*, 2013; Runge, 1998).

Secara praktis, pemilihan metode biasanya ditimbang melalui beberapa kunci yang saling mengunci:

- a) Kedalaman & geometri (dangkal–dalam, tebal–tipis, sebaran lateral, kemiringan/dip).
- b) Kondisi massa batuan (kestabilan lereng/bukaan, potensi runtuh, kebutuhan penyanggaan).
- c) Selektivitas & kontrol kadar (seberapa “presisi” kita harus memilah ore vs waste).
- d) Produksi & biaya (CAPEX, OPEX, produktivitas alat, jarak angkut, jadwal).
- e) Lingkungan & jejak lahan (luas bukaan, air, debu/kebisingan, reklamasi).
- f) Keselamatan & kesehatan kerja (paparan, ventilasi, gas/debu, lalu lintas, peledakan). (Hustrulid *et al.*, 2013; Hustrulid & Bullock, 2001).

Di bawah ini pengembangan dua “keluarga besar” metode yang Anda tulis—dengan penekanan humanis: tiap metode punya “harga” dan “hadiah” yang berbeda.

1.3.1 Tambang Terbuka (*Surface / Open Pit Mining*)

Tambang terbuka cenderung dipilih ketika endapan masih relatif dekat permukaan, sebaran lateralnya luas, dan pemindahan batuan penutup (*waste/overburden*) masih bisa ditanggung oleh nilai bijihnya. Kekuatan utama open pit adalah produktivitas: alat besar, ritme cepat, kontrol operasi relatif mudah, dan akses kerja yang “terlihat” (Hustrulid *et al.*, 2013).

Namun, open pit yang baik bukan sekadar “bentuk lubang.” Ia adalah urutan keputusan:

- a) Desain lereng & jenjang (*bench*) untuk menjaga stabilitas sekaligus efisiensi penggalan.
- b) Jalan angkut (*haul road*) sebagai “urat nadi”: geometri jalan memengaruhi siklus alat, konsumsi BBM, dan risiko kecelakaan.
- c) Pushback/ tahapan pengembangan pit untuk mengatur kapan ore bernilai tinggi diekspos lebih dulu—agar arus kas tidak “sesak napas” di awal proyek.
- d) Penjadwalan (*schedule*) yang menyatukan geologi, batas alat, dan target produksi, sehingga rancangan benar-benar *workable* (Hustrulid *et al.*, 2013; Runge, 1998).

Dari sisi manusia dan lingkungan, open pit biasanya membawa jejak lahan lebih besar: bukaan pit, timbunan waste, potensi perubahan bentang alam, dan kebutuhan reklamasi yang harus direncanakan sejak awal—bukan menunggu “nanti kalau sudah mau tutup” (Hustrulid *et al.*, 2013).

1.3.2 Tambang Bawah Tanah (*Underground Mining*)

Underground umumnya menjadi pilihan ketika endapan makin dalam, stripping untuk open pit menjadi tidak ekonomis, atau ada batas lingkungan/sosial yang

membuat bukaan besar sulit diterima. Keunggulan utama bawah tanah adalah **jejak permukaan yang lebih kecil**, tetapi “biaya mental” teknisnya lebih tinggi: kestabilan bukaan, ventilasi, panas, gas, debu, dan keselamatan kerja menjadi pusat desain (Hustrulid & Bullock, 2001; McPherson, 1993).

Di bawah tanah, engineer hidup dengan bahasa yang sangat spesifik:

- a) **Rock mechanics & ground control**: batuan bukan sekadar latar; ia “aktor utama.” Salah baca struktur, tegangan in-situ, atau kualitas massa batuan bisa berujung runtuh, dilusi, dan hilangnya ore (Brady & Brown, 2006).
- b) **Penyanggaan (support)**: dari bolt, mesh, shotcrete, sampai backfill—dipilih sesuai mekanika batuan dan metode penambangan.
- c) **Ventilasi**: bukan sekadar “ada udara,” tapi desain jaringan aliran udara untuk mengendalikan panas, gas, dan polutan, sekaligus memastikan area kerja tetap aman (McPherson, 1993).

Yang menarik: “Underground mining” itu sendiri bukan satu metode tunggal. Ia adalah keluarga metode—misalnya *cut-and-fill*, *sublevel stoping*, *room-and-pillar*, sampai *block caving*—yang dipilih berdasarkan kemiringan endapan, ketebalan, kekuatan batuan, dan target produksi. Buku rujukan metode bawah tanah menekankan bahwa pemilihan metode selalu pertukaran antara **selektivitas, recovery, dilusi, produktivitas, dan risiko** (Hustrulid & Bullock, 2001).

Open pit sering unggul dalam kesederhanaan operasi dan produktivitas, tetapi menuntut pengelolaan jejak lingkungan yang besar. Underground mengurangi bukaan permukaan, tetapi menambah kompleksitas dan

tuntutan keselamatan “di ruang tertutup” yang tidak bisa ditawar (Hustrulid *et al.*, 2013; McPherson, 1993).

1.4 Operasi Utama Tambang: dari Batuan Utuh Menjadi Material Bergerak

Begitu metode dipilih, operasi tambang berubah menjadi rangkaian unit operasi yang berulang setiap hari—dan justru di repetisi itulah disiplin teknik diuji. Satu siklus yang tampak sederhana (“gali–angkut–uang”) sebenarnya adalah rantai keputusan yang saling mengunci: fragmentasi menentukan kemudahan penggalian, kemudahan penggalian menentukan cycle time alat muat, cycle time menentukan produktivitas armada, dan produktivitas menentukan biaya per ton serta napas arus kas tambang (Hustrulid *et al.*, 2013; Darling, 2011). Di lapangan, “batuan utuh menjadi material bergerak” biasanya melewati tahapan besar berikut.

1) Pemboran (*Drilling*): menyiapkan “peta retak” di dalam batuan

Pemboran adalah tahap menanamkan rencana ke dalam massa batuan: di mana lubang ditempatkan, seberapa dalam, jarak antar lubang (*burden–spacing*), dan bagaimana kontrol deviasi. Ia tampak teknis, tetapi sebenarnya sangat operasional—karena kualitas pemboran yang buruk akan “dibayar” mahal pada peledakan, penggalian, dan bahkan crushing (Hustrulid *et al.*, 2013).

2) Peledakan (*Blasting*): fragmentasi yang “tepat”, bukan fragmentasi yang “sekadar pecah”

Tujuan peledakan bukan membuat batuan hancur semaksimalnya, tetapi menghasilkan ukuran fragmen dan heave yang sesuai kebutuhan alat muat dan kapasitas peremukan. Literatur fragmentasi menekankan bahwa kualitas peledakan tercermin pada

distribusi ukuran muckpile dan dampaknya ke proses hilir—dari diggability sampai crushing energy (Babaeian *et al.*, 2019).

Di sini terlihat sisi manusiawinya: peledakan juga soal kontrol getaran, flyrock, dan keselamatan—batas aman bukan hiasan prosedur, melainkan pagar yang menjaga orang pulang dengan selamat.

3) Penggalian & Pemuatan (*Excavation/Loading*): mengubah batuan pecah menjadi “aliran material”

Setelah blast, alat gali-muat (*shovel/ excavator/ loader*) bekerja menjadikan material sebagai arus. Di tambang terbuka, pepadanan alat muat dan truk sering dirancang agar truk terisi dalam beberapa pass yang efisien—karena setiap pass tambahan menambah waktu dan biaya (National Academies, 2002; Hustrulid *et al.*, 2013).

Kontrol kadar (grade control) ikut hidup di tahap ini: memisahkan ore vs waste, mengurangi dilusi, menjaga kualitas umpan plant. Secara ekonomi, satu kesalahan pemilahan bisa berarti “tonase jalan, tapi nilai hilang.”

4) Pengangkutan (*Hauling*): logistik adalah “jantung” tambang

Hauling adalah bagian yang sering paling mahal dan paling terasa di operasional: konsumsi BBM, ban, dispatch, antrian, serta kondisi jalan angkut. Itulah kenapa haul road sering disebut urat nadi pit—geometri dan pemeliharannya langsung memengaruhi keselamatan dan biaya per ton (Hustrulid *et al.*, 2013).

5) Pembuangan & Penimbunan (*Dumping/Stockpiling*): material ditempatkan dengan rencana, bukan disingkirkan

Waste dump bukan “tumpukan sisa”, tetapi struktur geoteknik dan lingkungan: stabilitas lereng dump, pengendalian air larian, debu, dan rencana penutupan lahan. ROM stockpile bukan “parkiran ore”, tetapi alat untuk mengelola variabilitas kadar—agar plant menerima umpan yang stabil. Pendeknya: lokasi material menentukan biaya dan risiko jangka panjang, termasuk reklamasi dan pascatambang (Darling, 2011).

6) (Bila terintegrasi) Peremukan awal & penanganan material (*Primary crushing/material handling*)

Di banyak operasi, siklus tambang “menyentuh” tahap peremukan awal. Kualitas fragmentasi dan kadar air sangat memengaruhi kemacetan (*hang-up*), kebutuhan secondary breaking, dan efisiensi sistem handling—lagi-lagi menunjukkan bahwa unit operasi bukan silo, melainkan satu ekosistem (Babaeian *et al.*, 2019; Darling, 2011).

1.5 Pengolahan Mineral: Tambang Tidak Berhenti Di Rom

Di ROM (*run-of-mine*), bijih masih seperti “cerita yang belum selesai”: mineral berharga masih bercampur rapat dengan gangue, ukuran butir masih acak, kadar masih berfluktuasi, dan nilai ekonominya belum “terkunci” menjadi produk yang bisa dipasarkan. Karena itu, produk tambang jarang langsung menjadi barang jadi. Umumnya ada tahap pengolahan: peremukan, penggerusan, klasifikasi, konsentrasi, hingga pengelolaan tailing. Prinsip besarnya sederhana namun menentukan nasib tambang: memisahkan

mineral berharga dari gangue dengan cara yang efisien, aman, dan sesuai karakter bijih (Wills & Napier-Munn, 2006).

Pengolahan yang baik “menyelamatkan” nilai yang sudah susah payah diambil; pengolahan yang buruk membuat tambang seolah bekerja untuk membuang ore. Kalimat ini terasa tajam karena nyata: satu persen recovery yang hilang bisa berarti ribuan ton nilai yang tidak pernah kembali—padahal biaya menggali dan mengangkutnya sudah terbayar (Wills & Napier-Munn, 2006).

1.5.1 Dari Batuan ke Ukuran yang Bisa Dipisahkan: Comminution (*Crushing & Grinding*)

Tahap awal pengolahan biasanya dimulai dengan peremukan (*crushing*)—mengubah bongkah menjadi ukuran yang lebih kecil dan seragam. Ini bukan sekadar “memperkecil,” tetapi menyiapkan material agar proses berikutnya bekerja stabil: konveyor tidak tersendat, mill tidak “kaget,” dan klasifikasi bisa dilakukan dengan lebih presisi (Wills & Napier-Munn, 2006).

Setelah itu, penggerusan (*grinding*) melanjutkan pekerjaan yang lebih halus: membebaskan (*liberation*) mineral berharga dari ikatan gangue. Di sinilah pengolahan terasa sangat “teknik” sekaligus sangat “praktis”: terlalu kasar → mineral berharga masih terkunci; terlalu halus → energi membengkak, muncul slimes, dan pemisahan jadi sulit (Wills & Napier-Munn, 2006).

1.5.2 Klasifikasi: Memilah Ukuran Agar Proses Tidak Saling Mengganggu

Tidak semua partikel perlu digerus lebih lanjut. Karena itu sistem pengolahan memakai klasifikasi (*mis. screen, cyclone*) untuk memisahkan partikel berdasarkan ukuran/ kecepatan jatuh. Klasifikasi membuat sirkuit

penggerusan “waras”: yang masih kasar dikembalikan, yang sudah sesuai diteruskan ke proses konsentrasi (Wills & Napier-Munn, 2006).

Secara humanis, klasifikasi itu seperti disiplin belajar: bukan semua materi diulang—yang diulang adalah bagian yang memang belum “lulus ukuran.”

1.5.3 Konsentrasi: Memisahkan yang Bernilai dari yang Tidak—Dengan “Sifat Fisik/Kimia” Sebagai Kunci

Setelah ukuran dan liberasi cukup, barulah pemisahan utama dijalankan. Tekniknya bergantung pada karakter bijih, antara lain:

- a) *Gravity separation*: memanfaatkan perbedaan densitas.
- b) *Magnetic/electrical separation*: memanfaatkan respon mineral terhadap medan.
- c) *Flotation*: memanfaatkan perbedaan sifat permukaan (hidrofobik/hidrofilik) dengan reagen.
- d) *Dewatering: thickening & filtration* untuk menurunkan kadar air produk dan tailing.

Intinya, pengolahan mineral adalah seni membaca “sifat” bijih: kapan densitas bekerja, kapan magnetisme dominan, kapan flotasi paling adil, dan kapan air justru menjadi masalah utama (Wills & Napier-Munn, 2006).

1.5.4 Tailing: Bagian Terbesar yang Harus Diperlakukan Paling Serius

Setelah konsentrasi, akan tersisa tailing—material halus (sering bercampur air) yang volumenya bisa sangat besar dan bertahan jauh lebih lama daripada umur tambang. Di titik ini, pengolahan mineral bertemu langsung dengan pertanyaan etika operasi: bagaimana memastikan sisa proses tidak berubah menjadi risiko bagi manusia dan lingkungan?

Karena sejarah industri mencatat kegagalan fasilitas tailing bisa bersifat katastropik, standar global mendorong pendekatan yang menyeluruh sepanjang siklus hidup fasilitas tailing—dari perencanaan, desain, konstruksi, operasi, pemantauan, hingga penutupan (closure) dan pascatutup—dengan tujuan mencegah kegagalan dan meningkatkan keselamatan (UNEP, 2020; ICMM, 2020).

Yang penting ditekankan untuk pembaca: tailing bukan “akhir proses”, melainkan “awal tanggung jawab jangka panjang.” Tambang boleh selesai produksi, tetapi fasilitas tailing tetap menuntut pengelolaan—secara teknis, finansial, dan tata kelola—agar risiko tidak diwariskan ke generasi berikutnya (UNEP, 2020).

1.6 K3, Lingkungan, dan Tata Kelola: Tiga Hal yang Tidak Boleh Menjadi Catatan Kaki

Ada “kalimat jujur” yang sering terdengar di industri: produksi bisa dikejar, reputasi sulit dipulihkan. Di pertambangan, kalimat itu lebih keras maknanya, karena konsekuensi salah kelola bukan hanya rugi finansial, tetapi bisa menyentuh tiga hal paling sensitif: nyawa, lingkungan, dan kepercayaan publik. Maka praktik tambang modern menempatkan K3, lingkungan, dan tata kelola sebagai fondasi, bukan pelengkap—bukan sekadar “bagian HSE” di struktur organisasi, melainkan logika yang menuntun semua keputusan teknis dari desain sampai penutupan tambang.

1) Keselamatan & Kesehatan Kerja: sistem yang membuat orang pulang selamat

K3 yang dewasa tidak bergantung pada slogan “hati-hati”. Ia dibangun sebagai sistem: risiko diidentifikasi, dikendalikan, diawasi, dan diperbaiki—setiap hari. ILO, melalui Code of Practice untuk tambang terbuka,

menekankan pedoman praktis yang mencakup manajemen risiko, kompetensi pekerja, prosedur kerja aman, peran komite K3, sampai kesiapsiagaan darurat.

Jika ditarik ke tingkat manajemen, ISO 45001 memberi kerangka kerja untuk mengelola K3 secara terstruktur dan berkelanjutan: mulai dari konteks organisasi, kepemimpinan, partisipasi pekerja, perencanaan berbasis risiko dan peluang, sampai evaluasi kinerja dan perbaikan berkelanjutan. Makna praktisnya begini: K3 yang baik bukan hanya “mengurangi kecelakaan”, tetapi mendesain pekerjaan agar:

- a) Bahaya dieliminasi atau dikendalikan sejak awal (desain lereng, rute haul road, manajemen lalu lintas, interlock alat, izin kerja),
- b) Kompetensi orang dijaga (*fit-to-work*, *training*, sertifikasi operator),
- c) Sistem siap menghadapi hal yang tidak ideal (*emergency response*, komunikasi, inspeksi, pelaporan insiden dan near-miss).

Dengan cara itu, target produksi tidak berdiri di atas keberuntungan—melainkan di atas disiplin.

2) Lingkungan: izin sosial lahir dari kinerja yang konsisten, bukan dari dokumen semata

Tambang selalu berhadapan dengan media lingkungan yang “mudah tersinggung”: air, tanah, udara, keanekaragaman hayati, serta dampak sosial di sekitar operasi. Karena itu, ISO 14001 memberi kerangka *environmental management system* (EMS) untuk mengendalikan aspek lingkungan, memastikan kepatuhan, dan mendorong peningkatan kinerja secara berkelanjutan. Catatan penting (yang sering luput): ISO menyatakan ISO 14001:2015 telah ditinjau dan dikonfirmasi tetap berlaku (*current*) pada 2025, serta

memiliki setidaknya satu amendement—ini mengingatkan perusahaan bahwa standar pun hidup, bukan teks yang selesai sekali dibaca. Dalam praktik tambang, “lingkungan” bukan hanya urusan pengukuran emisi atau laporan periodik. Ia hadir di keputusan harian:

- a) Bagaimana air dikelola (*dewatering, sediment control, water balance*),
- b) Bagaimana waste dump dan stockpile ditata (erosi, sedimentasi, stabilitas),
- c) Bagaimana debu dan kebisingan ditekan,
- d) Bagaimana reklamasi dirancang sejak awal, bukan menunggu akhir umur tambang.

Di sisi sosial, praktik modern menuntut stakeholder engagement yang serius: transparan, konsisten, dan mampu menampung kekhawatiran warga tanpa defensif. ICMM—melalui kerja-kerja dan panduan sosialnya—terus menekankan pendekatan yang kolaboratif dan multistakeholder untuk memastikan manfaat tambang lebih tahan lama bagi komunitas, terutama pada fase transisi seperti penutupan tambang.

3) Tata kelola: kepatuhan itu dinamis—dan perubahan regulasi harus “terlihat” dalam operasi

Tata kelola (*governance*) adalah pengaman agar K3 dan lingkungan tidak menjadi sekadar niat baik. Di Indonesia, kerangka hukum pertambangan mineral dan batubara ditegaskan melalui UU No. 3 Tahun 2020 (perubahan atas UU 4/2009), yang mengatur aspek kunci seperti perizinan, pengelolaan, hingga kewajiban terkait operasi dan pascatambang.

Lebih operasional, PP No. 96 Tahun 2021 mengatur pelaksanaan kegiatan usaha pertambangan minerba. Yang krusial untuk perusahaan: PP 96/2021 sudah mengalami perubahan, yakni:

- PP No. 25 Tahun 2024 sebagai perubahan atas PP 96/2021,
- PP No. 39 Tahun 2025 sebagai perubahan kedua atas PP 96/2021.

Artinya, kepatuhan bukan pekerjaan “ceklist tahunan”, melainkan kemampuan organisasi untuk memastikan versi regulasi terbaru benar-benar diterjemahkan menjadi prosedur, dokumen, dan kontrol lapangan (misalnya di perencanaan kerja, pelaporan, dan perizinan operasional).

Contoh konkret dinamika ini terlihat pada aturan turunan dan teknis di level kementerian. Misalnya, JDIH ESDM mencatat adanya Permen ESDM No. 17 Tahun 2025 terkait tata cara penyusunan/penyampaian/persetujuan RKAB dan pelaporan, sekaligus mencabut atau mengubah sebagian regulasi sebelumnya.

Pada akhirnya, pengantar teknik penambangan bukan sekadar daftar istilah teknis atau katalog alat berat. Ia adalah cara berpikir: bagaimana kita mengubah ketidakpastian geologi menjadi rencana yang bisa dieksekusi, mengubah energi (alat, bahan bakar, peledakan, dan waktu) menjadi produktivitas yang terukur, serta mengubah sumber daya alam menjadi manfaat ekonomi dan sosial—tanpa menukar keselamatan manusia dan masa depan lingkungan sebagai “biaya yang dianggap wajar” (Darling, 2011; ICMM, 2025).

Jika pembaca mengingat satu hal saja dari bab pengantar ini, ingatlah: tambang yang baik bukan yang paling cepat menggali, tetapi yang paling matang merencanakan—dan paling bertanggung jawab menutupnya. Keunggulan sejati tambang modern bukan terletak pada seberapa besar tonase yang dipindahkan, melainkan pada seberapa konsisten ia menjaga tiga janji: pekerja pulang selamat, lingkungan dikelola dengan hormat, dan nilai yang diambil diimbangi dengan pemulihan yang nyata. Di situlah teknik

penambangan menemukan martabatnya: bukan hanya “mengambil”, tetapi juga memperbaiki, memulihkan, dan meninggalkan warisan yang bisa dipertanggung-jawabkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Babaeian, M., Hasanipanah, M., Koopialipoor, M., Jahed Armaghani, D., & Mesgari, S. (2019). A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines: Image analysis and statistical modeling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(1), 49–59.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: For underground mining* (3rd ed.). Springer.
- CRIRSCO. (2013). International reporting template for the public reporting of exploration results, mineral resources and mineral reserves (May 2013). Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards.
- Darling, P. (Ed.). (2011). *SME mining engineering handbook* (3rd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Dimitrakopoulos, R. (2011). Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments. *Journal of Mining Science*, 47(2), 138–150.
- Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (Eds.). (2001). *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- ICMM. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. International Council on Mining and Metals.

- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2025). Integrated mine closure: Good practice guide. ICMM.
- International Labour Organization. (2018). Safety and health in opencast mines: Code of practice. International Labour Office.
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use. ISO.
- JORC. (2012). Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves (The JORC Code) (2012 ed.). Joint Ore Reserves Committee.
- Komnitsas, K. (2020). Social license to operate in mining: Present views and future trends. *Resources*, 9(6), 79.
- McPherson, M. J. (1993). *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Springer.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2002). Technologies in exploration, mining, and processing. In *Evolutionary and revolutionary technologies for mining*. National Academies Press.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2024, April 10). Hierarchy of controls. Centers for Disease Control and Prevention.
- Republic of Indonesia, Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). Peraturan Menteri ESDM Nomor 17 Tahun 2025 (tata cara RKAB dan pelaporan kegiatan usaha pertambangan). JDIH ESDM.
- Runge, I. C. (1998). *Mining economics and strategy*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- UNEP. (2020). Global Industry Standard on Tailings Management. United Nations Environment Programme.

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (7th ed.). Butterworth-Heinemann.

BAB 2

METODE PENAMBANGAN TERBUKA (*SURFACE MINING*)

Oleh Jance Murdjani Supit

Penambangan terbuka adalah teknik penambangan yang seluruh kegiatan atau aktivitasnya dilakukan di atas atau relatif dekat dengan permukaan bumi, dan tempat kerjanya berhubungan langsung dengan udara luar. Metode ini berbeda dari penambangan bawah tanah yang memerlukan terowongan atau bukaan di bawah permukaan tanah. Dalam praktiknya, penambangan terbuka sering disukai karena efektivitas biaya dan tingkat produktivitas yang tinggi dibandingkan metode bawah tanah. Keunggulan tersebut juga didukung oleh aspek keselamatan kerja yang relatif lebih baik karena kegiatan dilakukan di ruang terbuka. Penggunaan mesin berukuran besar memungkinkan proses penambangan berlangsung secara masif dengan kebutuhan tenaga kerja yang lebih sedikit. Kondisi ini menjadikan penambangan terbuka sebagai pilihan utama dalam banyak proyek pertambangan modern. Secara global, metode ini berkembang pesat seiring kemajuan teknologi dan kebutuhan industri yang meningkat (Altiti dkk., 2021; Koščová dkk., 2018). Dengan karakteristik tersebut, penambangan terbuka memainkan peran penting dalam penyediaan sumber daya mineral bagi pembangunan ekonomi.

Sejarah penambangan terbuka dapat ditelusuri hingga peradaban kuno yang menggunakan peralatan sederhana untuk mengambil mineral dari permukaan bumi. Perkembangannya semakin signifikan pada masa revolusi industri ketika peralatan mekanis mulai diperkenalkan untuk meningkatkan efisiensi dan skala produksi (Altiti dkk., 2021). Transformasi teknologi tersebut memungkinkan kegiatan pertambangan dilakukan dalam kapasitas yang jauh lebih besar dibandingkan sebelumnya. Di Indonesia, penambangan batu bara telah dimulai sejak pertengahan abad ke-19 dan terus mengalami perkembangan. Metode penambangan terbuka menjadi semakin umum pada akhir abad ke-20 seiring meningkatnya permintaan global terhadap batu bara. Krisis minyak pada tahun 1970-an turut mendorong pergeseran perhatian terhadap batu bara sebagai sumber energi alternatif. Situasi ini memicu masuknya investasi asing yang signifikan serta ekspansi operasi penambangan terbuka di berbagai wilayah Indonesia (Murrell, 1996). Dengan demikian, perkembangan historis menunjukkan bahwa dinamika ekonomi global sangat memengaruhi penerapan metode penambangan terbuka di tingkat nasional.

Tujuan utama penambangan terbuka adalah mengekstraksi mineral dalam volume besar secara efisien untuk memenuhi kebutuhan industri dan energi (Koščová dkk., 2018). Dari sisi ekonomi, metode ini umumnya lebih murah dibandingkan penambangan bawah tanah karena biaya tenaga kerja yang lebih rendah dan pemanfaatan mesin skala besar (Koščová dkk., 2018). Selain itu, tingkat keselamatan relatif lebih baik karena pekerja tidak terpapar langsung pada risiko bawah tanah yang berbahaya (Koščová dkk., 2018). Produktivitas yang tinggi juga menjadi keunggulan utama karena peralatan yang kuat mampu menghasilkan output besar dalam waktu singkat (Cehlár & Cehlárová, 2007). Namun demikian, penambangan terbuka juga menimbulkan dampak lingkungan seperti deforestasi,

erosi tanah, serta pencemaran udara dan air. Perubahan lanskap akibat aktivitas tambang bahkan dapat meningkatkan suhu lokal, sebagaimana terjadi di Kota Bontang (Nisaa' & Fawzi, 2023). Dari sisi sosial, kegiatan ini berpotensi menyebabkan perpindahan masyarakat dan ketimpangan distribusi manfaat ekonomi (Salinas & Hernández, 2014). Oleh karena itu, diperlukan reklamasi lahan dan praktik keberlanjutan yang lebih baik agar keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan dapat terjaga (Nisaa' & Fawzi, 2023; Salinas & Hernández, 2014).

2.1 Open Pit/Open Cut Mining

Open pit/open cut mining merupakan metode penambangan terbuka yang ditandai dengan penggalian lubang bukaan besar berbentuk teras atau jenjang untuk mengekstraksi mineral dan batu bara (Gambar 2.1 dan 2.2). Metode ini sangat efektif untuk endapan dekat permukaan yang bersifat non-selektif dan berkadar rendah. Proses penambangan diawali dengan pengupasan lapisan penutup atau *overburden* untuk membuka akses menuju tubuh bijih. Desain *pit* umumnya berbentuk kerucut atau bertingkat guna memudahkan kegiatan ekstraksi dan transportasi material. Produktivitas metode ini tergolong tinggi serta menawarkan tingkat keselamatan yang lebih baik dibandingkan penambangan bawah tanah. Namun demikian, penerapannya membutuhkan investasi modal yang besar terutama untuk penyediaan alat berat dan infrastruktur tambang. Efisiensi operasi sangat dipengaruhi oleh penggunaan peralatan dan teknologi modern yang mendukung proses penggalian dan pengangkutan. Meskipun demikian, keterbatasan terkait kedalaman tambang dan kestabilan lereng tetap menjadi perhatian utama dalam perencanaan (Altiti dkk., 2021).



Gambar 2. 1 *Open Pit* di Grassberg, PT. Freeport Indonesia.

(<https://miningpress.com/top-10-mineria-energia-mundial/322390/el-top-10-de-las-minas-de-oro-mas-grandes-del-mundo>).

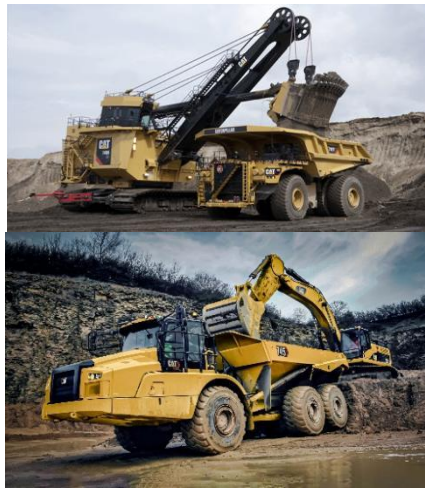


Gambar 2. 2 *Open Cut* di Mt. Arthur, BHP Australia, New South Wales.

(<https://ieefa.org/resources/nsw-coalmine-approvals-out-step>)

Dalam operasionalnya, open pit/opencut mining memanfaatkan berbagai peralatan penggalian dan pemuatan (Gambar 2.3) seperti *rope shovel*, *backhoe*, dan *hydraulic shovel*. *Rope shovel* efektif digunakan untuk mengupas

interburden, sedangkan backhoe banyak dimanfaatkan untuk mengekstraksi lapisan batu bara (Kolesnikov dkk., 2019). Material hasil penggalian kemudian diangkut menggunakan dump truck berkapasitas besar, seperti Volvo A40F *Articulated Dump Truck*, menuju fasilitas pengolahan atau disposal (Syahreza dkk., 2023). Peran alat angkut sangat krusial karena menentukan kelancaran siklus produksi tambang. Optimalisasi proses pemuatan dan pengangkutan terbukti mampu meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan. Perubahan metode pemuatan dari *bottom loading* ke *top loading*, misalnya, dapat mengurangi waktu muat dan meningkatkan volume material terangkut. Studi di PT Pacific Global Utama menunjukkan peningkatan produksi dari 49.000 ton per bulan menjadi lebih dari 57.000 ton per bulan setelah optimalisasi dilakukan (Syahreza dkk., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan peralatan yang tepat menjadi kunci keberhasilan operasi *open pit mining*.



Gambar 2. 3 Alat Gali-Muat dan Angkut

Kiri: Rope Shovel dan Dump Truck.

Kanan: Hydraulic Shovel dan Articulate Dump Truck.

(https://www.finning.com/en_GB/industries/mining.html)

Keunggulan utama *open pit mining* terletak pada efisiensi produksi dan efektivitas biaya operasional dibandingkan metode bawah tanah (Altiti dkk., 2021; Baker dkk., 1958). Lingkungan kerja yang terbuka mengurangi risiko kecelakaan yang umum terjadi pada operasi bawah tanah dan memungkinkan akses yang lebih luas terhadap tubuh bijih (Baker dkk., 1958). Metode ini juga memberikan fleksibilitas dalam pengendalian kadar dan selektivitas penambangan sesuai kondisi pasar (Baker dkk., 1958). Namun demikian, semakin dalam pit dikembangkan, biaya pengupasan overburden meningkat dan kestabilan lereng menjadi tantangan serius (Altiti dkk., 2021). Risiko longsoran highwall menuntut perencanaan geoteknik yang cermat serta pemantauan berkelanjutan. Selain itu, dampak lingkungan seperti perubahan bentang alam dan kerusakan habitat memerlukan upaya reklamasi yang terencana (Altiti dkk., 2021). Seiring menipisnya cadangan berkadar tinggi di dekat permukaan, industri menghadapi tantangan menjaga kelayakan ekonomi sekaligus memenuhi tuntutan lingkungan. Kondisi ini mendorong pengembangan metode kombinasi dan inovasi teknologi untuk meningkatkan keberlanjutan operasi *open pit mining* (Anfyorov & Kuznetsova, 2021; Beyglou, 2016).

2.2 Strip Mining

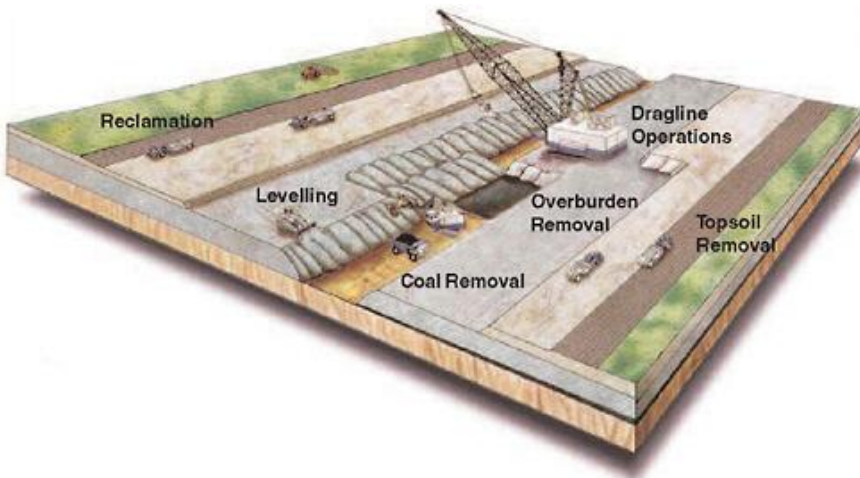
Strip mining merupakan metode penambangan yang dilakukan dengan mengupas lapisan tanah dan batuan untuk mengakses mineral atau batu bara yang berada dekat permukaan (Gambar 2.4). Teknik ini sangat efektif untuk endapan dangkal dan dikenal karena tingkat produktivitas serta efisiensinya yang tinggi. Proses penambangan dilakukan secara bertahap mengikuti penyebaran lateral dari lapisan mineral. Karakter utama metode ini adalah pengupasan *overburden* dalam jalur memanjang sehingga

membentuk area tambang yang terbuka dan luas. Karena dilakukan di permukaan, strip mining memungkinkan penggunaan alat berat berkapasitas besar. Hal ini menjadikan kegiatan ekstraksi dapat dilakukan dalam skala besar dan waktu relatif singkat. Dibandingkan metode bawah tanah, teknik ini umumnya lebih sederhana dalam pengoperasian. Namun demikian, di balik efisiensinya, strip mining juga menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan dan memerlukan pengelolaan yang cermat.

Tahapan operasional *strip mining* terdiri atas beberapa fase utama yang saling berkaitan. Tahap pertama adalah *stripping*, yaitu pengupasan *overburden* menggunakan alat berat seperti *dragline* atau *excavator* untuk membersihkan area tambang secara efisien (Stefanko dkk., 1973; Syahreza dkk., 2023). Setelah lapisan penutup disingkirkan, tahap berikutnya adalah loading, di mana mineral atau batu bara yang telah tersingkap dimuat ke alat angkut. Proses pemuatan umumnya menggunakan *excavator* dan *dump truck* untuk memindahkan material menuju fasilitas pengolahan atau langsung ke pasar (Syahreza dkk., 2023). Efektivitas koordinasi antara alat gali dan alat angkut sangat menentukan kelancaran produksi. Setelah operasi penambangan selesai, dilakukan tahap reklamasi lahan. Reklamasi mencakup pembentukan kembali kontur lahan, pengembalian *topsoil*, serta penanaman vegetasi agar lahan dapat dimanfaatkan kembali (Catlett & Boehlje, 1979; Paone dkk., 1974). Tahap ini sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan dan sering kali menjadi kewajiban hukum dalam praktik pertambangan modern.

Dari sisi keunggulan, *strip mining* dikenal memiliki produktivitas tinggi karena mampu mengekstraksi mineral dalam jumlah besar dalam waktu relatif singkat (Koščová dkk., 2018). Biaya operasionalnya juga lebih rendah dibandingkan penambangan bawah tanah karena penggunaan tenaga kerja lebih sedikit dan didukung

peralatan berskala besar (Stefanko dkk., 1973). Meskipun demikian, risiko kerusakan lingkungan menjadi isu utama dalam metode ini. Pengupasan *overburden* dapat menyebabkan degradasi lahan dan perubahan lanskap yang memengaruhi ekosistem setempat (Koščová dkk., 2018). Limpasan sedimen dan bahan kimia dari area tambang berpotensi mencemari badan air dan mengganggu kehidupan akuatik (Sekhar dkk., 2014). Selain itu, debu serta emisi alat berat dapat menurunkan kualitas udara di sekitar wilayah tambang (Sekhar dkk., 2014). Gangguan habitat juga berkontribusi terhadap hilangnya keanekaragaman hayati di area terdampak (Sekhar dkk., 2014). Oleh karena itu, keseimbangan antara manfaat ekonomi dan perlindungan lingkungan menjadi pertimbangan utama, termasuk melalui pengembangan teknologi seperti *past backfilling* untuk meningkatkan stabilitas lahan dan mengurangi dampak permukaan (Liang, 2010).



Gambar 2. 4 Ilustrasi *Strip Mining*

(<https://mineralsed.ca/learning-resources/mining101/mineral-resources/>)

2.3 Quarrying

Quarrying adalah bentuk penambangan permukaan yang melibatkan ekstraksi bahan galian seperti batu, kerikil, dan pasir dari permukaan bumi (Gambar 2.5 dan 2.6). Kegiatan ini sangat penting untuk menyediakan bahan baku bagi konstruksi, industri, dan pembangunan infrastruktur. Operasi *quarrying* ditandai dengan metode penggalian khusus, penggunaan alat berat, serta pemanfaatan hasil tambang di berbagai sektor. Bahan yang dihasilkan dari *quarrying* menjadi komponen utama dalam produksi beton, aspal, dan material konstruksi lainnya. Efisiensi operasional *quarrying* sangat bergantung pada pemilihan metode penggalian dan jenis peralatan yang digunakan. Selain itu, teknik ini juga menuntut perencanaan yang matang untuk meminimalkan kerusakan lingkungan dan mengoptimalkan produktivitas. *Quarrying* modern memanfaatkan berbagai teknologi yang dapat meningkatkan kecepatan produksi dan mengurangi biaya tenaga kerja. Dengan demikian, quarrying memainkan peran strategis dalam memenuhi kebutuhan material untuk pembangunan ekonomi dan infrastruktur (Prakash dkk., 2013).



Gambar 2. 5 Quarry (Kuari) Batu dan Pasir

(<https://mineralsed.ca/learning-resources/mining101/mineral-resources/>)



Gambar 2. 6 Quarry (Kuari) Marmer

(<https://ilmugeografi.com/geologi/daerah-penghasil-marmer-di-indonesia>)

Dalam proses penggalian, beberapa metode digunakan sesuai karakteristik batuan dan ukuran material yang diinginkan. *Surface mining* memungkinkan penambangan selektif tanpa harus melakukan peledakan, efektif untuk batuan lunak hingga sedang, serta menghasilkan produk berukuran kecil yang mempermudah pengolahan lebih lanjut (Prakash dkk., 2013). Hydraulic excavator banyak digunakan untuk kegiatan penggalian dan penanganan material, dengan konsumsi energi bervariasi tergantung jenis batuan, dari batu hasil peledakan hingga bongkahan besar (Herceg dkk., 2023). Selain itu, *hydraulic impact hammer* yang dipasang pada excavator menawarkan alternatif pemecahan batu tanpa peledakan, sangat efektif untuk aplikasi konstruksi dan industri (Anderson & Papineau, 1989). Penggunaan kombinasi alat ini memungkinkan operasi *quarrying* berjalan lebih efisien, meminimalkan waktu, dan mengurangi biaya tenaga kerja. Kinerja alat berat juga didukung oleh crusher dan conveyor untuk memecah dan memindahkan material secara cepat dalam area tambang (Cheban, 2017; Singhal, 1986). Optimalisasi proses ini sangat penting untuk

meningkatkan produktivitas serta kualitas bahan yang dihasilkan.

Produk hasil *quarrying* memiliki beragam aplikasi yang mendukung sektor konstruksi, industri, dan infrastruktur. Batu pecah dan pasir digunakan dalam pembangunan jalan, jembatan, dan gedung sebagai agregat utama untuk beton dan aspal (Nishiyama, 1994). Dalam sektor industri, bahan seperti batu kapur menjadi komponen penting dalam produksi semen, sementara mineral lainnya menjadi bahan baku berbagai proses manufaktur (Schimm dkk., 2002). Infrastruktur juga sangat bergantung pada produk *quarrying*, terutama untuk pemeliharaan dan perluasan jalan serta pembangunan fasilitas publik (Bowles, 2018). Meskipun memberikan manfaat ekonomi besar, *quarrying* menghadapi tantangan seperti dampak lingkungan dan manajemen sumber daya. Penipisan cadangan mineral berkadar tinggi memaksa industri bergantung pada deposit berkadar rendah, yang menuntut metode ekstraksi yang hemat biaya dan penggunaan mesin canggih (Sinclair, 1971). Selain itu, peningkatan biaya tenaga kerja, transportasi, dan regulasi lingkungan menjadi faktor pembatas yang perlu diperhatikan (Nishiyama, 1994). Oleh karena itu, praktik *quarrying* yang berkelanjutan dan inovasi teknologi sangat penting untuk memastikan kelangsungan operasi jangka panjang.

2.4 Placer Mining

Placer mining adalah metode penambangan yang dilakukan untuk mengekstraksi mineral berharga dari endapan aluvial, umumnya ditemukan di dasar sungai atau dataran banjir (Gambar 2.7). Metode ini terutama digunakan untuk mineral seperti emas dan timah, yang terkonsentrasi secara alami melalui proses erosi dan sedimentasi. Placer mining telah dipraktikkan sejak zaman kuno dan tetap menjadi metode penting karena biaya yang relatif rendah

serta kesederhanaannya. Kegiatan ini dapat dilakukan dalam skala kecil maupun besar, tergantung pada metode dan peralatan yang digunakan. Keunggulan metode ini adalah kemampuan untuk mengekstraksi mineral dengan cepat tanpa memerlukan penggalian tanah yang dalam. Namun, meskipun sederhana, placer mining tetap memerlukan manajemen yang baik untuk menghindari kerusakan lingkungan. Metode ini juga berperan dalam mendukung ekonomi lokal di wilayah yang kaya akan endapan alluvial. Dengan demikian, placer mining memiliki nilai historis dan kontemporer dalam industri pertambangan (Baeten, 2012; Gujar, 2007).



Gambar 2. 7 Placer Mining

(<https://www.istockphoto.com/id/foto/pertambangan-placer-modern-gm469079028-61060016>)

Terdapat beberapa metode utama dalam *placer mining*, yaitu *panning*, *sluicing*, dan *dredging*, yang masing-masing memiliki teknik operasional serta dampak lingkungan tersendiri. *Panning* adalah bentuk paling sederhana, di mana emas dipisahkan secara manual menggunakan wajan,

memanfaatkan kerapatan emas yang tinggi sehingga mengendap di dasar saat diaduk dengan air (Gujar, 2007). *Sluicing* menggunakan *sluice box* yang dialiri air untuk menangkap partikel berat seperti emas, sementara material ringan terbuang bersama aliran air. Metode ini lebih efisien dibandingkan *panning* dan dapat memproses volume material yang lebih besar (Baeten, 2012). *Dredging*, sebaliknya, menggunakan alat apung untuk menggali material dari dasar sungai, yang kemudian diproses untuk mengekstraksi emas. *Dredging* cocok untuk operasi skala besar tetapi membutuhkan investasi peralatan yang signifikan (Dudinskiy & Nechaev, 2019; Janin, 2017). Pemilihan metode bergantung pada kondisi deposit, skala operasi, dan tujuan ekonomi penambangan.

Meskipun memberikan manfaat ekonomi, placer mining menimbulkan berbagai tantangan lingkungan yang perlu dikelola dengan baik. Proses penambangan dapat meningkatkan erosi dan sedimentasi di sistem sungai karena penghilangan vegetasi dan tanah yang menstabilkan tebing sungai (Nelson, 2011). Manajemen aliran air yang efektif menjadi penting untuk mengurangi sedimentasi berlebih dan memastikan air yang digunakan dalam proses ditangani sebelum dikembalikan ke lingkungan (Guyot & Herail, 1989). Selain itu, penggunaan bahan kimia seperti merkuri dalam proses amalgamasi emas dapat mencemari sumber air dan menimbulkan risiko bagi ekosistem serta kesehatan manusia (Wanty dkk., 1999). Sejak masa keemasan penambangan emas, *placer mining* telah mempengaruhi ekonomi dan lanskap lokal, termasuk wilayah Fraser River di Kanada dan Fairbanks di Alaska (Baeten, 2012; Nelson, 2011). Saat ini, praktik berkelanjutan semakin ditekankan untuk meminimalkan dampak negatif, dengan teknologi modern dan regulasi ketat yang membantu mengurangi jejak lingkungan. Namun, penelitian dan inovasi terus diperlukan

untuk meningkatkan keberlanjutan operasi *placer mining* (Tolksdorf dkk., 2020).

2.5 Mountaintop Removal Mining

Mountaintop removal mining (MTR) adalah metode penambangan batu bara yang kontroversial, di mana puncak gunung secara keseluruhan digali dan materialnya dipindahkan untuk mengakses lapisan batubara yang berada dekat permukaan (Gambar 2.8). Metode ini banyak diterapkan di wilayah Central Appalachian dan dikenal karena dampak lingkungan dan sosialnya yang sangat signifikan. Proses MTR dimulai dengan penggunaan bahan peledak untuk meledakkan puncak gunung hingga kedalaman mencapai 300 meter, sehingga lapisan batubara dapat terekspos untuk diekstraksi menggunakan alat berat (Burns & Shirley, 2005; Miller & Zegre, 2014). Material penutup atau overburden yang dihasilkan dari peledakan kemudian diangkut dan ditimbun di lembah terdekat, suatu praktik yang dikenal sebagai „*valley fill*“. Proses ini mengubah topografi wilayah secara drastis dan dapat menghancurkan aliran anak sungai di sekitarnya (Maxwell & Strager, 2013; Nippgen dkk., 2017). Penghilangan *overburden* merupakan tahap kritis karena memungkinkan ekstraksi batubara yang sebelumnya tidak dapat dijangkau. Penggunaan alat berat besar seperti *dragline* telah diterapkan sejak 1980-an untuk meningkatkan efisiensi penambangan (Burns & Shirley, 2005; Cook & Kelly, 1976).



Gambar 2. 8 Mountaintop Removal Mining

(<https://appvoices.org/end-mountaintop-removal/mtr101/>)

Dampak lingkungan MTR sangat besar dan mencakup hilangnya vegetasi secara luas akibat deforestasi. Hutan kayu keras yang sebelumnya menyelimuti puncak gunung diubah menjadi lanskap terfragmentasi, yang berdampak negatif terhadap ekosistem lokal dan keanekaragaman hayati (Burns & Shirley, 2005; Maxwell & Strager, 2013). Perubahan topografi yang dihasilkan dari „penyingkiran“ gunung dan penimbunan limbah juga memengaruhi hidrologi lokal. Perubahan ini dapat meningkatkan limpasan air permukaan dan mengubah pola aliran sungai (Miller & Zegre, 2014; Ross dkk., 2016). Selain itu, material *overburden* yang mengandung logam berat dan polutan lainnya dapat mencemari badan air di sekitar lokasi penimbunan, sehingga kualitas air menurun dan ekosistem akuatik terganggu (Lutz dkk., 2013; Nippgen dkk., 2017). Dampak ini menimbulkan tantangan besar bagi kelestarian lingkungan dan keberlanjutan wilayah terdampak.

Meskipun MTR efektif dalam meningkatkan produktivitas ekstraksi batubara, metode ini menuai kritik luas dari perspektif sosial dan kesehatan. Masyarakat yang tinggal di dekat lokasi penambangan dilaporkan mengalami peningkatan kasus cacat lahir dan penyakit kronis akibat paparan lingkungan yang tercemar (Bozzi, 2012). Selain itu, manfaat ekonomi yang dihasilkan dari penambangan sering kali tidak dinikmati oleh komunitas lokal, karena keuntungan finansial biasanya tidak diinvestasikan kembali ke wilayah tersebut (Bozzi, 2012). Praktik MTR tetap berlangsung di Appalachia, meskipun menimbulkan kontroversi besar. Situasi ini menekankan pentingnya pengembangan alternatif penambangan yang lebih berkelanjutan. Kebijakan dan regulasi yang lebih ketat juga diperlukan untuk mengurangi dampak lingkungan dan sosial dari metode ini. Dengan demikian, meskipun MTR efisien, keberlanjutan dan tanggung jawab sosial tetap menjadi isu krusial dalam penerapannya.

2.6 Highwall Mining

Highwall mining adalah metode penambangan semi-terbuka yang menggabungkan teknik penambangan permukaan dan bawah tanah, menggunakan continuous miner untuk mengekstraksi batubara dari lapisan yang terekspos di dasar operasi *open-pit* atau *strip mining* (Gambar 2.9). Metode ini sangat efektif diterapkan di bekas area *strip mining*, karena memungkinkan ekstraksi sisa cadangan batubara tanpa perlu penggalian penuh. Keunggulan utama highwall mining terletak pada peningkatan efisiensi produksi dan keselamatan kerja dibandingkan metode konvensional. Proses ini memungkinkan pemulihan cadangan batubara yang sebelumnya tidak ekonomis untuk ditambang menggunakan teknik tradisional. Dengan demikian, highwall mining menjadi alternatif yang ekonomis dan ramah

lingkungan, terutama ketika area permukaan sudah mencapai batas ekonomi. Metode ini juga memungkinkan pemanfaatan cadangan residual, sehingga produksi batubara dapat ditingkatkan tanpa perlu membuka lahan tambahan. Selain itu, *highwall mining* meminimalkan gangguan permukaan dan risiko terhadap pekerja. Secara keseluruhan, metode ini menawarkan kombinasi efisiensi, keamanan, dan pengelolaan lingkungan yang lebih baik (Matsui dkk., 2001; Mo dkk., 2016).



Gambar 2. 9 Ilustrasi *Highwall Mining*

(https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-Highwall-Mining-wwwprwebcom-releases-2008-06-prweb992884htm_fig1_266732695)

Dalam pelaksanaannya, *highwall mining* dilakukan dengan membuat serangkaian terowongan paralel ke dalam lapisan batubara dari dasar *highwall* menggunakan *continuous miner* atau mesin auger. Teknik ini memungkinkan penambangan lapisan batubara yang sulit dijangkau atau tidak ekonomis melalui metode tradisional (Matsui dkk., 2001; Mo dkk., 2016). Metode ini sangat berguna di area yang telah mencapai batas ekonomi penambangan permukaan, sehingga cadangan tambahan dapat diekstraksi dengan produktivitas tinggi. Penerapan *highwall mining* di bekas area strip mining juga mengurangi

biaya penggalian penuh dan dampak lingkungan yang biasanya terkait dengan penambangan skala besar (Anfyorov & Kuznetsova, 2021; Sasaoka dkk., 2013). Keuntungan lain adalah metode ini dapat diterapkan di wilayah dengan kondisi geologi lemah, di mana penambangan konvensional berisiko menimbulkan ketidakstabilan lereng (Sasaoka dkk., 2013). Dengan melakukan penambangan langsung dari *highwall*, sisa cadangan batubara dapat dimanfaatkan secara maksimal. Hal ini memberikan nilai ekonomi tambahan tanpa perlu memperluas area tambang. Efisiensi operasional dan pengurangan dampak lingkungan menjadi salah satu alasan metode ini semakin banyak diterapkan.

Keunggulan *highwall mining* tidak hanya dari segi produktivitas, tetapi juga keselamatan kerja. Metode ini memungkinkan ekstraksi batubara dengan gangguan permukaan minimal dan rasio stripping rendah, sehingga biaya operasi berkurang dan tingkat pemulihan batubara meningkat (Mo dkk., 2016; Wang & Zhang, 2019). Beberapa operasi melaporkan rasio pemulihan sisa cadangan batubara hingga lebih dari 67% (Wang & Zhang, 2019). Tingkat fatalitas pada *highwall mining* relatif rendah, setara dengan penambangan permukaan, dengan perhatian utama pada stabilitas *highwall* yang dikelola melalui desain dan pemantauan geoteknik yang cermat (Zipf & Bhatt, 2004). Penggunaan teknologi remote control dan sistem otomatis juga meningkatkan keselamatan dengan mengurangi kebutuhan kehadiran pekerja di area berbahaya (Wang & Zhang, 2019). Meski memiliki banyak keunggulan, metode ini tetap menghadapi tantangan, terutama terkait kestabilan *highwall* dan integritas pilar batubara. Kondisi geologi seperti adanya patahan atau batuan lemah dapat membatasi efektivitas metode ini, sehingga diperlukan tindakan tambahan untuk menjaga keamanan dan stabilitas (Matsui dkk., 2001; Prakash dkk., 2015). *Highwall mining* tetap menjadi metode penting untuk mengekstraksi batubara dari

area yang sulit dijangkau, menawarkan keseimbangan antara efisiensi, keselamatan, dan pertimbangan lingkungan.

2.7 Dredging

Dredging adalah metode penambangan yang menggunakan peralatan khusus untuk menggali material seperti pasir, kerikil, atau mineral dari lingkungan bawah air seperti sungai, danau, atau rawa (Gambar 2.10). Teknik ini sangat penting untuk berbagai aplikasi, termasuk konstruksi, reklamasi pantai, dan pemeliharaan jalur pelayaran. Proses *dredging* memungkinkan ekstraksi sumber daya yang efisien sekaligus mendukung pembangunan infrastruktur, tetapi juga menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan. Aktivitas ini memerlukan perencanaan dan pengelolaan yang cermat agar dampak negatif terhadap ekosistem air dapat diminimalkan. Penggunaan alat berat dan teknologi modern mempermudah penggalian material sekaligus meningkatkan produktivitas operasi. *Dredging* juga memungkinkan akses ke deposit material yang sulit dijangkau melalui metode penambangan darat. Meski manfaat ekonomi dan infrastruktur jelas, keseimbangan dengan konservasi lingkungan tetap menjadi prioritas utama. Oleh karena itu, pengawasan dan strategi mitigasi dampak menjadi bagian integral dari operasi *dredging* (Herbich, 1992; Li dkk., 2022).



Gambar 2. 10 Dredging

(<https://artpictures.club/autumn-2023.html>).

Terdapat berbagai jenis *dredger* yang digunakan tergantung karakteristik material dan lokasi penambangan. *Cutter Suction Dredgers* (CSD) menggunakan kepala pemotong berputar untuk melonggarkan material di dasar perairan, kemudian disedot melalui pipa hisap. CSD efektif untuk material keras dan sering digunakan dalam proyek konstruksi dan pemeliharaan pelabuhan (Herbich, 1992; Li dkk., 2022). Bucket dredger memanfaatkan rantai ember berkelanjutan untuk mengambil material dari dasar sungai, yang sangat berguna di lembah sungai dan memiliki sejarah panjang di wilayah seperti Victoria, Australia (Davies dkk., 2018). Sementara itu, *hopper dredger* adalah kapal yang mengumpulkan material hasil penggalian ke dalam *hopper besar*, ideal untuk *dredging* di perairan terbuka dan pemeliharaan pelabuhan (Herbich, 1992). Setiap jenis dredger memiliki prinsip kerja dan efisiensi tersendiri, serta dampak lingkungan yang berbeda. Pemilihan jenis dredger harus mempertimbangkan kondisi lokasi, tujuan proyek, dan upaya mitigasi terhadap ekosistem air. Penggunaan teknologi

yang tepat dapat mengurangi gangguan terhadap habitat akuatik dan sedimentasi berlebih.

Dredging menimbulkan berbagai tantangan lingkungan yang perlu dikelola dengan baik. Aktivitas ini dapat meningkatkan sedimentasi, yang memengaruhi kejernihan air dan menutupi habitat akuatik (Elsaeed, 2011). Suspensi material dapat melepaskan kontaminan seperti logam berat dan nutrisi ke dalam kolom air, yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi dan masalah kualitas air lainnya (Elsaeed, 2011). Perubahan karakteristik fisik perairan akibat dredging dapat memengaruhi pola sirkulasi dan transportasi sedimen, yang berdampak pada habitat dan parameter kualitas air seperti kadar oksigen terlarut (Elsaeed, 2011). Untuk mengurangi dampak ini, teknologi dredging modern dikembangkan agar lebih efisien dan ramah lingkungan, misalnya dengan meminimalkan kekeruhan air dan meningkatkan efektivitas pengangkatan material (Elsaeed, 2011). Kerangka regulasi yang kuat juga diperlukan, termasuk penilaian lingkungan dan pemantauan yang ketat, meskipun sering terdapat kesenjangan antara pengetahuan ilmiah dan praktik regulasi (Elsaeed, 2011). Dengan menggabungkan teknologi canggih, pengawasan yang tepat, dan kolaborasi antara industri dan komunitas ilmiah, praktik dredging dapat dilakukan secara lebih berkelanjutan. Keseimbangan antara ekstraksi sumber daya, pembangunan infrastruktur, dan konservasi lingkungan menjadi kunci keberhasilan metode ini.

2.8 Faktor Penentu Pemilihan Metode Penambangan

Pemilihan metode penambangan merupakan proses pengambilan keputusan yang kompleks, dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti geologi, ekonomi, lingkungan, dan sosial. Setiap faktor memiliki peran penting dalam

menentukan metode yang paling tepat untuk mengekstraksi sumber daya mineral secara efisien dan berkelanjutan. Integrasi alat bantu pengambilan keputusan, seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP), PROMETHEE, dan pendekatan logika fuzzy, terbukti meningkatkan kualitas keputusan dengan mengevaluasi faktor-faktor ini secara sistematis (Bitarafan & Ataei, 2004; Bogdanovic dkk., 2012; Jian, 2009). Faktor geologi menjadi dasar utama karena secara langsung memengaruhi kelayakan dan keselamatan operasi penambangan. Kondisi batuan, termasuk kekuatan dan stabilitasnya, menentukan metode yang dapat digunakan. Kedalaman deposit mineral juga memengaruhi pilihan antara metode permukaan atau bawah tanah, sementara kemiringan lapisan mineral dapat menentukan teknik yang paling sesuai (Afradi dkk., 2021; Mutambo dkk., 2022).

Faktor ekonomi menjadi pertimbangan penting untuk memastikan profitabilitas dan keberlanjutan operasi. Biaya produksi, termasuk tenaga kerja, peralatan, dan energi, menjadi salah satu pertimbangan utama. Metode yang mampu meminimalkan biaya sekaligus memaksimalkan output biasanya lebih disukai (Peskens, 2013). Selain itu, fluktuasi harga komoditas dapat memengaruhi kelayakan ekonomi metode tertentu, sehingga metode yang fleksibel terhadap perubahan harga logam atau mineral lebih diutamakan (Peskens, 2013). Skala operasi juga memengaruhi pemilihan metode, karena operasi besar dapat memanfaatkan ekonomi skala sehingga beberapa metode menjadi lebih efektif secara biaya (Namin dkk., 2009). Pertimbangan ekonomi ini harus seimbang dengan faktor teknis dan lingkungan agar penambangan tetap berkelanjutan. Keputusan yang diambil tanpa mempertimbangkan aspek ekonomi dapat berisiko menimbulkan kerugian finansial bagi perusahaan.

Faktor lingkungan dan sosial semakin menjadi perhatian utama dalam pemilihan metode penambangan. Dampak terhadap ekosistem, seperti kerusakan habitat dan pencemaran, harus dievaluasi secara cermat. Metode yang mampu meminimalkan kerusakan lingkungan biasanya lebih diutamakan (Ooriad dkk., 2018). Kepatuhan terhadap regulasi pemerintah dan standar lingkungan menjadi syarat wajib, karena peraturan dapat menentukan metode penambangan yang diperbolehkan (Afradi dkk., 2021). Selain itu, penerimaan masyarakat sekitar tambang menjadi faktor penting, termasuk dukungan komunitas dan potensi dampak sosial. Keterlibatan dengan komunitas lokal dan upaya untuk menanggapi kekhawatiran mereka dapat memengaruhi pilihan metode (Ooriad dkk., 2018). Seiring dengan perkembangan teknologi dan perubahan regulasi, kelayakan dan daya tarik metode tertentu dapat berubah dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, penggunaan alat pengambilan keputusan multi-kriteria membantu menghasilkan evaluasi yang komprehensif dan keputusan yang lebih adaptif.

2.9 Perkembangan Metode Penambangan Terbuka

Perkembangan metode penambangan terbuka telah mengalami transformasi signifikan dari tenaga kerja manual menuju integrasi teknologi canggih, termasuk penggunaan alat berat, otomasi, dan sistem digital. Awalnya, penambangan terbuka bergantung pada tenaga manusia untuk menggali dan memindahkan material, namun kemunculan peralatan mekanis seperti *haul truck* dan *excavator* meningkatkan kapasitas produksi serta efisiensi operasi secara drastis (Ghose, 2008). Seiring waktu, otomasi dan teknologi kecerdasan buatan (AI) semakin diterapkan untuk mengoperasikan mesin secara remote dan otonom. Penerapan teknologi ini tidak hanya mengurangi keterlibatan

manusia di area berbahaya, tetapi juga meningkatkan keselamatan kerja (Alem dkk., 2012; Leung dkk., 2024). Transformasi ini menandai pergeseran industri pertambangan menuju era yang lebih efisien dan produktif, sekaligus memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih optimal. Dengan teknologi digital, pengawasan dan analisis data tambang dapat dilakukan secara *real-time*, meningkatkan pengambilan keputusan dan respons terhadap kondisi lapangan. Pengembangan ini juga membuka jalan bagi penerapan praktik pertambangan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Secara keseluruhan, mekanisasi dan digitalisasi menjadi fondasi penting bagi evolusi metode penambangan terbuka modern.

Tren inovasi terbaru dalam penambangan terbuka fokus pada integrasi sistem digital, AI, dan teknologi Industry 4.0 untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi. Penggunaan model AI memungkinkan prediksi dan pengurangan konsumsi energi, khususnya pada *haul truck*, sehingga emisi gas rumah kaca dan penggunaan bahan bakar dapat diminimalkan (Soofastaei, 2018; Soofastaei & Fouladgar, 2022). Selain itu, *drone* atau UAV digunakan untuk survei dan pemantauan lokasi tambang secara *real-time*, memberikan data yang akurat untuk mendukung pengambilan keputusan (Jacobs, 2017). Implementasi sistem cyber-fisik dan *Internet of Things* (IoT) juga mendukung terciptanya Surface Mining 4.0 (Gambar 2.11) di mana operasi tambang dapat dijalankan lebih efisien dan produktif (Zhironkin & Taran, 2023). Penggunaan teknologi ini membantu mengefektifkan peralatan, memantau kondisi lapangan, dan mengoptimalkan jadwal produksi. Dengan dukungan digitalisasi, operator tambang dapat merespons perubahan kondisi secara cepat dan akurat. Tren inovasi ini menunjukkan arah masa depan penambangan terbuka yang semakin otomatis, terintegrasi, dan berbasis data. Penerapan teknologi Industry 4.0 menjadi

strategi penting untuk menghadapi tantangan produksi dan keberlanjutan.



Gambar 2. 11 Ilustrasi Pemanfaatan IoT pada *Surface Mining*

(<https://deriota.com/news/read/1336/transformasi-digital-di-industri-pertambangan-peran-iot-dalam-revolusi-smart-mining.html>)

Selain efisiensi dan produktivitas, perkembangan penambangan terbuka modern menekankan aspek keberlanjutan dan pengurangan dampak lingkungan. Penggunaan AI terbukti meningkatkan efisiensi energi, dengan studi kasus menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 12% pada beberapa jenis peralatan (Soofastaei & Fouladgar, 2022). Praktik pertambangan modern juga berfokus pada pengelolaan sumber daya yang lebih baik dan meminimalkan gangguan lahan untuk mengurangi dampak lingkungan (Myaskov dkk., 2020; Soofastaei, 2018) (Myaskov *et al.*, 2020; Soofastaei, 2018). Inisiatif „*green mining*“ mendorong penggunaan energi terbarukan serta teknologi ramah lingkungan untuk menekan jejak karbon operasi tambang (Zhironkin & Szurgacz, 2022). Meskipun demikian, tantangan tetap ada, terutama terkait investasi besar dan kebutuhan peningkatan keterampilan

tenaga kerja untuk mengoperasikan teknologi baru. Industri pertambangan juga harus terus memperhatikan dampak sosial dan lingkungan, khususnya saat membuka area yang kompleks dan sensitif. Inovasi berkelanjutan dan fokus pada efisiensi energi menjadi kunci agar penambangan terbuka dapat memenuhi tuntutan masa depan. Dengan kombinasi teknologi canggih dan praktik ramah lingkungan, metode penambangan terbuka modern dapat mencapai produktivitas tinggi sekaligus meminimalkan dampak ekologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Afradi, A., Alavi, I., & Moslemi, M. (2021). *Selecting the best mining method using analytical and numerical methods*. 6(3), 403–415.
<https://doi.org/10.1007/S43217-021-00063-6>
- Alem, L., Caris, C., Einicke, G. A., Gipps, I., Haustein, K., Hoehn, K., Huang, T., James, C., Malos, J., Munday, L., Poropat, G., Ralston, J. C., Stepanas, K., Strange, A. D., & Widzyk-Capehart, E. (2012). *CSIRO's technological innovations towards the mining industry's sustainable future*. 4, 38–45.
<https://publications.csiro.au/rpr/pub?pid=csiro:EP124884&sb=RECENT&%20craig>
- Altiti, A. H., Al-Rawashdeh, R., & Alnawafleh, H. M. (2021). *Open Pit Mining*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.92208>
- Anderson, J. T., & Papineau, W. N. (1989). *Rock Excavation with Boom Mounted Hydraulic Impact Hammers*. 418–431.
<https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0060979>
- Anfyorov, B. A., & Kuznetsova, L. V. (2021). *Geotechnological structure of a combined opencast and underground mining method in the condition of integrated development of coal deposits*. 823(1), 12001.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/823/1/012001>
- Baeten, J. (2012). *The technology, mining methods and landscapes of a placer mining district in Fairbanks, Alaska, 1900-1930*.
<https://doi.org/10.37099/MTU.DC.ETDS/305>
- Baker, D. D., Toole, R. H., Bemis, F. A., Hill, D. R., & Lindblom, R. A. (1958). *Open-cut mining of uranium ore in the*

western united states.
<http://www.osti.gov/scitech/biblio/4306785-open-cut-mining-uranium-ore-western-united-states>

Beyglou, A. (2016). *On the Operational Efficiency in Open Pit Mines.* <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1033097>

Bitarafan, M., & Ataei, M. (2004). Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(9), 493–498.
<https://www.saimm.co.za/Journal/v104n09p493.pdf>

Bogdanovic, D., Nikolić, D., & Ilić, I. (2012). Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 84(1), 219–233.
<https://doi.org/10.1590/S0001-37652012000100023>

Bowles, O. (2018). *Sandstone Quarrying in the United States.* <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12330/>

Bozzi, L. (2012). *Beyond Mountaintop Removal: Pathways for Change in the Appalachian Coalfields.* 4(1), 115–140.
<https://scholarship.law.duke.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=dfisc>

Burns, S., & Shirley, L. (2005). *Bringing down the mountains: the impact of mountaintop removal surface coal mining on southern West Virginia communities, 1970-2004.* <https://doi.org/10.33915/ETD.2310>

Catlett, L. B., & Boehlje, M. (1979). Strip-mine reclamation laws and regional cost implications. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 11(1), 157–161.
<https://doi.org/10.1017/S0081305200014898>

- Cehlár, M., & Cehlárová, I. (2007). *Cut winnings methods of an open-pit mine development*.
- Cheban, A. Yu. (2017). *Improving the extraction-and-loading process in the open mining operations*. 57–59.
<https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-57-59>
- Cook, F., & Kelly, W. (1976). *Evaluation of current surface coal mining overburden handling techniques and reclamation practices. Final report*.
- Davies, P., Lawrence, S., Turnbull, J., Rutherford, I., Grove, J., & Sylvester, E. (2018). The environmental history of bucket dredging in Victoria. *Journal of Australasian Mining History*, 16, 59.
<https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=050892349322731;res=IELENG>
- Dudinskiy, F. V., & Nechaev, K. B. (2019). *Placer deposit mining method justification*. 229(1), 12013.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012013>
- Elsaeed, G. H. (2011). *The Impact of Dredging on Coastal Environments*.
- Ghose, A. K. (2008). New technology for surface mining in the 21st century - emerging role for surface miners. *International Conference on Multimedia Information Networking and Security*, 56.
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21085067>
- Gujar, A. R. (2007). *Heavy mineral placers*.
https://drs.nio.org/drs/bitstream/handle/2264/759/Refresher_Course_Mar_Geol_Geophys_2007_Lecture_Notes_32.pdf;sequence=2
- Guyot, J. L., & Herail, G. (1989). Placer mining operations and modifications of the physical chemical nature of the waters of the Rio Kaka drainage basin (Andes, Bolivia). *IAHS-AISH publication*, (184), 115–121.

- Herbich, J. B. (1992). *Handbook of Dredging Engineering*.
<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA26023027>
- Herceg, V., Klanfar, M., Herceg, K., & Domitrović, D. (2023). Specific energy consumption of material handling by excavator in the quarrying of crushed stone. *The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin*, 38(1), 83–92. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.1.8>
- <https://appvoices.org/end-mountaintop-removal/mtr101/>
- <https://artpictures.club/autumn-2023.html>
- <https://deriota.com/news/read/1336/transformasi-digital-di-industri-pertambangan-peran-iot-dalam-revolusi-smart-mining.html>
- <https://ieefa.org/resources/nsw-coalmine-approvals-out-step>
- <https://ilmugeografi.com/geologi/daerah-penghasil-marmer-di-indonesia>
- <https://mineralsed.ca/learning-resources/mining101/mineral-resources/>
- <https://miningpress.com/top-10-mineria-energia-mundial/322390/el-top-10-de-las-minas-de-oro-mas-grandes-del-mundo>
- https://www.finning.com/en_GB/industries/mining.html
- <https://www.istockphoto.com/id/foto/pertambangan-placer-modern-gm469079028-61060016>
- https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-Highwall-Mining-wwwprwebcom-releases-2008-06-prweb992884htm_fig1_266732695
- Jacobs, J. (2017). *Creating a technology map to facilitate the process of modernisation throughout the mining cycle*.
<https://repository.up.ac.za/handle/2263/61296>

- Janin, C. (2017). *Gold Dredging in the United States*. <https://www.amazon.com/Dredging-United-States-Classic-Reprint/dp/1331938848>
- Jian, C. (2009). Choosing Mining Method Based on Fuzzy Decision and Analytic Hierarchy Process. *Journal of Wuhan University of Technology*.
- Kolesnikov, V., Katsubin, A., Martyanov, V., & Dobrov, A. (2019). *Features of the Excavation and Loading Equipment of Various Types in the Development of Inclined and Steep Beds*. 105, 1023. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/201910501023>
- Koščová, M., Hellmer, M., Anyona, S., & Gvozdkova, T. (2018). Geo-Environmental Problems of Open Pit Mining: Classification and Solutions. *E3S Web of Conferences*, 41. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101034>
- Leung, R., Hill, A. J., & Melkumyan, A. (2024). *Automation and AI Technology in Surface Mining With a Brief Introduction to Open-Pit Operations in the Pilbara*. <https://doi.org/10.1109/MRA.2023.3328457>
- Li, J., Shi, Y., Rao, K. U., Zhao, K., Xiao, J., Xiong, T., Huang, Y., & Huang, Q. (2022). The Design and Analysis of Double Cutter Device for Hinge and Suction Dredger Based on Feedback Control Method. *Applied Sciences*, 12(8), 3793. <https://doi.org/10.3390/app12083793>
- Liang, L. (2010). Strip Mining Technology with Paste Backfilling. *Coal science and technology*. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-MTKJ201002006.htm
- Lutz, B. D., Bernhardt, E. S., & Schlesinger, W. H. (2013). The Environmental Price Tag on a Ton of Mountaintop Removal Coal. *PLOS ONE*, 8(9). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0073203>

- Matsui, K., Shimada, H., Kramadibrata, S., & Rai, M. S. (2001). *Some Considerations of Highwall Mining Systems in Coal Mines*.
https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/a54486317b6dde9_ek.pdf
- Maxwell, A. E., & Strager, M. P. (2013). Assessing landform alterations induced by mountaintop mining. *Natural Science*, 2013(2), 229–237.
<https://doi.org/10.4236/NS.2013.52A034>
- Miller, A. J., & Zegre, N. (2014). Mountaintop Removal Mining and Catchment Hydrology. *Water*, 6(3), 472–499.
<https://doi.org/10.3390/W6030472>
- Mo, S., Zhang, C., Canbulat, I., & Hagan, P. C. (2016). *A Review of Highwall Mining Experience and Practice*.
<https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2300&context=coal>
- Murrell, F. J. (1996). Coal mining in Indonesia. *Mining Engineering*, 48.
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/408119>
- Mutambo, V., Kangwa, S., & Fisonga, M. (2022). Mining method selection for extracting moderately deep ore body using analytical hierarchy process at mindola sub- vertical shaft, Zambia. *Cogent engineering*, 9(1).
<https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2062877>
- Myaskov, A., Temkin, I., Deryabin, S., & Marinova, D. (2020). *Factors and Objectives of Sustainable Development at the Implementation of Digital Technologies and Automated Systems in the Mining Industry*. 174, 4023.
<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202017404023>
- Namin, F. S., Shahriar, K., Bascetin, A., & Ghodsypour, S. H. (2009). Practical applications from decision-making techniques for selection of suitable mining method in Iran. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-mineral*

- Resources Management*, 57–77.
<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPZ1-0053-0021>
- Nelson, A. D. (2011). *The environmental history and geomorphic impact of 19th century placer mining along Fraser River, British Columbia*.
<https://doi.org/10.14288/1.0071772>
- Nippgen, F., Ross, M. R. V, Bernhardt, E. S., & McGlynn, B. L. (2017). Creating a More Perennial Problem? Mountaintop Removal Coal Mining Enhances and Sustains Saline Baseflows of Appalachian Watersheds. *Environmental Science & Technology*, 51(15), 8324–8334. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.7B02288>
- Nisaa', R. M., & Fawzi, N. I. (2023). Open-pit coal mining exacerbates urban heat island in Bontang City, Indonesia. *IOP conference series*, 1190(1), 12039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1190/1/012039>
- Nishiyama, T. (1994). Crushed Stone Resources and the Subjects of its Mining. *Journal of Mmij*, 110(13), 35–40.
- Ooriad, F. A., Yari, M., Bagherpour, R., & Khoshouei, M. (2018). *The development of a novel model for mining method selection in a fuzzy environment; case study: tazareh coal mine, semnan province, iran*. 33(1), 45–53. <https://doi.org/10.17794/RGN.2018.1.6>
- Paone, J., Morning, J. L., & Giorgetti, L. (1974). *Land utilization and reclamation in the mining industry, 1930–1971*. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/5373705>
- Peskens, T. W. (2013). *Underground mining method selection and preliminary techno-economic mine design for the Wombat orebody, Kylylahti deposit, Finland*. <https://repository.tudelft.nl/>

islandora/object/uuid%3A77005b40-e79f-479f-aa68-5a197a310c56

- Prakash, A., Murthu, V., Mallika, R., Singh, K., & Bahadur. (2013). *Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects*. (1).
- Prakash, A., Singh, K. B., & Kumar, A. (2015). *Highwall mining: a critical appraisal*. <http://cimfr.csircentral.net/1618/>
- Ross, M. R. V, McGlynn, B. L., & Bernhardt, E. S. (2016). Deep Impact: Effects of Mountaintop Mining on Surface Topography, Bedrock Structure, and Downstream Waters. *Environmental Science & Technology*, 50(4), 2064–2074. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B04532>
- Salinas, E. S., & Hernández, Ma. Ma. L. O. (2014). *Escenario ambientales y sociales de la minería a cielo abierto*. 10(20), 27–34. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4733822>
- Sasaoka, T., Hamanaka, A., Shimada, H., Matsui, K., Takamoto, H., Meechumna, P., & Laowattanabandit, P. (2013). *Study on Application of Highwall Mining System under Weak Geological Condition in Thailand*.
- Schimm, B., Veith, G., & Baker, R. B. C. (2002). Easy mining durch Surface Miner im Zementsektor. *Zkg International*, 55(12), 34–39.
- Sekhar, B. C., Raju, S. S., & Kotaiah, B. (2014). Environmental Aspects of Iron ORE Mining. *IJESRTJOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY*. <http://ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archives-2014/August-2014/10.pdf>

- Sinclair, J. (1971). *Quarrying Opencast and Alluvial Mining*.
https://openlibrary.org/books/OL27993595M/Quarrying_Opencast_and_Alluvial_Mining
- Singhal, R. K. (1986). *Surface mining: equipment selection and use are the keys to profits*.
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5949917>
- Soofastaei, A. (2018). *The Application of Artificial Intelligence to Reduce Greenhouse Gas Emissions in the Mining Industry*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.80868>
- Soofastaei, A., & Fouladgar, M. (2022). *Improve Energy Efficiency in Surface Mines Using Artificial Intelligence*.
www.intechopen.com
- Stefanko, R., Ramani, R. V., & Ferko, M. R. (1973). *Analysis of strip mining methods and equipment selection. Interim report No. 7*.
- Syahreza, M. R., Zaenal, & Isniarno, N. F. (2023). Kajian Teknis Alat Gali-Muat dan Angkut pada Penambangan Batubara PT Pacific Global Utama di Kecamatan Tanjung Agung, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, 3. <https://doi.org/10.29313/bcsme.v3i1.5423>
- Tolksdorf, J. F., Schröder, F., Petr, L., Herbig, C., Kaiser, K., Kočár, P., Fülling, A., Heinrich, S., Hönig, H., & Hemker, C. (2020). Evidence for Bronze Age and Medieval tin placer mining in the Erzgebirge mountains, Saxony (Germany). *Geoarchaeology-an International Journal*, 35(2), 198–216. <https://doi.org/10.1002/GEA.21763>
- Wang, F., & Zhang, C. (2019). Reasonable coal pillar design and remote control mining technology for highwall residual coal resources. *Royal Society Open Science*, 6(4), 181817. <https://doi.org/10.1098/RSOS.181817>

- Wanty, R. B., Wang, B., Vohden, J., Briggs, P. H., & Meier, A. H. (1999). *Regional baseline geochemistry and environmental effects of gold placer mining operations on the Fortymile River, eastern Alaska*. <https://doi.org/10.3133/OFR99328>
- Zhironkin, S., & Szurgacz, D. (2022). *Mining Technologies Innovative Development*. www.mdpi.com/journal/energies
- Zhironkin, S., & Taran, E. (2023). Development of Surface Mining 4.0 in Terms of Technological Shock in Energy Transition: A Review. *Energies*, 16(9), 3639. <https://doi.org/10.3390/en16093639>
- Zipf, R. K., & Bhatt, S. (2004). *Analysis Of Practical Ground Control Issues In Highwall Mining*. https://stacks.cdc.gov/view/cdc/8556/cdc_8556_DS1.pdf

BAB 3

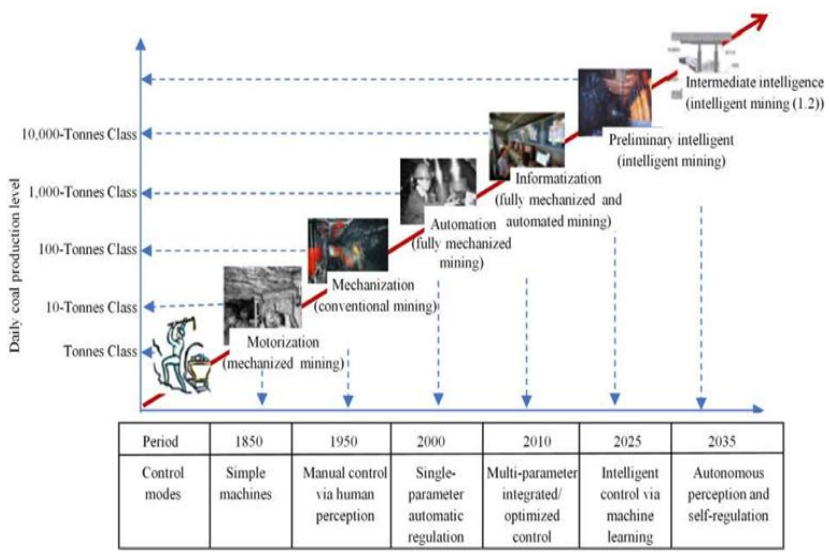
TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM KEGIATAN PENAMBANGAN

Oleh Anselma Diksita Prajna Duhita

Perkembangan teknologi telah membawa perubahan besar dalam industri pertambangan modern. Industri yang sebelumnya sangat bergantung pada tenaga manusia dan peralatan mekanis konvensional secara pasti kini semakin memanfaatkan teknologi digital, otomatisasi, dan sistem informasi berbasis data. Perkembangan praktik pertambangan dapat dilihat melalui beberapa tahap evolusi teknologi dan metode operasional. Pada era pertambangan konvensional, kegiatan penambangan dilakukan secara manual menggunakan alat sederhana seperti cangkul, palu, dan sekop, dengan praktik penambangan yang masih dilakukan secara manual oleh manusia serta pengamatan langsung terhadap indikasi mineral di permukaan. Memasuki era mekanisasi, penggunaan alat berat seperti *excavator*, *bulldozer*, dan *dump truck* mulai menggantikan pekerjaan manual sehingga metode penambangan menjadi lebih produktif dan memungkinkan operasi tambang berskala besar dengan teknik pengeboran dan peledakan yang lebih sistematis. Perkembangan berlanjut pada era otomatisasi dan komputerisasi, industri pertambangan mulai memanfaatkan teknologi komputer yang memungkinkan pemantauan operasi tambang secara lebih efisien dan terkontrol. Transformasi ini dipicu oleh kebutuhan untuk meningkatkan

efisiensi produksi, mengurangi biaya operasional, meningkatkan keselamatan kerja, serta meminimalkan dampak lingkungan dari kegiatan penambangan.

Dalam beberapa dekade terakhir, industri pertambangan global mengalami perubahan signifikan dengan munculnya konsep *digital mining*, *Mining 4.0*, dan *Intelligent Mining* (Ali, Ali and Osman, 2025; Chandrachud et al., 2025; Bian et al., 2026). Konsep ini mengintegrasikan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), robotika, *big data analytics*, dan sistem kendali jarak jauh untuk mengoptimalkan operasi pertambangan. Teknologi tersebut memungkinkan perusahaan tambang meningkatkan efisiensi operasional tambang, meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja, mendukung pengambilan keputusan berbasis data, serta meningkatkan pengelolaan lingkungan tambang. (Bian et al., 2026) mencontohkan bagaimana "Revolusi Batubara" yang diawali dari metode pengeboran, peledakan serta metode penambangan konvensional pada tahun 1850-an hingga sistem yang sepenuhnya mekanis dan otomatis dengan memanfaatkan persepsi otomasi dan pengaturan mandiri oleh AI (Gambar 3.1). Hal tersebut dapat meningkatkan produksi harian batubara sebesar 10.000 kali lipat dan berkontribusi mendukung ketahanan energi.



Gambar 3. 1 Perkembangan Teknologi Penambangan Batubara
(Sumber :*(Bian et al., 2026)*)

Perkembangan teknologi dan inovasi dalam pertambangan juga menjawab tantangan semakin kompleksnya kondisi geologi serta meningkatnya tuntutan terhadap praktik pertambangan berkelanjutan. Banyak deposit mineral yang mudah diakses telah habis ditambang, sehingga operasi pertambangan kini dilakukan pada kedalaman lebih besar dan lingkungan yang lebih menantang (Li and Cai, 2021). Kondisi ini membutuhkan teknologi yang lebih canggih untuk menjaga keselamatan pekerja dan efisiensi operasi. Faktor keselamatan kerja tak kalah menjadi salah satu alasan prioritas penerapan teknologi dalam pertambangan modern. Kegiatan penambangan, khususnya tambang bawah tanah, memiliki tingkat risiko yang tinggi seperti runtuh batuan, gas berbahaya, serta kondisi geoteknik yang tidak stabil (Phong, Tuyen and Osinski, 2024). Teknologi otomatisasi dan pengendalian jarak jauh

memungkinkan operator mengendalikan alat berat dari lokasi yang aman sehingga mengurangi risiko kecelakaan kerja.

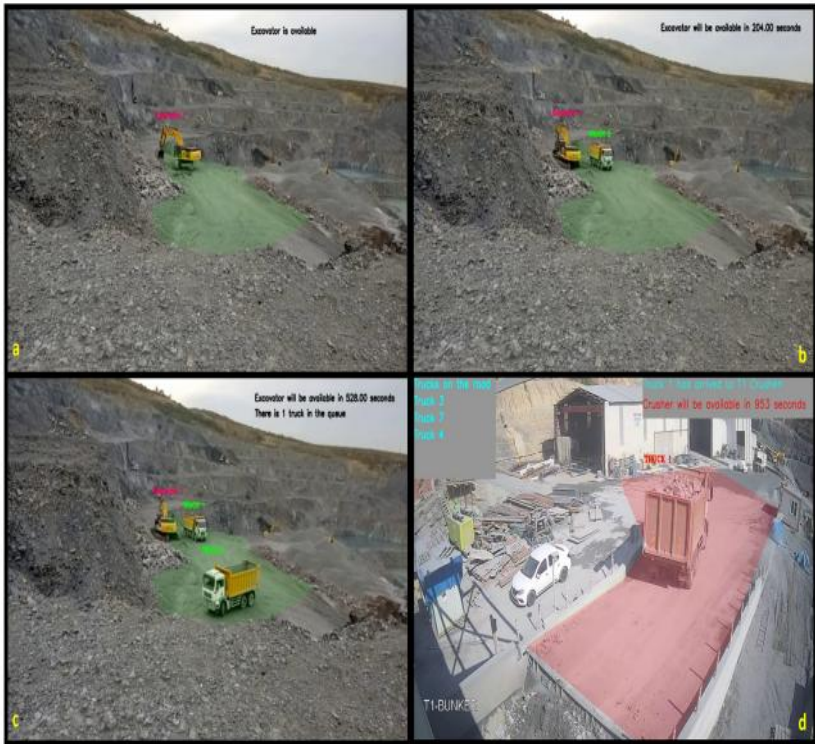
Bab ini membahas berbagai teknologi dan inovasi yang digunakan dalam kegiatan penambangan modern, mulai dari teknologi eksplorasi, operasi penambangan, hingga teknologi keselamatan dan kesehatan kerja tambang.

3.2 Konsep Mining 4.0 dalam Industri Pertambangan

Transformasi teknologi dalam industri pertambangan merupakan bagian dari perkembangan industri global dari penambangan konvensional menuju era Revolusi Industri 4.0. Dalam konteks ini, teknologi digital digunakan untuk mengintegrasikan berbagai proses produksi dalam suatu sistem yang terhubung secara *real-time*.

Salah satu konsep utama dalam transformasi teknologi pertambangan adalah *Mining 4.0*. Konsep ini menggabungkan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), robotika, kecerdasan buatan, dan sistem kendali jarak jauh untuk meningkatkan efisiensi operasi tambang. Teknologi ini memungkinkan perusahaan tambang mengumpulkan data operasional secara *real-time* dari berbagai peralatan tambang. Data yang diperoleh dari sensor pada alat berat kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak analitik untuk mengoptimalkan operasi tambang. Misalnya, sistem *fleet management* dapat digunakan untuk menentukan rute pengangkutan material yang paling efisien sehingga mengurangi waktu tunggu dan meningkatkan produktivitas alat berat. Pemanfaatan perangkat lunak pada sistem *fleet management* juga dapat membantu dalam efisiensi biaya dan mengatasi keterbatasan pada sumber daya manusia. Penggunaan perangkat lunak pada sistem *fleet management*

untuk beberapa skenario bisa dilihat pada contoh yang ditunjukkan Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Pemanfaatan Sistem *Fleet Management*
(Sumber : (Hasözdemir, Meral and Kahraman, 2025))

Konsep *Mining 4.0* didukung pula dengan penggunaan teknologi komunikasi modern seperti jaringan fiber optik dan jaringan seluler berkecepatan tinggi. Teknologi tersebut berperan penting dalam mendukung digitalisasi. Perkembangan teknologi komunikasi seperti jaringan fiber optik dan jaringan 5G memungkinkan pengendalian alat berat secara jarak jauh. Teknologi ini sangat penting dalam operasi tambang bawah tanah yang memiliki tingkat risiko tinggi. Dalam beberapa operasi tambang modern, operator

tidak lagi berada di dalam area tambang tetapi bekerja di ruang kendali yang aman di permukaan (Gambar 3.3). Dengan menggunakan sistem kamera dan sensor, operator dapat memantau kondisi alat berat dan lingkungan tambang secara *real-time*, sehingga meningkatkan keselamatan kerja serta efisiensi operasional. Seluruh armada alat bantu tambang dikendalikan melalui pusat otomatisasi yang berada di *Remote Operations Room* (ROR) di permukaan tambang. Dengan sistem ini, operator dapat mengendalikan dan memantau peralatan tambang dari jarak jauh secara aman, sekaligus meningkatkan efisiensi operasi melalui pengurangan waktu pergantian shift dan optimalisasi pengelolaan armada tambang.



Gambar 3. 3Pengoperasian Alat Berat Tambang Jarak Jauh
(Sumber : (RCT, 2022))

Transformasi digital dalam industri pertambangan mencakup pula pemanfaatan berbagai teknologi canggih, termasuk simulasi komputer serta kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dan *machine learning*, untuk

meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasi tambang. Melalui teknologi simulasi komputer yang menghasilkan model tiga dimensi, insinyur tambang dapat merancang metode penambangan yang lebih optimal serta memprediksi berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja produksi tambang. Pemodelan digital ini memungkinkan evaluasi berbagai skenario desain tambang sebelum kegiatan penambangan dilakukan secara nyata di lapangan. Sebagai contoh oleh (Chimunhu *et al.*, 2024), dalam perencanaan tambang bawah tanah dengan metode *sub-level open stoping* (SLOS), simulasi berbasis data geologi, geoteknik, dan desain *stope* dapat digunakan untuk memprediksi tingkat dilution atau pencampuran antara bijih dan material non-ekonomis sejak tahap awal perencanaan tambang. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, bahkan mencapai lebih dari 90% untuk kategori target tertentu. Studi ini juga menunjukkan penggunaan simulasi dan analisis data dalam meningkatkan akurasi perencanaan tambang. Dengan demikian, pemanfaatan teknologi simulasi dan analisis data dalam model tiga dimensi dapat membantu insinyur tambang merancang operasi penambangan yang lebih efisien, meminimalkan kehilangan bijih, serta meningkatkan keandalan perencanaan produksi tambang.

Penggunaan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) juga dapat mendukung pemantauan dan pengelolaan lingkungan dalam kegiatan pertambangan dengan memonitor dampak operasi tambang terhadap lingkungan sekitar secara lebih akurat dan berkelanjutan. Teknologi AI dapat dimanfaatkan melalui *machine learning*, *computer vision*, dan analisis data tingkat lanjut untuk memantau kondisi lingkungan tambang dan potensi risiko secara *real-time* melalui satelit, ditunjukkan Gambar 4 (Bian *et al.*, 2026). Model prediktif berbasis AI memungkinkan perusahaan tambang meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, mengurangi limbah produksi, serta

mengidentifikasi potensi dampak lingkungan sejak tahap awal operasi. Sistem sensor pintar dan perangkat otonom yang terintegrasi dengan AI dapat membantu mengoptimalkan aktivitas penambangan sehingga konsumsi energi dapat ditekan dan pengelolaan air tambang menjadi lebih efektif (Patil *et al.*, 2025). Sistem pemantauan lingkungan berbasis AI dapat melacak kualitas udara dan air tambang secara kontinu guna memastikan bahwa kegiatan pertambangan tetap memenuhi standar regulasi lingkungan serta mendukung penerapan praktik pertambangan yang berkelanjutan. Dengan demikian, pemanfaatan AI memiliki potensi besar dalam mendorong transformasi industri pertambangan menuju sistem produksi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan bertanggung jawab terhadap keberlanjutan sumber daya alam.

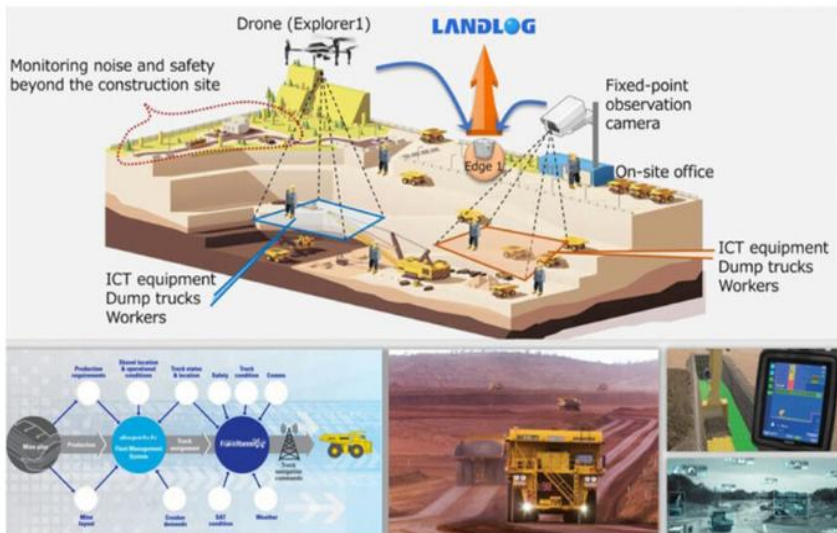


Gambar 3. 4 Pemantauan Dampak dan Risiko Lingkungan dengan Satelit

(Sumber : (Bian *et al.*, 2026))

AI juga dapat dimanfaatkan dalam sistem *predictive maintenance* untuk memantau kondisi peralatan tambang secara berkelanjutan dan mencegah kerusakan sebelum terjadi kegagalan operasi. Penerapan AI dan *machine learning* memungkinkan analisis data operasional yang lebih mendalam melalui pemrosesan data dari berbagai sensor yang terpasang pada peralatan tambang, seperti sensor getaran, suhu, tekanan, dan kinerja mesin. D

engan menggunakan algoritma khusus untuk menganalisis data tersebut, sistem dapat mengidentifikasi potensi masalah sejak tahap awal sehingga perusahaan dapat memprediksi kemungkinan kerusakan peralatan, mengoptimalkan jadwal perawatan, serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi dalam kegiatan penambangan. Teknologi ini memungkinkan tim pemeliharaan melakukan perbaikan sebelum kerusakan menjadi lebih serius sehingga umur operasional alat dapat lebih panjang, risiko gangguan operasional dapat diminimalkan, dan biaya perawatan dapat ditekan karena mesin tidak mengalami kerusakan mendadak yang menyebabkan penghentian produksi secara tidak terencana (Saleem, 2025). Implementasi *predictive maintenance* tersebut terbukti mampu menurunkan biaya pemeliharaan hingga sekitar 17% dan berkontribusi terhadap penghematan biaya operasional secara keseluruhan hingga 30%, sekaligus meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan operasi pertambangan modern (Patil *et al.*, 2025). Ilustrasi mengenai ekosistem pertambangan cerdas yang mengintegrasikan AI, IoT, dan Teknologi Digital untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan otomatisasi dapat dilihat pada Gambar 3.5.

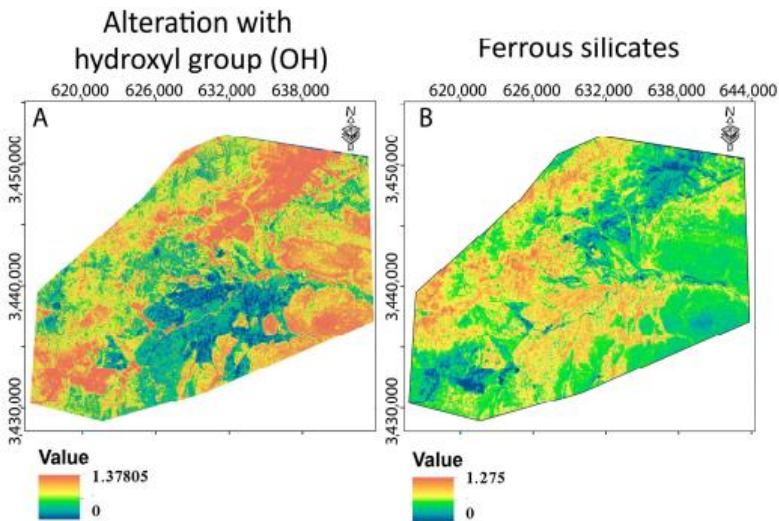


Gambar 3. 5 Ekosistem Pertambangan Cerdas
(Sumber : (Patil *et al*, 2025))

3.3 Teknologi Eksplorasi dan Pemodelan Tambang

Eksplorasi merupakan tahap awal dalam kegiatan pertambangan yang bertujuan untuk menemukan dan mengevaluasi potensi sumber daya mineral. Teknologi yang berkembang saat ini telah meningkatkan akurasi serta efisiensi proses eksplorasi. Salah satu teknologi penting dalam eksplorasi modern adalah *remote sensing*, yaitu teknologi yang memanfaatkan citra satelit untuk mengidentifikasi struktur geologi yang berpotensi mengandung mineral. Data citra tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak geospasial untuk menentukan area eksplorasi yang potensial. Sebagai contoh, penelitian di wilayah Tidili, Maroko, memanfaatkan teknologi *multispectral remote sensing* menggunakan citra *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

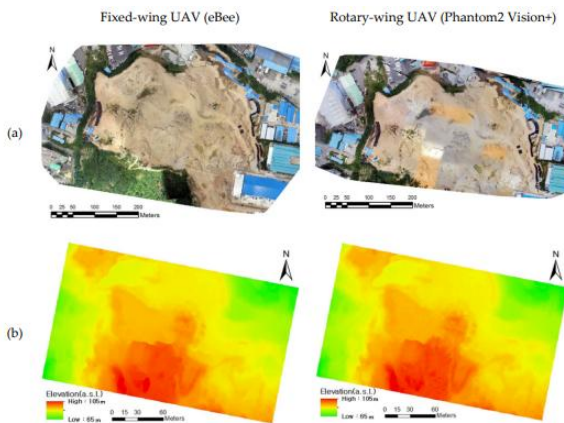
(ASTER) untuk mengidentifikasi potensi mineral (Lerhris *et al.*, 2025). Salah satu contoh hasil pengolahan citra satelit ditunjukkan Gambar 3.6. Studi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi analisis citra multispektral dengan validasi lapangan dapat meningkatkan ketepatan dalam penentuan target eksplorasi mineral serta menjadi pendekatan yang efektif untuk eksplorasi di wilayah dengan kondisi geologi yang kompleks.



Gambar 3. 6 Hasil Pengolahan Citra Satelit untuk Eksplorasi
(Sumber : (Lerhris *et al.*, 2025))

Penggunaan drone atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dalam kegiatan eksplorasi tambang juga merupakan salah satu penerapan teknologi yang memberikan berbagai manfaat dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, serta keselamatan kerja. Drone mampu melakukan pemetaan wilayah eksplorasi secara cepat dan menghasilkan citra udara beresolusi tinggi yang dapat digunakan untuk membuat peta topografi, model permukaan tiga dimensi, serta analisis morfologi wilayah tambang. Teknologi ini

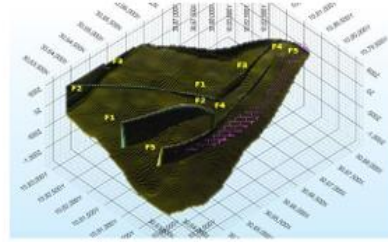
memungkinkan pengumpulan data pada area yang luas dan sulit dijangkau oleh manusia, seperti daerah pegunungan, hutan lebat, atau wilayah dengan kondisi medan yang berbahaya. Drone juga dapat dilengkapi dengan berbagai sensor seperti kamera multispektral, kamera termal, maupun sensor LiDAR untuk mengidentifikasi indikasi mineralisasi, memetakan struktur geologi, serta mendeteksi zona alterasi hidrotermal yang berpotensi mengandung mineral (Park and Choi, 2020). Contoh hasil pemanfaatan drone untuk survei ditunjukkan pada Gambar 3.7. Penggunaan UAV juga dapat mempercepat proses survei eksplorasi karena pengambilan data dapat dilakukan dalam waktu yang relatif singkat dibandingkan metode survei konvensional, sekaligus mengurangi risiko keselamatan bagi tenaga kerja. sehingga teknologi UAV menjadi salah satu inovasi penting dalam mendukung kegiatan eksplorasi dan pengelolaan tambang modern yang lebih efisien dan berbasis data.



Gambar 3. 7 Hasil Pemanfaatan Drone untuk *Surveying*
(Sumber : (Park and Choi, 2020))

Teknologi lain yang penting dalam eksplorasi adalah *Geographic Information System* (GIS) atau Sistem Informasi Geografis. GIS memungkinkan integrasi berbagai data geologi, geofisika, dan geokimia dalam satu sistem informasi spasial sehingga memudahkan analisis kondisi geologi suatu wilayah secara komprehensif. Pemanfaatan GIS memungkinkan pemetaan distribusi mineral, mengidentifikasi pola struktur geologi, serta menentukan lokasi eksplorasi secara lebih akurat. Seiring dengan perubahan dan perkembangan data, GIS dapat melakukan pengolahan dan visualisasi data dalam bentuk peta digital sesuai dengan data terbaru hasil survei lapangan. Contoh penerapan GIS digunakan untuk mengintegrasikan data eksplorasi dari berbagai sumber seperti citra satelit, survei geofisika, dan data pengeboran sehingga perusahaan tambang dapat melakukan analisis spasial yang lebih mendalam dalam proses pencarian dan evaluasi cadangan mineral (Chandrasah *et al.*, 2025). Pemanfaatan GIS tersebut membantu meningkatkan ketepatan pengambilan keputusan dalam tahap eksplorasi, mengurangi ketidakpastian geologi, serta mendukung perencanaan kegiatan penambangan yang lebih efisien dan berbasis data.

Data eksplorasi yang telah diperoleh digunakan untuk membuat model geologi tiga dimensi. Model ini menggambarkan distribusi mineral dalam tubuh bijih dan menjadi dasar dalam estimasi cadangan mineral. Pemodelan geologi modern umumnya dilakukan menggunakan perangkat lunak khusus yang mampu memvisualisasikan data geologi dalam bentuk tiga dimensi (Gambar 3.8). Teknologi ini membantu insinyur tambang dalam merancang metode penambangan yang paling efisien.



Gambar 3. 8 Pemodelan Tambang Hasil Eksplorasi
(Sumber : (Chandras et al., 2025))

3.4 Teknologi Operasi Tambang

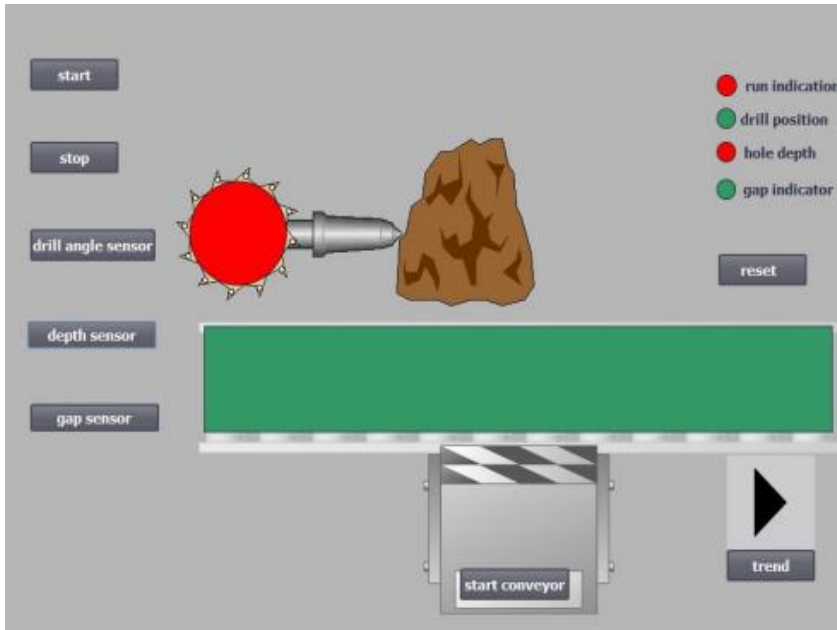
Teknologi operasi penambangan meliputi berbagai peralatan, sistem, dan metode yang digunakan dalam kegiatan produksi tambang pada setiap tahapan kegiatan penambangan. Operasi penambangan terdiri dari beberapa tahapan utama seperti pembongkaran batuan (*drilling* dan *blasting*), penggalian dan pemuatan (*loading*), pengangkutan material (*hauling*), serta penanganan dan pengolahan awal material tambang (Gambar 3.8). Perkembangan teknologi telah membawa perubahan signifikan pada setiap tahapan tersebut melalui penggunaan alat berat modern yang memiliki kapasitas produksi lebih besar, tingkat presisi yang lebih tinggi, serta efisiensi energi yang lebih baik.



Gambar 3. 9 Operasi Penambangan
(Sumber: (Chandrahas *et al.*, 2025))

Tahap operasi penambangan dengan metode pengeboran didukung oleh teknologi *modern drilling* yang memungkinkan proses pengeboran dilakukan dengan presisi tinggi serta kecepatan yang lebih besar dibandingkan metode konvensional. Sistem pengeboran modern dilengkapi dengan berbagai sensor dan sistem kontrol digital yang mampu memantau kondisi batuan serta parameter pengeboran secara *real-time*, seperti sudut kemiringan lubang bor, kedalaman pengeboran, dan posisi titik pengeboran. Sebagai contoh, penerapan sistem monitoring berbasis SCADA pada metode *long-hole stoping* di sebuah tambang emas di Zimbabwe mengintegrasikan sensor IMU inclinometer untuk memantau sudut deviasi pengeboran, *rotary encoder* untuk mengukur kedalaman lubang bor, serta LiDAR untuk mengontrol jarak dan posisi titik pengeboran sesuai desain tambang (Gurumani *et al.*, 2025). Data dari sensor tersebut diproses melalui *programmable logic controller* (PLC) dan ditampilkan pada *Human Machine Interface* (HMI) sehingga operator dapat memantau dan mengendalikan proses pengeboran secara langsung (Gambar 3.9). Penerapan sistem ini terbukti mampu mengurangi deviasi sudut pengeboran dari sekitar $0,8\text{--}1,6^\circ$ menjadi $0,2\text{--}0,3^\circ$, menurunkan

kesalahan kedalaman lubang bor dari sekitar 0,8–1,1 meter menjadi 0,05–0,08 meter, serta mengurangi tingkat dilution dari sekitar 25% menjadi 16–18%, sehingga meningkatkan stabilitas dinding tambang, efisiensi operasi, dan kualitas produksi bijih.



Gambar 3. 10 Pemantauan Parameter Drilling
(Sumber : (Gurumani *et al.*, 2025))

Tahap operasi peledakan memanfaatkan teknologi *controlled blasting* yang bertujuan untuk mengoptimalkan fragmentasi batuan sekaligus meminimalkan dampak getaran terhadap lingkungan sekitar. Dalam kegiatan penambangan, detonasi bahan peledak menghasilkan tekanan tinggi secara tiba-tiba yang mampu memecah batuan, namun juga menimbulkan gelombang getaran yang merambat melalui massa batuan dan berpotensi memengaruhi kestabilan lereng, struktur tambang, maupun

bangunan di sekitar area operasi (Skrzypkowski and Biessikirski, 2026). Desain peledakan modern dilakukan secara lebih terencana melalui pengaturan pola pengeboran, jarak antar lubang bor, tinggi kolom bahan peledak, jumlah bahan peledak per segmen, serta urutan waktu detonasi (*delay time*) untuk menghasilkan fragmentasi yang optimal dengan tingkat getaran yang terkendali. Perkembangan teknologi saat ini memungkinkan pemanfaatan model pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk memprediksi karakteristik getaran peledakan berdasarkan parameter peledakan, jenis bahan peledak, dan kondisi geologi. Berbagai model seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), dan *Support Vector Machine* (SVM) menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dalam memprediksi frekuensi dominan getaran, dengan koefisien korelasi hingga 0,95–0,9988 dan tingkat kesalahan relatif di bawah 10% (Guo, Fei and Yan, 2025). Dengan demikian, penerapan *controlled blasting* yang didukung oleh simulasi digital, pemantauan lapangan, dan analisis berbasis kecerdasan buatan memungkinkan kegiatan peledakan dilakukan secara lebih presisi, aman, dan efisien sekaligus meminimalkan dampak lingkungan dari operasi penambangan.

Pemanfaatan teknologi modern berperan penting dalam meningkatkan produktivitas serta efisiensi operasi tambang pada tahap *loading* dan *hauling*. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah penerapan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) sebagai indikator kinerja alat untuk mengevaluasi efektivitas operasi alat muat dan alat angkut. Perkembangan metode analisis OEE dengan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) memungkinkan penentuan bobot yang lebih akurat pada setiap komponen efektivitas seperti *availability*, *performance*, dan *quality*, sehingga perusahaan tambang dapat mengidentifikasi *bottleneck* secara lebih tepat (Basharaf, Sayadi and Rahimdel, 2026). Pendekatan tersebut

mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menurunkan biaya produksi dengan mengoptimalkan kinerja alat yang paling berpengaruh terhadap keseluruhan sistem. Perkembangan teknologi otomasi juga mendorong penggunaan sistem *autonomous loading* dan peralatan tanpa operator seperti *excavator* dan *loader* yang dikendalikan melalui *teleoperation*. Sistem ini memanfaatkan sensor LiDAR, kamera, dan *Global Positioning System* (GPS) untuk melakukan lokalisasi posisi secara *real-time*, mendeteksi hambatan, serta memastikan keselamatan operasi (Jang and Choi, 2025). Komunikasi data dan kontrol alat dilakukan melalui jaringan Wi-Fi yang memungkinkan operator mengendalikan alat dari jarak jauh. Implementasi teknologi ini di beberapa tambang menunjukkan peningkatan kontinuitas operasi, produktivitas yang lebih tinggi, peningkatan keselamatan kerja, serta pengurangan biaya operasional. Dengan demikian, integrasi teknologi analitik kinerja alat dan sistem otomasi menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan kegiatan *loading* dan *hauling* pada operasi penambangan modern.

3.5 Teknologi Keselamatan dan Kesehatan Kerja Tambang

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek yang sangat penting dalam kegiatan pertambangan karena aktivitas penambangan memiliki tingkat risiko yang tinggi. Risiko tersebut dapat berupa runtuh batuan, longsor lereng tambang, ledakan gas, kecelakaan alat berat, serta paparan debu dan bahan berbahaya (Tripathy, 2022). Oleh karena itu, penerapan teknologi modern dalam sistem keselamatan tambang menjadi salah satu upaya utama untuk meminimalkan risiko kecelakaan kerja serta melindungi pekerja tambang.

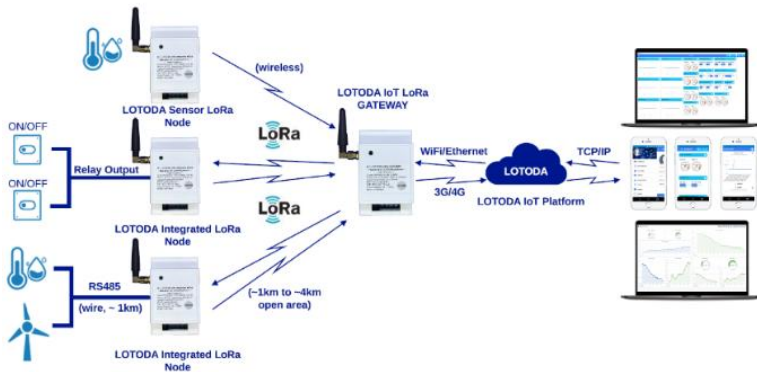
Perkembangan teknologi digital memungkinkan perusahaan tambang untuk melakukan pemantauan kondisi tambang secara *real-time* melalui berbagai perangkat sensor dan sistem komunikasi yang terintegrasi. Teknologi ini tidak hanya membantu dalam mendeteksi potensi bahaya secara dini tetapi juga meningkatkan respons terhadap kondisi darurat di area tambang. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah *Wireless Sensor Network* (WSN) yang mampu menghubungkan berbagai sensor di area tambang untuk memantau kondisi keselamatan dan kesehatan kerja secara berkelanjutan (Zrelli and Ezzedine, 2018; Sadeghi, Soltanmohammadlou and Nasirzadeh, 2022). Penerapan WSN di tambang bawah tanah dapat digunakan untuk pemantauan lokasi dan pergerakan pekerja, pemantauan kondisi fisiologis pekerja, serta pemantauan lingkungan tambang seperti kadar gas berbahaya, suhu, kelembapan, dan stabilitas batuan. Sistem pemantauan modern juga memanfaatkan sensor optik dan jaringan sensor nirkabel yang dipasang di terowongan tambang untuk mendeteksi perubahan kondisi struktural seperti regangan batuan, getaran, perubahan temperatur, dan kelembapan yang dapat menjadi indikator awal potensi keruntuhan atau gangguan geoteknik. Beberapa jenis sensor optik yang digunakan antara lain Raman, Brillouin, Fabry–Perot, dan Bragg sensors yang mampu memberikan informasi kondisi tambang secara akurat dan kontinu.



Gambar 3. 11 Ruang Pusat Kendali
(Sumber: (Freeport, 2022))

Perkembangan teknologi digital dalam industri pertambangan telah mendorong penerapan sistem Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) berbasis teknologi untuk meminimalkan risiko kecelakaan serta meningkatkan perlindungan bagi pekerja tambang. Salah satu implementasinya adalah sistem monitoring dan peringatan dini bahaya tambang yang memanfaatkan jaringan sensor terintegrasi untuk memantau kondisi lingkungan tambang secara terus-menerus, seperti kadar gas berbahaya, suhu, getaran tanah, pergerakan batuan, serta kualitas udara. Penggunaan sensor dalam sistem monitoring memiliki keunggulan karena mampu bekerja pada lingkungan ekstrem tambang, memberikan pengukuran yang lebih akurat, serta menyediakan data secara kontinu sehingga perubahan kondisi tambang dapat terdeteksi sejak tahap awal. Data yang dikumpulkan sensor kemudian dikirim secara *real-time* ke

pusat kendali (Gambar 3.10) untuk dianalisis sehingga apabila terdeteksi kondisi berbahaya, sistem dapat secara otomatis memberikan peringatan melalui alarm atau notifikasi kepada operator dan pekerja agar segera melakukan tindakan pengamanan atau evakuasi.

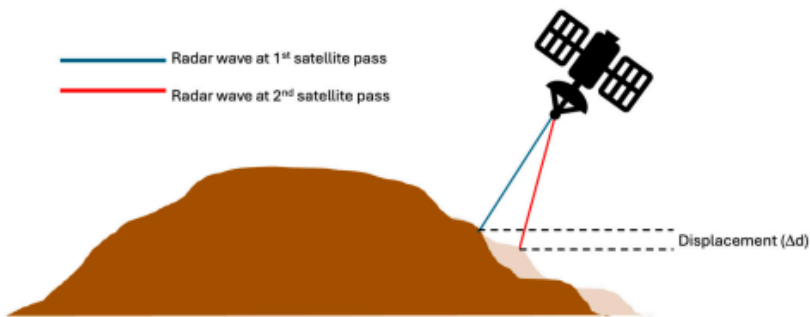


Gambar 3. 12 Model sistem Monitoring Tambang Berbasis IoT
(Sumber: (Phong, 2024))

Perkembangan teknologi juga memungkinkan pemanfaatan kecerdasan buatan dan *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan akurasi sistem peringatan dini (Gambar 3.11), misalnya melalui penggunaan model pembelajaran mesin seperti *Multi-Task Graph Neural Network* (MTGNN) yang mampu memprediksi konsentrasi gas tambang dan mendeteksi anomali dengan tingkat akurasi tinggi, serta sistem sensor gas berbasis IoT yang mengirimkan data konsentrasi gas melalui jaringan nirkabel ke *cloud server* untuk dianalisis secara otomatis (Phong, 2024; Liu *et al.*, 2025). Integrasi sensor, komunikasi digital, dan analisis data cerdas ini memungkinkan deteksi bahaya dilakukan lebih cepat dan akurat sehingga dapat meningkatkan keselamatan

kerja serta mendukung terciptanya operasi pertambangan yang lebih aman dan andal.

Teknologi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) juga diterapkan dalam pemantauan stabilitas lereng tambang yang merupakan aspek penting dalam operasi tambang terbuka. Lereng yang tidak stabil dapat menyebabkan longsor yang membahayakan pekerja serta merusak peralatan tambang. Untuk mengantisipasi risiko tersebut, perusahaan tambang memanfaatkan berbagai teknologi pemantauan seperti *slope stability radar*, sistem pemantauan berbasis *Global Positioning System* (GPS), serta sensor deformasi tanah yang mampu mendeteksi pergerakan massa batuan dengan tingkat presisi tinggi (Gambar 12).



Gambar 3. 13 Akuisisi Data Monitoring Kestabilan Lereng
(Sumber: (Le Roux *et al.*, 2025))

Teknologi *slope stability radar* dapat mendeteksi pergerakan lereng dalam skala milimeter secara *real-time* sehingga potensi longsor dapat diketahui sebelum terjadi kegagalan lereng, sedangkan sistem GPS dan sensor deformasi digunakan untuk memantau perubahan posisi serta pergerakan batuan secara berkala (Le Roux *et al.*, 2025). Data dari berbagai sistem pemantauan tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak geoteknik untuk

mengevaluasi tingkat risiko longsor dan menentukan langkah mitigasi yang diperlukan, seperti penguatan lereng atau penyesuaian desain tambang. Perkembangan teknologi juga memungkinkan integrasi metode *remote sensing* dan *in-situ monitoring* yang didukung oleh teknologi digital seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), dan *Wireless Sensor Networks* (WSN) untuk meningkatkan akurasi serta cakupan pemantauan stabilitas lereng. Integrasi berbagai teknologi tersebut memungkinkan deteksi dini terhadap potensi kegagalan lereng sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih cepat sehingga dapat meningkatkan keselamatan kerja, mengurangi potensi kecelakaan tambang, serta mendukung terciptanya operasi pertambangan yang lebih aman dan berkelanjutan.

Teknologi inovatif lain seperti *Internet of Things* (IoT), drone inspeksi, robot pemantau, kecerdasan buatan (AI), serta teknologi *virtual* dan *augmented reality* juga mulai dimanfaatkan untuk meningkatkan keselamatan kerja di sektor pertambangan yang memiliki tingkat risiko tinggi. Teknologi-teknologi tersebut tidak hanya meningkatkan perlindungan bagi pekerja tetapi juga memberikan keuntungan operasional bagi perusahaan melalui peningkatan efisiensi pengawasan, pengurangan kecelakaan kerja, serta peningkatan keberlanjutan operasi tambang (Beş *et al.*, 2025). Namun demikian, untuk memaksimalkan manfaat teknologi digital ini diperlukan integrasi sistem yang lebih luas serta peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pendidikan dan pelatihan (Gambar 3.13) agar teknologi dapat diimplementasikan secara optimal di lingkungan pertambangan.



**Gambar 3. 14 Pemanfaatan Teknologi pada Pelatihan SDM
Pertambangan**
(Sumber : (Chandrasah *et al.*, 2025))

Bab ini telah membahas berbagai teknologi dan inovasi yang digunakan dalam kegiatan pertambangan modern. Teknologi tersebut mencakup Konsep Mining 4.0 dalam Industri Pertambangan, Teknologi Eksplorasi dan Pemodelan Tambang, Teknologi Operasi Tambang, dan Teknologi Keselamatan dan Kesehatan Kerja Tambang. Perkembangan teknologi ini telah memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan efisiensi produksi dan keselamatan pekerja.

Penerapan teknologi modern akan terus menjadi faktor utama dalam perkembangan industri pertambangan di masa depan. Perusahaan tambang yang mampu mengadopsi teknologi secara efektif akan memiliki keunggulan dalam meningkatkan produktivitas serta menjaga keberlanjutan operasi tambang. Selain itu, penggunaan teknologi digital dan otomatisasi juga akan mengubah kebutuhan kompetensi tenaga kerja di sektor pertambangan. Untuk mendukung perkembangan teknologi pertambangan, diperlukan kerja sama antara pemerintah, industri, dan lembaga pendidikan dalam pengembangan penelitian serta inovasi teknologi. Selain itu, peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pendidikan dan pelatihan teknologi pertambangan

juga menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan industri pertambangan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M.A., Ali, M.I.M. and Osman, A.A. (2025) "AI-driven Mining 4.0: A Systematic Review of Smart, Sustainable, and Autonomous Technologies across the Mining Lifecycle," *Current Journal of Applied Science and Technology*, 44(6), pp. 125–139. Available at: <https://doi.org/10.9734/cjast/2025/v44i64564>.
- Basharaf, M., Sayadi, A.R. and Rahimdel, M.J. (2026) "Improving productivity in mine loading and hauling operations through OEE analysis," *Resources Policy*, 115, p. 105873. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2026.105873>.
- Beś, P. *et al.* (2025) "Innovative Technologies to Improve Occupational Safety in Mining and Construction Industries—Part I," *Sensors*, 25(16), p. 5201. Available at: <https://doi.org/10.3390/s25165201>.
- Bian, Z. *et al.* (2026) "Mine surveying science and technology for contemporary and future mining industries," *International Journal of Mining Science and Technology*, 36(2), pp. 251–275. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.12.010>.
- Chandrasah, N.S. *et al.* (2025) "Role of Digital Transformation in Mining Industry: Enhancing Efficiency, Safety and Sustainability," *Mining Revue*, 31(1), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.2478/minrv-2025-0001>.
- Chimunhu, P. *et al.* (2024) "Development of Novel Hybrid Intelligent Predictive Models for Dilution Prediction in Underground Sub-level Mining," *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(4), pp. 2079–2098. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01029-8>.

- Freeport (2022) *Inovasi Teknologi 'Smart Mining' Freeport, Pionir Digitalisasi Pertambangan, PT Freeport Indonesia*.
- Guo, J., Fei, H. and Yan, Y. (2025) "Research and Advances in the Characteristics of Blast-Induced Vibration Frequencies," *Buildings*, 15(6), p. 892. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings15060892>.
- Gurumani, E. *et al.* (2025) "Real-Time Drilling Control for Hanging-Wall Stability: SCADA-Based Mitigation of Overbreak and Dilution in Long-Hole Stoping," *Mining*, 5(4), p. 68. Available at: <https://doi.org/10.3390/mining5040068>.
- Hasözdemir, K., Meral, M. and Kahraman, M.M. (2025) "Revolutionizing Open-Pit Mining Fleet Management: Integrating Computer Vision and Multi-Objective Optimization for Real-Time Truck Dispatching," *Applied Sciences*, 15(9), p. 4603. Available at: <https://doi.org/10.3390/app15094603>.
- Jang, M. and Choi, Y. (2025) "Technological Trends of Mining Unmanned Loading Equipment by Global Manufacturers and Implementation Cases in Korea," *Tunnel and Underground Space*, 35(6), pp. 703–725.
- Lerhris, I.-E. *et al.* (2025) "Potential of Remote Sensing for the Analysis of Mineralization in Geological Studies," *Geomatics*, 5(3), p. 40. Available at: <https://doi.org/10.3390/geomatics5030040>.
- Li, P. and Cai, M. (2021) "Challenges and new insights for exploitation of deep underground metal mineral resources," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(11), pp. 3478–3505. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65744-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65744-8).
- Liu, M. *et al.* (2025) "A Sensor Data Prediction and Early-Warning Method for Coal Mining Faces Based on the

- MTGNN-Bayesian-IF-DBSCAN Algorithm,” *Sensors*, 25(15), p. 4717. Available at: <https://doi.org/10.3390/s25154717>.
- Park, S. and Choi, Y. (2020) “Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review,” *Minerals*, 10(8), p. 663. Available at: <https://doi.org/10.3390/min10080663>.
- Patil, Y. *et al.* (2025) “The Role of AI in Reducing Environmental Impact in the Mining Sector,” *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 73(5), pp. 1365–1378. Available at: <https://doi.org/10.18311/jmmf/2025/48521>.
- Phong, N.D. (2024) “RISK WARNING SYSTEMS FOR UNDERGROUND MINING USING IOT SOLUTIONS: A CASE STUDY,” *International Journal of GEOMATE*, 27(119). Available at: <https://doi.org/10.21660/2024.119.4470>.
- Phong, N.D., Tuyen, U.Q. and Osinski, P. (2024) “RISK WARNING SYSTEMS FOR UNDERGROUND MINING USING IOT SOLUTIONS: A CASE STUDY,” *International Journal of GEOMATE*, 27(119). Available at: <https://doi.org/10.21660/2024.119.4470>.
- RCT (2022) *Freeport rolls out world-first autonomous rockbreaker fleet at Grasberg, Mining.Com*.
- Le Roux, R. *et al.* (2025) “Slope Stability Monitoring Methods and Technologies for Open-Pit Mining: A Systematic Review,” *Mining*, 5(2), p. 32. Available at: <https://doi.org/10.3390/mining5020032>.
- Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N. and Nasirzadeh, F. (2022) “Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines,” *Journal of Safety Research*, 83,

- pp. 8–25. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.07.016>.
- Saleem, H.A. (2025) “AUTOMATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENHANCING MINING EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY: A REVIEW *,” *4th International Congress on Agriculture, Environment and Allied Sciences (AEAS)*. Istanbul: Procedia Environmental Science, Engineering and Management, pp. 213–228. Available at: <http://www.procedia-esem.eu>.
- Skrzypkowski, K. and Biessikirski, A. (2026) “Advanced Blasting Technology for Mining,” *Applied Sciences*, 16(3), p. 1232. Available at: <https://doi.org/10.3390/app16031232>.
- Tripathy, D.P. (2022) “Hazard identification and safety risk assessment in mining industry,” *JOURNAL OF MINES, METALS & FUELS*, 10(66), pp. 733–741.
- Zrelli, A. and Ezzedine, T. (2018) “Design of optical and wireless sensors for underground mining monitoring system,” *Optik*, 170, pp. 376–383. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.021>.

BAB 4

PENGELOLAAN SUMBER DAYA DAN LINGKUNGAN TAMBANG

Oleh Doli Jumat Rianto

4.1 Konsep Dasar dan Pendekatan Strategis

Sumber daya alam memainkan peran penting dalam dalam perekonomian, sehingga pengelolaan sumber daya mineral dan batubara sebagai bagian dari sumber daya alam yang diarahkan untuk mendukung pertumbuhan ekonomi melalui hilirisasi guna mengurangi ketergantungan pada ekspor komoditas mentah dan meningkatkan nilai tambah, dengan tetap memperhatikan daya dukung ekosistem serta perlindungan fungsi lingkungan dan keberlanjutan sumber daya alam itu sendiri. Hal ini sejalan dengan pandangan (Aullia Vivi Yulianingrum, Absori, 2021) pengelolaan sumber daya alam berfokus pada pemenuhan kebutuhan domestik sebagai prioritas, memastikan kepastian dan transparansi dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi, menerapkan pengawasan dan bimbingan, mendorong peningkatan investasi dan pendapatan negara, mengembangkan nilai tambah komoditas pertambangan, dan menjaga keberlanjutan lingkungan.

Pendekatan integratif memprioritaskan keseimbangan antara kebutuhan masa kini dan keberlanjutan jangka panjang (Marbun *et al.*, 2024).. Strategi pengelolaan sumber daya alam harus mencakup aspek konservasi, teknologi

ramah lingkungan, partisipasi masyarakat lokal, serta kemitraan strategis antara pemangku kepentingan. Sumber daya alam adalah seluruh potensi kekayaan alam yang tersedia di bumi dan dapat digunakan untuk mendukung kebutuhan hidup manusia. Sumber daya alam diklasifikasikan ke dalam kategori terbarukan dan tidak terbarukan berdasarkan durasi proses pembentukannya. Kelompok terbarukan mencakup energi matahari, angin, air, serta keanekaragaman hayati, sementara kelompok tidak terbarukan meliputi komoditas energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, gas alam, dan mineral logam. Meski sumber daya tidak terbarukan memegang peranan vital sebagai pilar ekonomi dan industri global, eksploitasinya sering kali memicu persoalan lingkungan yang serius, mulai dari pencemaran hingga emisi gas rumah kaca. Sebagai solusi, diperlukan transisi melalui efisiensi energi, inovasi teknologi terbarukan, serta penguatan kesadaran kolektif terhadap konservasi.

Dalam konteks pertambangan integrasi antara kegiatan pertambangan dan upaya konservasi lingkungan sangat penting, mengingat besarnya dampak negatif serius yang ditimbulkan oleh kegiatan pertambangan, seperti pencemaran lingkungan dan kerusakan ekosistem. Penyusunan rencana pengelolaan lingkungan yang komprehensif bertujuan untuk menerapkan praktik-praktik yang ramah lingkungan dan memastikan bahwa semua pihak terkait memahami dan melaksanakan tanggung jawab mereka dalam menjaga keberlanjutan lingkungan. Selain itu, kebijakan lingkungan di sektor pertambangan juga menekankan pentingnya pelaksanaan reklamasi dan rehabilitasi lahan pasca-pertambangan. Dengan demikian, pengelolaan lingkungan dan manajemen risiko dapat menjaga keseimbangan ekologis antara kegiatan pertambangan, lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat, (Wulandari *et al.*, 2025).

Lingkungan pertambangan merupakan sebuah entitas kompleks yang mencakup seluruh komponen fisik, biologis, dan sosial yang terdampak oleh aktivitas industri, mulai dari lokasi eksploitasi mineral dan batubara hingga infrastruktur pendukungnya. Aktivitas ini secara sistematis mengubah kondisi lahan serta kualitas air dan udara. Secara spesifik, penelitian oleh (Linggasari *et al.*, 2025), menyoroti bahwa pertambangan terbuka yang beroperasi di dekat aliran sungai memberikan tekanan besar pada kualitas air, yang merupakan sumber kehidupan krusial bagi masyarakat sekitar.

Dampak yang dihasilkan oleh industri pertambangan bersifat dualistik dan memengaruhi berbagai perspektif:

- Perspektif Biologis: Flora, fauna, dan keseimbangan ekosistem di sekitar area tambang sering kali mengalami gangguan signifikan akibat degradasi habitat.
- Perspektif Sosial-Ekonomi: Di satu sisi, aktivitas ini menciptakan lapangan kerja dan meningkatkan kesejahteraan serta pendapatan regional. Menurut (Aldiyansyah *et al.*, 2025) masyarakat dapat merasakan manfaat nyata seperti peningkatan kualitas pendidikan, namun di sisi lain harus menghadapi eksternalitas negatif berupa polusi suara (kebisingan) dan penurunan kualitas lingkungan hidup.

Mengingat kerentanan lingkungan yang tinggi, pengelolaan pertambangan harus dilakukan secara terintegrasi dan berkelanjutan dengan mengedepankan prinsip kehati-hatian. Langkah-langkah mitigasi dan pencegahan perlu diterapkan sejak tahap awal untuk mencegah kerusakan lahan yang lebih luas. Pada akhirnya, keberhasilan pengelolaan ini sangat bergantung pada bagaimana perusahaan menyeimbangkan eksploitasi mineral dengan pemberdayaan masyarakat setempat serta

pemulihan ekosistem guna menjamin keberlangsungan fungsi lingkungan di masa depan.

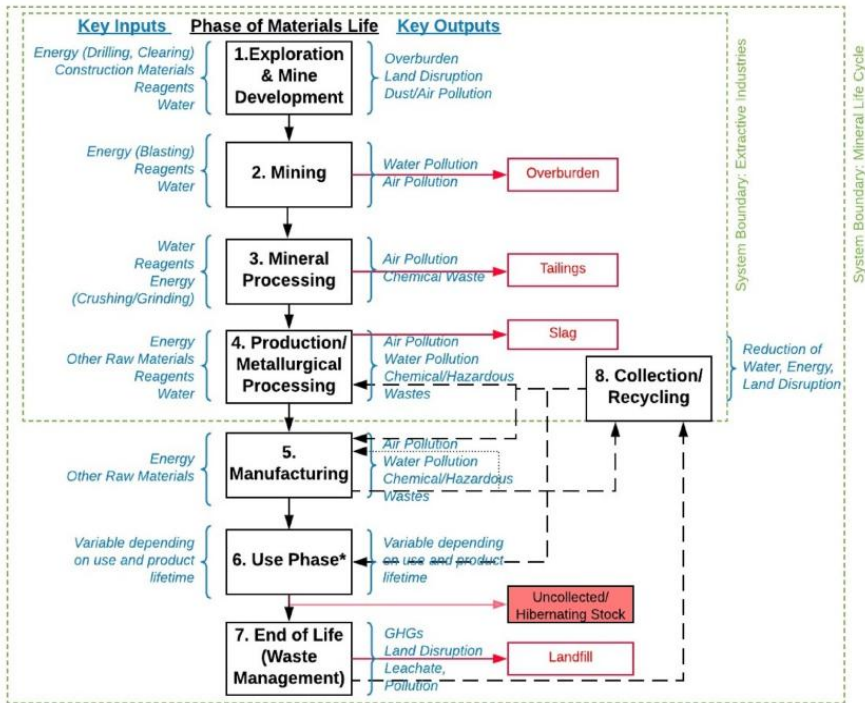
Dalam industri pertambangan modern, penerapan prinsip ESG (*Environment, Social, and Governance*) telah menjadi standar krusial untuk menjamin keberlanjutan operasional. Sebagaimana dijelaskan oleh (Salieiev, 2024) aspek sosial dalam ESG mencakup enam indikator kunci yang saling terkait:

1. Kemampuan kerja (produktivitas dan K3);
2. Hubungan antar-karyawan (inklusivitas dan kesetaraan);
3. Tim manajemen (kompetensi dan keragaman);
4. Hubungan dengan masyarakat (hak asasi dan pembangunan regional);
5. Budaya perusahaan (etika perilaku); dan
6. Inisiatif sosial (filantropi serta program sosial internal maupun eksternal).

Pengelolaan pertambangan yang berkelanjutan tidak hanya berfokus pada manfaat ekonomi, tetapi juga harus menekankan upaya pengurangan dampak ekologis. Isu utama seperti kerusakan lanskap, degradasi visual, gangguan aliran air, hingga polusi udara dan suara sering kali memicu konflik sosial. Oleh karena itu, perusahaan memiliki kewajiban moral dan hukum untuk melakukan reklamasi lahan pascatambang serta pengelolaan limbah dan *tailing* guna mengembalikan fungsi lingkungan mendekati kondisi aslinya. Salah satu tantangan lingkungan yang paling krusial adalah pengelolaan limbah batuan dan air buangan tambang. Menurut (Salieiev, 2024) menekankan bahwa zat berbahaya seperti sulfat dan logam berat membawa ancaman serius bagi ekosistem dan kesehatan masyarakat. Dalam hal ini, pemahaman terhadap proses geokimia yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme menjadi dasar penting untuk merancang strategi berbasis biologis guna mengendalikan pelepasan kontaminan sejak dari sumbernya. Selain itu, lubang bekas

tambang yang dibiarkan terbuka tanpa pengamanan yang transparan dan partisipatif berisiko tinggi terhadap keselamatan publik dan dapat memicu konflik antar-pemangku kepentingan.

Meskipun fokus operasional saat ini telah mendorong pengembangan indikator yang lebih terukur, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan jika hanya menitikberatkan pada lokasi tambang. Untuk pemahaman yang komprehensif, diperlukan pendekatan siklus hidup menyeluruh (*life cycle assessment*) terhadap material tambang, dengan mempertimbangkan proyeksi kebutuhan masa depan yang dipengaruhi pertumbuhan ekonomi global. Pemanfaatan sumber daya mineral dan batubara harus direncanakan secara efektif sejak tahap eksplorasi hingga pascatambang untuk menciptakan nilai tambah bagi negara dan meningkatkan daya saing global tanpa mengorbankan keseimbangan lingkungan.



Gambar 4. 1 Siklus Hidup dan Dampak Lingkungan Terkait Material Tambang.

Sumber: (Gorman & Dzombak, 2018)

Keberhasilan integrasi antara operasional tambang dan pelestarian lingkungan dapat dicapai melalui teknologi yang tepat. Penelitian (Hadi & Amin, 2025) menunjukkan bahwa penerapan metode *hydroseeding* dengan pengaturan jarak tanam yang optimal mampu memulihkan fungsi ekosistem melalui peningkatan penyerapan karbon dioksida (CO₂) dan produksi oksigen (O₂). Dengan demikian, perencanaan lingkungan yang disusun secara menyeluruh sejak tahap studi kelayakan hingga fase pascatambang akan menjamin produktivitas lahan di masa depan, meminimalkan dampak jangka panjang, serta memastikan keberlangsungan seluruh unsur kehidupan yang menopang makhluk hidup.

4.2 Identifikasi Dampak dan Penurunan Mutu Lingkungan

Sebelum mengkaji lebih dalam mengenai dampak industri ekstraktif, pemahaman mengenai konsep degradasi lingkungan menjadi sangat fundamental. Degradasi ini merupakan kondisi penurunan mutu lingkungan akibat kerusakan fisik yang mereduksi fungsi unsur-unsur alam. Dalam jangka panjang, aktivitas pertambangan yang meluas berpotensi menurunkan daya dukung lingkungan melalui pencemaran air, tanah, dan udara, serta hilangnya keanekaragaman hayati lokal. Kondisi ini sering kali diperparah oleh aspek sosial-budaya, seperti keterbatasan sumber daya manusia dan masuknya pengaruh luar yang tidak selaras dengan adat istiadat setempat.

Pada tahap prospeksi dan eksplorasi, dampak lingkungan umumnya masih bersifat terbatas. Namun, skala dampak berubah drastis saat proses ekstraksi dimulai. Menurut (Ortiz-Castillo *et al.*, 2021) pembukaan area tambang dan pembuangan sisa hasil tambang memicu kerusakan vegetasi, hilangnya lapisan tanah, serta perubahan morfologi permukaan. Lebih jauh lagi, terbukanya batuan induk memungkinkan terjadinya oksidasi mineral sulfida yang menghasilkan air asam tambang dan pelepasan logam berat. Aktivitas ini mempercepat erosi dan sedimentasi yang bersifat jangka panjang, sehingga memerlukan pengelolaan terpadu sejak dini.

Selain kerusakan bentang alam, aktivitas teknis seperti pengeboran dan peledakan menimbulkan gangguan berupa kebisingan dan getaran tanah. Menurut (Wahyudi Pratama Putra Sangadji, M Fadil Bellico, 2022) getaran yang dihasilkan dari kegiatan peledakan berpotensi menimbulkan kerusakan pada bangunan di sekitar area kegiatan. Oleh karena itu, diperlukan penerapan sistem manajemen getaran yang efektif guna melindungi masyarakat.

Dampak pertambangan skala besar sering kali bersifat permanen dan lebih sulit dipulihkan dibandingkan penggunaan lahan untuk pertanian. Selain dampak langsung, terdapat pula "efek bayangan" (*shadow effect*), di mana kerusakan meluas ke wilayah sekitar akibat pembangunan infrastruktur pendukung seperti jalan raya, jalur kereta api, dan pembangkit listrik. Fenomena ini menciptakan interaksi kompleks antara area konsesi dan wilayah sekitarnya, yang menuntut tanggung jawab perusahaan tidak hanya terbatas pada area operasional tetapi juga mencakup kawasan terdampak secara luas.

Mengingat tingginya kerentanan ekosistem, upaya pemulihan tidak boleh ditunda hingga seluruh proses penambangan selesai. Menurut (Zalukhu, 2019) terdapat tiga pendekatan utama untuk mencegah dan menanggulangi dampak tersebut:

1. **Pendekatan Teknologi:** Langkah *preventif* seperti pengelolaan jalan tambang untuk mengurangi paparan debu dan penggunaan alat pelindung diri.
2. **Pendekatan Lingkungan:** Melalui rehabilitasi, reklamasi, dan revegetasi cepat untuk memulihkan fungsi ekosistem (seperti penyerapan (CO₂) serta menghilangkan risiko lubang tambang yang membahayakan.
3. **Pendekatan Administratif:** Penegakan hukum yang tegas oleh pemerintah terhadap perusahaan yang melanggar regulasi lingkungan.

Integrasi ketiga pendekatan ini menunjukkan bahwa pembangunan ekonomi melalui pemanfaatan sumber daya mineral dapat berjalan selaras dengan pelestarian lingkungan, asalkan dikelola dengan prinsip keberlanjutan dan penghormatan terhadap hak-hak masyarakat lokal.

Kegiatan pertambangan merupakan sektor yang memanfaatkan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan memiliki tingkat risiko yang tinggi, sehingga berpotensi menimbulkan dampak fisik dan lingkungan yang lebih besar dibandingkan sektor industri lainnya. Menurut (Worrall *et al.*, 2009) menekankan bahwa dampak pertambangan, baik positif maupun negatif, melintasi batas-batas lingkungan, sosial, ekonomi, hingga politik. Sebagai respons terhadap tantangan-tantangan ini, pengelolaan dan pengendalian kegiatan pertambangan diwujudkan melalui konsep dan program terstruktur dalam kerangka perlindungan dan pengelolaan lingkungan. Upaya ini bertujuan untuk memastikan keberlanjutan ekosistem dan telah diatur secara tegas dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan.

Secara operasional, pertambangan memicu berbagai isu lingkungan yang kompleks. Menurut (Waller-Hunter, 2001), dampak utamanya meliputi polusi udara, tantangan dalam pengelolaan limbah, penurunan kualitas udara, dan peningkatan emisi gas rumah kaca. Emisi tersebut terjadi akibat gangguan keseimbangan radiasi energi atmosfer yang dipicu oleh perubahan penggunaan lahan serta penggunaan alat berat berbahan bakar fosil yang menghasilkan CO₂. Kondisi ini tidak hanya memperburuk perubahan iklim, tetapi juga mengancam keanekaragaman hayati dan menghambat pencapaian target pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, pengoperasian alat berat perlu dikendalikan secara ketat guna menekan pelepasan emisi ke atmosfer.

Selain emisi, polusi udara yang dihasilkan dari proses transformasi energi menjadi ancaman serius bagi kesehatan manusia dan keberlanjutan ekosistem, termasuk risiko terjadinya hujan asam. Menanggapi hal ini (Prasad *et al.*, 2015) menekankan pentingnya penerapan langkah-langkah

pengendalian polusi yang hati-hati, pemantauan dampak secara berkala, serta rehabilitasi lingkungan di area sekitar tambang.

Dampak fisik yang paling nyata terlihat pada perubahan lanskap dan degradasi kualitas ekosistem secara menyeluruh (Sheoran, 2010). Lahan bekas pertambangan sering kali ditandai dengan area gundul, tumpukan batuan sisa, serta kerusakan struktur tanah yang mengganggu ekosistem mikroba dan siklus nutrisi. Karakteristik lahan pascatambang umumnya berkualitas rendah karena memiliki kandungan logam tinggi, tekstur berpasir, dan minim bahan organik. Jika tidak dikelola melalui reklamasi yang tepat, kondisi ini akan memicu masalah sistemik seperti erosi masif, polusi berkelanjutan, hilangnya keanekaragaman hayati, hingga kerugian ekonomi jangka panjang bagi wilayah terdampak.

Industri pertambangan merupakan sektor bisnis yang aktivitasnya berpotensi mengubah kondisi rona lingkungan awal (Jolo *et al.*, 2018). Secara teknis, metode penambangan terbuka (*surface mining*) cenderung memicu degradasi lingkungan yang signifikan akibat pengupasan lapisan penutup dalam skala luas. Sebaliknya, metode penambangan bawah tanah, seperti *room and pillar*, memiliki risiko spesifik berupa penurunan permukaan tanah (*subsidence*) jika lubang bukaan tidak ditopang dengan memadai. Meskipun berbeda secara operasional, (Epstein *et al.*, 2012) menyatakan bahwa secara konseptual, penambangan terbuka memiliki kesamaan dengan penambangan bawah tanah, terutama dalam hal pemodelan geologi yang memperhitungkan bentuk dan geometri lubang tambang serta penerapan ketentuan teknis, seperti batas kemiringan maksimum, untuk mencegah runtuhnya dinding tambang.

Secara umum, kehidupan manusia dalam perspektif ekonomi, sosial, dan budaya sangat bergantung pada ketersediaan mineral dan logam (Dubínski, 2013). Namun, mengingat deposit mineral merupakan sumber daya yang

tidak dapat diperbarui, implementasi pengelolaan mineral berkelanjutan serta peningkatan efisiensi pemanfaatannya di masa depan menjadi sangat krusial. Kondisi ini didorong oleh perkembangan teknologi, keterbatasan sumber daya, serta kompleksitas tantangan lingkungan dan sosial.

Dalam praktiknya, pengelolaan sumber daya mineral dan lingkungan diarahkan pada pemanfaatan yang mampu meminimalkan dampak negatif di seluruh tahapan ekstraksi. Menurut (Hatayama *et al.*, 2014) menyatakan bahwa upaya mereduksi dampak penambangan merupakan tantangan utama dalam memperpanjang ketersediaan sumber daya sekaligus melindungi ekosistem di daerah pertambangan. Hal ini menjadi krusial mengingat dalam proses penambangan dan pengolahan konvensional, sejumlah besar logam sering kali hilang sebagai limbah (*tailing/slag*), yang tidak hanya mereduksi nilai ekonomi tetapi juga meningkatkan beban pencemaran lingkungan.

Dalam siklus proyek, estimasi sumber daya mineral merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan eksplorasi serta berkaitan erat dengan perizinan, aspek lingkungan, dan sosial. Oleh karena itu, menurut (Weatherstone, 2005) menekankan pentingnya mengintegrasikan studi sosial dan lingkungan sejak tahap awal eksplorasi agar sumber daya yang teridentifikasi dapat dikelola untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Penentuan cadangan mineral pun memerlukan pertimbangan komprehensif terhadap *modifying factor* yang mencakup teknik penambangan, metalurgi, pemasaran, ekonomi, hukum, lingkungan, aspek sosial, dan kebijakan pemerintah. Tanpa pengelolaan yang tepat, kegiatan penambangan dapat memicu degradasi lahan ekstrem, penurunan keanekaragaman hayati, dan kontaminasi tanah yang mengancam keberlangsungan hidup masyarakat sekitar

Dampak lingkungan dan strategi pengelolaan dalam penambangan berbagai jenis mineral dan batubara.

1. Emas

Berdasarkan karakteristik endapan emas, kegiatan pertambangan umumnya dilakukan dengan metode pertambangan bawah tanah, seperti metode *cut and fill*, dan pertambangan terbuka. Potensi dampak lingkungan meliputi pembentukan drainase asam tambang, penurunan dan bahkan hilangnya spesies endemik, dan pencemaran lingkungan akibat proses pengolahan emas. Kebijakan pengelolaan lingkungan diarahkan untuk membatasi luas area penambangan agar keberlanjutan ekosistem lokal tetap terjaga sehingga keberadaan spesies endemik tetap ada. Selain itu, pengelolaan drainase asam tambang dilakukan melalui implementasi rencana pengelolaan lapisan penutup dan sistem pengelolaan air, sedangkan limbah dari pengolahan bijih perlu ditangani melalui proses detoksifikasi.

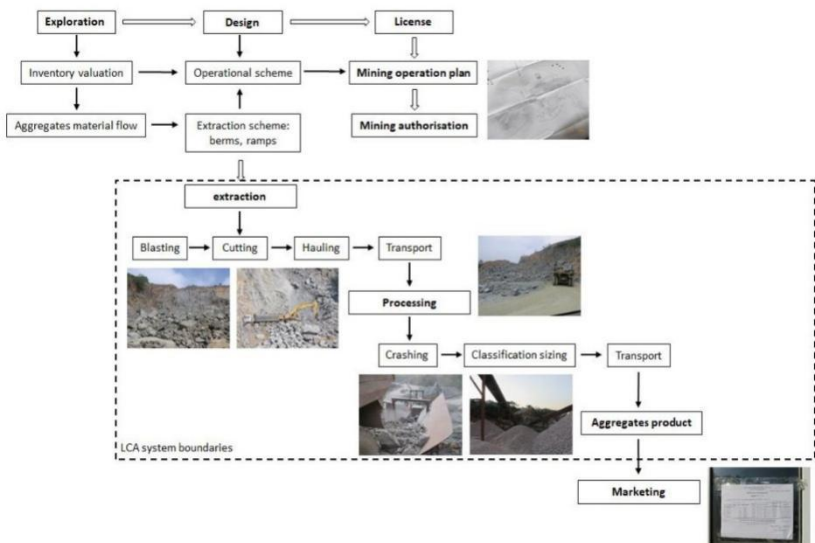
2. Nikel

Pertambangan nikel umumnya menggunakan metode pertambangan terbuka, metode yang mirip dengan pertambangan terbuka, dengan perbedaan utama yaitu lapisan penutup langsung ditimbun kembali ke area yang ditambang. Aktivitas ini berpotensi menyebabkan pencemaran air dan erosi tingkat tinggi akibat pembukaan lahan. Upaya pengelolaan lingkungan dapat dilakukan dengan membatasi luas lubang tambang untuk mengurangi risiko erosi, menerapkan sistem pengelolaan air, dan melakukan pengelolaan lahan pasca penambangan.

3. Mangan

Aktivitas penambangan mangan dengan metode penambangan terbuka juga berpotensi menyebabkan

dampak lingkungan. Dampak yang mungkin terjadi meliputi perubahan lanskap yang meningkatkan risiko erosi dan pencemaran air. Selain itu, proses pengolahan bijih mangan menghasilkan *tailing* berupa bubur yang mengandung logam berat, seperti besi (Fe) dan mangan (Mn), yang dapat berbahaya jika konsentrasinya tinggi. Pengelolaan lingkungan dilakukan dengan membatasi luas lubang tambang, menerapkan sistem pengelolaan air, dan pengolahan *tailing* yang tepat.



Gambar 4. 2 Diagram Alir Operasi Pertambangan

Sumber: (Vladimir Lapcik, Ondrej Kohut, Petr Novak, 2018)

4. Batubara

Aktivitas penambangan batubara berpotensi menyebabkan penurunan signifikan pada permukaan air tanah, berkurangnya aliran sungai, dan berkurangnya limpasan air selama musim kemarau. Selain itu, penurunan permukaan tanah di bekas daerah

pertambangan dan pembentukan retakan yang menjadi jalur aliran air dapat mengakibatkan hilangnya air permukaan, (Luan *et al.*, 2020). Menurut (Hudson-edwards, 2020) dampak juga menyatakan bahwa dampak penambangan batubara meliputi penurunan permukaan tanah, gangguan sistem hidrologi, banjir, pencemaran sumber daya air, dan pengurangan cadangan air tanah akibat aktivitas pertambangan.

4.3 Dampak Spesifik (Fisik, Kimia dan Kesehatan)

4.3.1 Pencemaran Air

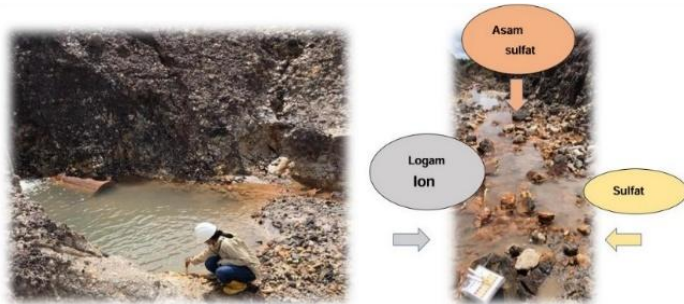
Secara hukum, pencemaran lingkungan dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 sebagai masuk atau masuknya makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain ke lingkungan oleh aktivitas manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Dalam sektor pertambangan, meskipun berperan penting sebagai motor ekonomi nasional, aktivitas ekstraksi batubara secara inheren berisiko menyebabkan degradasi lingkungan, terutama pada kualitas sumber daya air akibat perubahan lanskap.

Menurut (Fatmawati, 2017) mengkategorikan pencemaran air akibat kegiatan pertambangan menjadi tiga kategori:

1. **Fisik:** Ditandai dengan peningkatan kekeruhan, perubahan warna, dan fluktuasi suhu.
2. **Kimia:** Melibatkan perubahan tingkat keasaman (pH) serta tingginya konsentrasi logam berat dan sulfat.
3. **Biologis:** Ditandai dengan keberadaan mikroorganisme patogen yang menurunkan higienitas air.

Selaras dengan hal tersebut, Menurut (Gobel *et al.* 2025) merinci parameter pengendalian mutu air berdasarkan indikator fisik (suhu, bau, warna, TSS), kimia (pH, TDS, DO, BOD, COD, serta logam berat seperti Fe, Mn, Pb, Hg, dan Cr), serta parameter biologis (virus, jamur, dan bakteri).

Salah satu isu lingkungan yang paling serius adalah terbentuknya Air Limbah Tambang Asam (*Acid Mine Drainage/AMD*). Menurut (gautama, 2012) AMD terbentuk saat mineral sulfida dalam batuan bereaksi dengan air (H_2O) dan oksigen (O_2) melalui proses oksidasi biokimia yang dipercepat oleh bakteri. Reaksi ini menghasilkan asam sulfat yang melarutkan logam seperti Mn, Fe, Zn, dan Cu, sehingga menurunkan pH air secara drastis.



**Gambar 4. 3 Kadar Fe dan Mn Tinggi pada
Pertambangan Batubara**

Sumber: (Simamora *et al.* 2024)

Dampak dari AMD bersifat destruktif; (Said, 2014) menambahkan bahwa air ini tidak hanya merusak air permukaan dan air tanah, tetapi juga membahayakan kesehatan penduduk serta kelangsungan hidup organisme akuatik. Berdasarkan Keputusan Menteri

Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003, kisaran pH aman untuk air limbah pertambangan batubara adalah netral, antara 6 dan 9. Jika dibiarkan tanpa pengelolaan, sifat korosif dan beracun dari air limbah ini dapat menyebabkan kerusakan jangka panjang pada ekosistem.

Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan manajemen air tambang yang komprehensif. Langkah preventif dapat dilakukan melalui pemisahan material pembentuk asam dengan metode enkapsulasi atau pembangunan saluran pengalihan agar air tidak melewati zona reaktif. Dalam hal pengolahan, menurut (Agung *et al.* 2020) menunjukkan bahwa penggunaan kapur (Ca(OH)_2) merupakan metode yang paling efektif untuk menetralkan pH air asam hingga memenuhi standar baku mutu. Selain pengolahan kimia (Imami 2022), menekankan perlunya penanganan limbah B3 lainnya, seperti oli bekas dan kemasan bahan kimia, melalui teknologi stabilisasi logam berat dan sistem pemantauan kualitas air yang ketat.

Keberhasilan industri ekstraktif diukur dari kemampuannya memberikan manfaat ekonomi tanpa mengorbankan kualitas lingkungan. Menurut (Fatmawati, 2017) menekankan bahwa pengelolaan air harus menjadi prioritas dalam perencanaan pra-penambangan yang didukung oleh penegakan hukum yang tegas serta transfer teknologi kepada pemangku kepentingan. Secara umum, kerugian lingkungan dipengaruhi oleh faktor teknis (volume polutan, durasi, dan luas area terdampak) serta faktor non-teknis (kebijakan pemerintah dan aspek ekonomi). Oleh karena itu, standar kualitas lingkungan tetap menjadi batas toleransi absolut guna memastikan keberlangsungan unsur kehidupan bagi generasi saat ini maupun masa depan.

4.3.2 Pencemaran Tanah

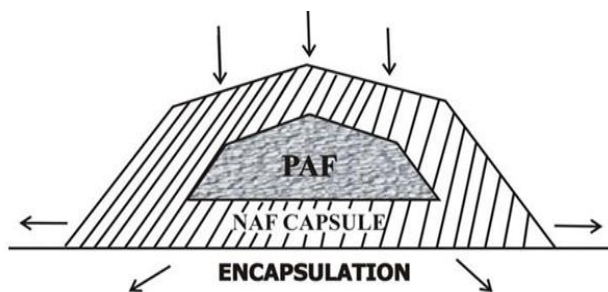
Kerusakan lahan akibat sistem pertambangan terbuka menyebabkan perubahan fundamental pada sifat fisik, kimia, dan biologis tanah yang mengganggu fungsi ekologisnya secara luas. Aktivitas ini secara terus-menerus mengubah lanskap melalui pembukaan lapisan tanah stabil, yang memicu hilangnya lapisan subur (*topsoil*), peningkatan kerentanan terhadap erosi, serta pemadatan tanah. Menurut (Afrianti and Purwoko 2020) meskipun memberikan manfaat ekonomi, dampak negatif pertambangan terbuka seperti pencemaran air, udara, dan penurunan keanekaragaman hayati dianggap jauh lebih dominan bagi lingkungan lokal.

Pencemaran tanah di area pertambangan berdampak langsung pada sektor pertanian melalui akumulasi logam berat yang dapat masuk ke rantai makanan. Penelitian (Sarief 2019) melaporkan temuan serius di mana kandungan timbal (Pb) pada tanaman pangan seperti pisang dan pepaya di sekitar area tambang telah melebihi ambang batas aman 0,5 mg/kg. Selain melalui konsumsi, risiko kesehatan manusia muncul melalui debu yang terbawa angin (mengandung arsenik dan radionuklida) serta kontaminasi tanah dari tumpahan bahan kimia berbahaya yang digunakan dalam operasional tambang.

Masalah geokimia yang paling krusial adalah paparan mineral sulfida, seperti pirit (FeS_2), terhadap udara dan air hujan. Proses oksidasi ini menghasilkan asam sulfat yang menurunkan pH secara drastis serta melarutkan logam berat toksik (Hg, Cd, Cu) ke badan air. Secara fisik, konversi lahan mengurangi kapasitas infiltrasi tanah sehingga material halus lebih mudah terbawa aliran permukaan ke sungai. Menurut (Alhakim *et al.* 2025) menjelaskan bahwa perubahan fisik Daerah Aliran Sungai (DAS) ini meningkatkan kekeruhan air

yang menghambat fotosintesis alga, merusak insang ikan, serta menyebabkan pendangkalan waduk.

Untuk memutus rantai reaksi kimia pembentukan asam, diterapkan teknik enkapsulasi. Metode ini melibatkan pengelolaan material yang *Potencial Acid Forming* (PAF) dengan melapisinya menggunakan material *Non Acid Forming* (NAF), sehingga interaksi antara mineral sulfida dengan air dan oksigen dapat dicegah.



Gambar 4. 4 Metode *Encapsulation*

Sumber: (Bantar Tyas Sukmawati Rukmana, Aris Winarno 2018)

Upaya pemulihan lahan pascatambang membutuhkan pengelolaan lingkungan yang adaptif. Mengingat sulitnya revegetasi pada tanah yang padat dan miskin nutrisi, pemilihan jenis vegetasi yang tepat menjadi kunci. Tanaman seperti karet dan kelapa sawit dapat dipertimbangkan karena daya adaptasinya yang baik serta nilai ekonomi bagi masyarakat.

Keberhasilan pemulihan ini sangat bergantung pada kebijakan lingkungan yang ketat. Menurut (Sukananda and Nugraha 2020), menegaskan bahwa Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) serta UKL-UPL memiliki peran strategis sebagai instrumen pencegahan

pencemaran dan penjamin komitmen perusahaan. Sinergi antara regulasi yang kuat, teknologi yang tepat seperti enkapsulasi, dan peningkatan kesadaran lingkungan merupakan kunci untuk mewujudkan pembangunan berkelanjutan yang melindungi hak masyarakat serta menjamin ketahanan ekosistem bagi generasi mendatang.

4.3.3 Penceraman Udara

Setiap aktivitas pertambangan berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap keseimbangan karbon global. Operasi skala besar sering kali mengubah konsentrasi karbon di atmosfer melalui dua jalur utama: berkurangnya kemampuan penyerapan (CO_2) akibat deforestasi lahan dan tingginya emisi gas buang dari penggunaan alat berat berbahan bakar diesel selama proses ekstraksi serta pengangkutan. Penurunan fungsi vegetasi ini sangat krusial karena penyimpanan (CO_2) memainkan peran vital dalam menjaga stabilitas iklim dunia. Emisi udara terjadi di sepanjang siklus pertambangan, mulai dari tahap eksplorasi hingga operasi. Aktivitas yang melibatkan pergerakan material besar menghasilkan partikel halus yang mudah tersebar oleh angin. Secara umum, sumber utama polusi udara meliputi:

- Partikulat dan Debu: Berasal dari erosi angin di area *tailing*, tumpukan material, jalan angkut, serta aktivitas tambang terbuka.
- Emisi Gas Buang: Dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada mesin generator, kendaraan berat, dan aktivitas peledakan.
- Proses Pengolahan: Menurut (Chang & Li, 2020), proses penghancuran fisik dan peleburan pada suhu tinggi berkontribusi besar terhadap peningkatan

konsentrasi logam berat, khususnya timbal (Pb), dalam debu di sekitar area industri.

Paparan polutan ini menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi manusia. Menurut (Fatmawati, 2017), menjelaskan bahwa terhirupnya partikel halus secara terus-menerus dapat memicu pneumokoniosis, yaitu penyakit paru-paru akibat pengendapan debu di jaringan paru-paru. Guna memitigasi risiko tersebut, pemerintah menetapkan standar kualitas udara ambien. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, polusi udara didefinisikan sebagai masuknya zat atau komponen lain ke udara akibat aktivitas manusia yang melebihi standar kualitas yang ditetapkan dengan mempertimbangkan aspek kesehatan, sosial, dan ekonomi.

Pengendalian polusi udara merupakan prioritas utama dalam menjaga keberlanjutan lingkungan pertambangan. Beberapa langkah efektif yang dapat dilakukan meliputi:

1. Perawatan Rutin: Melakukan servis berkala pada kendaraan dan alat berat untuk menekan emisi karbon.
2. Optimasi Operasional: Menyesuaikan kapasitas alat angkut dengan *bucket* ekskavator guna menghindari pemborosan bahan bakar (efisiensi termal).
3. Manajemen Debu: Penggunaan truk air untuk penyiraman jalan tambang dan area pembuangan secara terjadwal guna menekan sebaran partikulat.



Gambar 4. 5 Aktivitas *Water Truck* dalam Meredam Debu

Sumber: (Gumanti & Permatasari, 2024)

Evaluasi keberhasilan langkah-langkah ini dilakukan melalui pemantauan rutin terhadap parameter emisi gas dan partikulat di udara, guna memastikan bahwa aktivitas industri tetap berada dalam batas toleransi lingkungan yang aman.

4.3.4 Kebisingan

Kebisingan didefinisikan sebagai suara yang timbul dari suatu aktivitas pada waktu tertentu yang berpotensi mengurangi kualitas kesehatan manusia serta mengganggu kenyamanan lingkungan. Dalam industri pertambangan, salah satu sumber utama gangguan ini adalah kegiatan peledakan. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 48 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebisingan, ambang batas maksimum yang diperbolehkan di area pemukiman adalah 55 dB. Namun, menurut (Muhammad Busyairi, 2011), pengukuran di lapangan sering kali menunjukkan bahwa intensitas suara dari aktivitas peledakan dapat

melonjak hingga lebih dari 70 dB(A), sehingga melampaui standar keamanan yang ditetapkan.

Mengingat tingginya risiko tersebut, penerapan program konservasi kebisingan menjadi esensial untuk menjaga kualitas kesehatan pekerja dan masyarakat sekitar. Menurut (Haryandi, Veno Rori Setiawan, 2020) merinci bahwa program konservasi yang efektif dapat diimplementasikan melalui langkah-langkah strategis sebagai berikut:

- **Pemantauan dan Evaluasi:** Melakukan survei berkala terhadap tingkat kebisingan, pemeriksaan audiometri pada pekerja untuk memantau kesehatan telinga, serta melakukan audit efektivitas program secara rutin.
- **Mitigasi Teknis dan Administratif:** Mengendalikan sumber bising melalui rekayasa teknis, mengatur jadwal operasional (administratif), serta menyediakan alat pelindung pendengaran bagi pekerja yang terpapar langsung.
- **Edukasi dan Pelaporan:** Memberikan pelatihan intensif mengenai risiko kebisingan serta melakukan pencatatan dan pelaporan hasil pengendalian secara transparan.

Pendekatan komprehensif ini memastikan bahwa aktivitas pertambangan tetap dapat berjalan produktif tanpa mengabaikan aspek kesehatan manusia dan kepatuhan terhadap standar batas aman yang telah ditetapkan oleh pemerintah.

Tingkat kebisingan di area pertambangan secara dominan bersumber dari aktivitas ekstraksi mineral serta mobilitas transportasi pengangkutan batubara. Titik-titik kebisingan ini umumnya terkonsentrasi pada jalur angkut (*hauling road*), lokasi pembuangan

(*disposal*), dan area penggalian aktif. Menurut (Sugianto, 2020), kebisingan merupakan suara yang timbul dari aktivitas tertentu yang berpotensi menurunkan kualitas kesehatan manusia serta mengganggu kenyamanan lingkungan sekitar.

Untuk memperoleh data yang akurat dan representatif, (Syarif Hidayat, 2012), menekankan bahwa pengukuran harus dilakukan saat peralatan beroperasi dalam kondisi normal di setiap titik lokasi kerja. Lebih lanjut (Sugianto, 2020) menyarankan pengukuran dilakukan pada empat waktu yang berbeda guna menangkap fluktuasi intensitas suara sepanjang periode operasional:

1. L_{tm5} : nilai setara untuk pengukuran 10 menit dengan rekaman setiap 5 detik (menggunakan metode langsung melalui pengukuran tingkat suara yang mengintegrasikan data).
2. L_s : Nilai setara untuk pengukuran siang hari yaitu antara pukul 06.00-22.00.
3. L_M : Nilai setara untuk pengukuran malam hari yaitu antara pukul 22:00-06:00
4. L_{sm} : Nilai setara untuk periode pengukuran (24 jam penuh)

Setiap pengukuran harus mewakili interval waktu tertentu dengan melakukan minimal empat pengukuran pada siang dan tiga pengukuran pada malam hari.

Pengumpulan data dilakukan dalam tujuh tahap yang tersebar sepanjang hari. Dimulai dengan L1 pada pukul 07.00 (mencakup periode 06.00–09.00), diikuti L2 pada pukul 10.00 (09.00–11.00), dan L3 pada pukul 15.00 (14.00–17.00). Untuk fase malam, L4 diambil pada pukul 20.00 untuk merepresentasikan rentang waktu 17.00–22.00, disusul L5 pada pukul 23.00 (22.00–24.00). Terakhir, siklus dini hari diwakili oleh L6 pada pukul

01.00 (24.00–03.00) dan ditutup oleh L7 pada pukul 04.00 (03.00–06.00).

Metode perhitungan L_s dapat dihitung sebagai berikut:

$$L_s = 10 \log \frac{1}{16} \{T1. 10^{0.1.L1} + \dots + T4. 10^{0.1.L4}\} \text{ dB (A)}$$

L_M dapat dihitung sebagai berikut:

$$L_M = 10 \log \frac{1}{8} \{T5. 10^{0.1.L5} + \dots + T7. 10^{0.1.L7}\} \text{ dB (A)}$$

Untuk mengetahui apakah tingkat kebisingan telah melebihi batas yang ditetapkan, perlu ditentukan nilai L_{SM} dari hasil pengukuran lapangan. L_{sm} dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$L_{SM} = 10 \log \frac{1}{24} \{16. 10^{0.1.LS} + \dots + 8. 10^{0.1(L_M+5)}\} \text{ dB (A)}$$

Evaluasi dilakukan dengan membandikan nilai L_{SM} yang diperoleh dari pengukuran lapangan terhadap baku tingkat kebisingan standar yang berlaku dengan toleransi + 3 dB (A), yang mana nilai ambang batas tersebut mengacu pada Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Lingkungan Kerja

Urgensi pengendalian ini hal ini didasari oleh fakta bahwa kedekatan individu terhadap sumber bising berbanding lurus dengan risiko yang diterima. Menurut (Hasanudin, Hanum Sasmita, 2021) menyatakan bahwa paparan bising yang intens dapat memicu berbagai gangguan kesehatan, mulai dari kesulitan berkonsentrasi dan gangguan pendengaran hingga masalah sistemik seperti hipertensi, gangguan tidur, serta kelelahan kronis.

Strategi pengendalian kebisingan dapat dilakukan melalui pendekatan alami maupun teknis. Salah satu metode yang efektif adalah mempertahankan

keberadaan vegetasi, seperti tanaman karet, di sekitar area tambang sebagai baris penahan suara (*noise barrier*). Langkah ini tidak hanya berfungsi mereduksi kebisingan, tetapi juga menjaga stabilitas tanah dan tutupan lahan. Secara teknis, selain pemasangan peredam suara pada mesin, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pendengaran wajib bagi pekerja yang berada di area dengan risiko tinggi. Peralatan ini meliputi:

- Penyumbat Telinga (*Ear Plug*): Berbahan busa atau karet yang dimasukkan ke saluran telinga luar untuk memblokir suara keras secara langsung.
- Penutup Telinga (*Ear Muff*): Alat berbentuk menyerupai *headset* yang menutupi seluruh daun telinga. Alat ini dinilai lebih efektif dalam mereduksi kebisingan dibandingkan penyumbat telinga karena mampu memberikan perlindungan yang lebih menyeluruh.

4.3.5 Getaran

Getaran didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu massa melewati posisi keseimbangannya relatif terhadap titik acuan tertentu. Dalam industri pertambangan, getaran merupakan parameter krusial yang harus dikendalikan agar dampak negatifnya terhadap lingkungan dan infrastruktur tetap berada di bawah ambang batas yang ditetapkan. Fokus utama dalam pengendalian risiko ini adalah penentuan radius peledakan yang aman guna melindungi area pemukiman dan struktur bangunan di sekitarnya.

Sumber utama getaran dalam operasional tambang umumnya berasal dari aktivitas peledakan untuk memecah material batuan. Namun, pada area yang belum dilakukan peledakan, getaran juga dapat timbul dari pergerakan kendaraan berat dan peralatan

mekanik, terutama di sepanjang jalan pertambangan serta area penggalian aktif. Untuk memitigasi dampak dari aktivitas kendaraan, perusahaan dapat menerapkan strategi pembatasan penggunaan peralatan mekanik di lapangan dan memaksimalkan jam operasional pada waktu produktif, seperti pada siang hari.

Untuk menjaga tingkat getaran agar tetap sesuai standar tanpa mengurangi kualitas hasil peledakan, diperlukan pengaturan teknis yang presisi. Berdasarkan hasil penelitian (Bochori, A Suherman, 2021), pengendalian getaran yang efektif dapat dicapai dengan menyesuaikan geometri peledakan, yakni mengatur jarak antar lubang sebesar 3 meter untuk beban (*burden*) dan 4 meter untuk jarak spasi, dengan berat bahan peledak per lubang dipertahankan pada kisaran 12–15 kg. Pendekatan ini terbukti mampu menjaga konsistensi peledakan meskipun lubang-lubang tersebut ditempatkan dalam jarak yang lebih rapat.

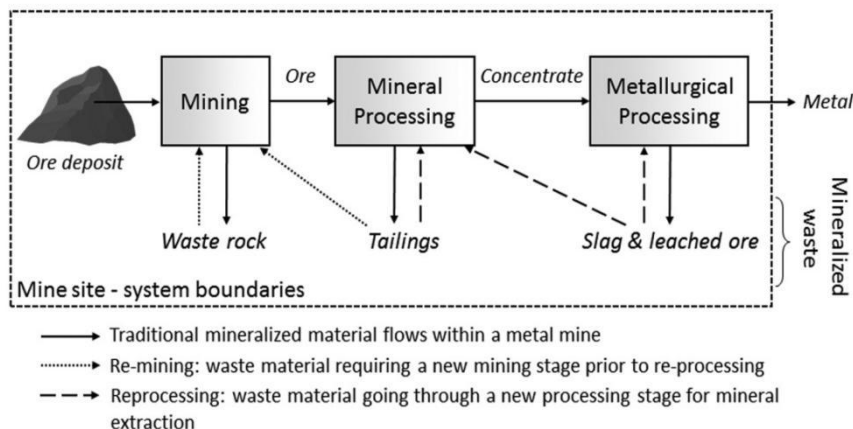
Secara regulasi, ambang batas getaran untuk kegiatan penambangan terbuka, khususnya dampaknya terhadap bangunan, mengacu pada SNI 7571:2010. Standar ini menjadi acuan utama bagi perusahaan dalam melakukan pemantauan rutin untuk memastikan bahwa setiap getaran yang dihasilkan baik dari peledakan maupun aktivitas mekanis masih berada dalam batas toleransi keamanan lingkungan yang berlaku.

4.4 Strategi Pemulihan dan Teknologi Pengelolaan

Operasi penambangan dan pengolahan mineral dapat dilakukan tanpa merusak ekosistem secara signifikan apabila disertai dengan pengelolaan limbah yang tepat, mencakup penanganan lapisan penutup, batuan sisa, dan *tailing* (Mulligan *et al.*, 2011). Fokus utama pengelolaan limbah adalah memastikan stabilitas jangka panjang, baik secara fisik

agar tahan terhadap perubahan iklim dan bencana, maupun secara kimia guna mencegah pelepasan logam berat serta terbentuknya drainase asam tambang. Mengingat pengelolaan yang tidak tepat membawa risiko sosial dan ekologis yang tinggi, limbah harus diisolasi dengan aman untuk membatasi interaksi berbahaya dengan lingkungan sekitar.

Sebagai salah satu penghasil limbah terbesar, industri pertambangan menghasilkan produk sampingan yang sering kali menjadi kontaminan lingkungan. Limbah ini umumnya bersifat asam dan sering ditemukan di permukaan, sehingga pengelolaan kualitas air permukaan selama operasi menjadi sangat krusial. Menurut (Bridge, 2004), menegaskan bahwa penerapan teknologi efektif dalam mencegah dan meningkatkan kualitas drainase asam tambang tidak boleh diabaikan, karena kelalaian dapat memicu insiden berulang yang merusak kualitas air secara permanen. Fenomena ini terjadi akibat reaksi logam dengan air dan oksigen yang menghasilkan logam berat bersifat asam (lindi). Menurut (Akcil & Koldas, 2006) menyatakan bahwa aliran drainase asam ini dapat merusak saluran air dan mengurangi keanekaragaman hayati secara drastis, terutama pada aktivitas penambangan emas, tembaga, dan nikel.



Gambar 4. 6 Diagram Alir Limbah pada Mineral Tambang

Sumber: (Corder & Golev, 2017)

Gambar 4.7 Garis panah putus mewakili contoh dari pemulihan mineral dari limbah. Pada penambangan tembaga (Cu), misalnya, meskipun permintaannya terus meningkat untuk kebutuhan infrastruktur dan elektronik, proses pengolahan bijihnya menghasilkan *tailing* dengan dampak lingkungan yang spesifik (Northey *et al.*, 2014). Selain risiko asam, limbah penambangan logam tertentu juga dapat mengandung zat kimia berbahaya seperti sianida. Oleh karena itu, diperlukan manajemen limbah yang komprehensif meliputi pengumpulan, pengolahan, hingga pembuangan yang aman. Menurut (Corder & Golev, 2017) menekankan bahwa ancaman lingkungan dapat diminimalkan melalui pengelolaan yang proaktif dan preventif, bahkan limbah dapat dimanfaatkan secara optimal untuk memberikan nilai tambah bagi lingkungan.

Secara luas, kualitas air memiliki dampak signifikan pada aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial, sehingga penilaian kualitas air di sekitar area pertambangan harus

melibatkan evaluasi parameter fisik, kimia, mikrobiologis, dan biologis. Dalam konteks ini, indikator utama seperti kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*) dan nitrat berfungsi sebagai tolok ukur fundamental untuk mengevaluasi kesehatan ekosistem sungai yang terdampak aktivitas industri. Pirit (FeS_2) diidentifikasi sebagai penyebab utama pencemaran air, baik yang berasal dari lubang bekas tambang maupun endapan residu.

Menurut (Akcil & Koldas, 2006) Pengelolaan drainase tambang asam bertujuan untuk mereduksi dampak limbah cair hingga tingkat yang dapat ditoleransi oleh lingkungan. Tindakan pencegahan utama dilakukan dengan memastikan air hujan tidak bersentuhan langsung dengan pirit. Selain itu, air tanah yang terasamkan dapat dinetralkan menggunakan kapur atau melalui sistem pengolahan pasif yang mengandalkan proses GEMO dan biologis alami untuk adsorpsi serta pengendapan logam. Untuk mengendalikan air yang terkontaminasi dan mencegah masuknya air ke lokasi pembentukan asam, terdapat empat langkah teknis yang dapat dilakukan:

1. Mengalihkan aliran air permukaan agar tidak menuju lokasi kontaminasi.
2. Mencegah rembesan air hidrologis ke daerah terdampak.
3. Menghalangi infiltrasi air tanah ke zona terkontaminasi.
4. Mengendalikan penempatan serta pembangkitan limbah asam secara sistematis.

Pengelolaan lingkungan yang proaktif merupakan strategi preventif untuk meminimalkan dampak polusi dan produk sampingan terhadap lingkungan, meskipun hal ini menjadi tantangan besar bagi ekosistem yang terpengaruh. Air limbah tambang yang mengandung logam berat dan unsur beracun dapat menimbulkan masalah serius jika terlepas ke badan air di sekitarnya. Oleh karena itu, upaya pengendalian

harus mencakup pengelolaan limbah yang ketat, pengenalan zat alkali, serta penggunaan berbagai metode teknologi pengolahan untuk memulihkan ekosistem (Olena Hasii, 2024).

Tabel 4. 1 Lingkungan terkena Dampak dari Operasi Pertambangan

Aktivitas	Dampak Lingkungan yang ditimbulkan
Pembuangan air limbah	Terbentuknya air asam tambang, pelepasan logam berbahaya
Pengeringan air	Kontaminasi, limbah cair, aliran sedimen, dampak ekologis, gangguan pada sumber air
Peleburan	Polusi udara, debu dan sedimen, emisi gas, tumpahan minyak/bahan bakar, kontaminasi tanah.
Transportasi	Polusi udara, debu dan sedimen, emisi gas, tumpahan minyak/bahan bakar, kontaminasi tanah
Mineral ekstraksi	Erosi, perubahan bentang lahan, penurunan muka air tanah, debu, kerusakan vegetasi dan habitat

Sumber : (Hilson & Murck, 2000)

Menurut (Hilson & Murck, 2000), merekomendasikan strategi komprehensif untuk mengatasi masalah lingkungan yang berdampak langsung pada dimensi sosial dan ekonomi. Strategi tersebut meliputi:

1. Pengumpulan dan pemahaman persepsi masyarakat setempat mengenai pengembangan tambang.
2. Penilaian dampak kegiatan terhadap perilaku, hubungan sosial, ketahanan, hingga praktik keagamaan masyarakat.
3. Keberhasilan proyek bergantung pada tingkat partisipasi masyarakat dalam pelaksanaan proyek dan kemampuan perusahaan dalam menyelesaikan potensi konflik.
4. Perusahaan harus mampu menghitung nilai ekonomi proyek dengan tetap melindungi nilai-nilai budaya serta memastikan manfaat nyata bagi masyarakat di sekitar area pertambangan.

Tantangan lingkungan merupakan bagian integral dari industri pertambangan yang berdampak langsung pada kualitas tanah, air, dan udara, (Dubiński, 2013). Aktivitas pertambangan seringkali memicu perubahan kondisi rona lingkungan yang signifikan, mulai dari deformasi permukaan tanah dan penurunan kesuburan tanah, hingga munculnya emisi gas, debu, dan kebisingan. Upaya untuk mempertahankan produktivitas pun membawa konsekuensi kompleks, seperti lonjakan volume limbah, konflik penggunaan lahan dan air, gangguan visual, serta dampak kumulatif yang dirasakan oleh masyarakat, terutama di daerah dengan kepadatan penduduk tinggi. Oleh karena itu, penerapan teknologi ekstraksi yang tepat menjadi sangat krusial untuk mengurangi atau bahkan mengeliminasi dampak negatif tersebut (Dubiński, 2013).

Secara spesifik, aktivitas pertambangan diketahui menyebabkan degradasi lahan dan kerusakan tanah yang sistemik (Wong, 2003). Sehingga dalam konteks ini, penggunaan model penilaian teknologi dan lingkungan menjadi penting untuk mengevaluasi berbagai skenario penambangan, pengolahan, dan pengelolaan lingkungan. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan proses guna

meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya serta mencapai kinerja lingkungan yang lebih baik, (Durucan *et al.*, 2006).

Dampak fisik yang paling nyata adalah produksi volume besar batuan limbah dan *tailing* yang menumpuk di permukaan tanah dengan karakteristik material yang tidak stabil dan polutif. (Mukhopadhyay *et al.*, 2013) menjelaskan bahwa degradasi lahan terjadi akibat hilangnya tutupan vegetasi karena penggalian dan penumpukan lapisan tanah penutup yang mengubah lanskap secara drastis. Kondisi ini ditandai dengan hilangnya lapisan tanah atas (*topsoil*), peningkatan erosi, tingkat kekeringan yang tinggi, ketidakstabilan permukaan, pemadatan tanah, serta rendahnya ketersediaan nutrisi penting bagi pertumbuhan vegetasi.

Terkait fenomena erosi, menurut (Zhang *et al.*, 2015) menyatakan bahwa tingkat erosi sangat bergantung pada ketahanan tanah terhadap air yang dipengaruhi oleh sifat fisik-kimia tanah, tutupan vegetasi, dan keberadaan serasah. Sebagai langkah mitigasi dan pemulihan, upaya reboisasi pascapenambangan muncul sebagai strategi yang efektif. Program reboisasi ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kualitas tanah dan ketahanan terhadap erosi, tetapi juga berfungsi mengurangi limpasan permukaan serta memperkuat stabilitas ekosistem secara keseluruhan.

Menurut (Bennett, 2016), upaya konservasi saat ini semakin berfokus pada pemantauan dan evaluasi yang mencakup aspek manajemen, tata kelola, ekologi, dan sosial, serta bergeser menuju manajemen adaptif berbasis bukti. Dalam konteks tersebut, sumber daya alam idealnya dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas lingkungan sekaligus memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat sekitar. Namun, menurut (Yaqutunnafis *et al.*, 2021), realitanya kegiatan pertambangan yang eksploitatif sering kali berdampak buruk secara ekologis terhadap masyarakat

dan ekosistem. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan humanis yang memprioritaskan kearifan lokal untuk mengatasi rendahnya kesadaran masyarakat dalam melindungi sumber daya alam. Pertambangan yang ideal harus mempertimbangkan daya dukung lahan guna mencegah eksploitasi berlebihan serta menerapkan praktik pengelolaan lingkungan terbaik (*Good Mining Practice*) yang melibatkan masyarakat dan memanfaatkan mineral secara efisien, (Laurence, 2011).

Secara ekologis, kegiatan pertambangan memengaruhi keanekaragaman hayati dari skala lokal hingga global, baik melalui ekstraksi langsung maupun aktivitas operasional pendukung (Sonter *et al.*, 2018). Perluasan area tambang dan pengelolaan limbah yang buruk dapat merusak lingkungan, memicu perubahan biotik dan abiotik, serta menyebabkan degradasi ekosistem hingga mendekati ambang kepunahan. Penambangan mineral sering menyebabkan kerusakan luas pada tanah dan vegetasi, yang menjadikan area bekas tambang sebagai sumber potensial pencemaran udara dan air akibat perubahan bentuk lahan dan rusaknya habitat, (Mukhopadhyay *et al.*, 2013).

Restorasi ekologis dan reklamasi lahan merupakan instrumen penting untuk memulihkan fungsi ekosistem yang terganggu. Langkah ini bertujuan mengurangi dampak negatif pertambangan sambil menjaga keberlanjutan keanekaragaman hayati (Sheoran, 2010). Lahan yang terganggu memerlukan pengelolaan terhadap berbagai gangguan fisik, kimia, dan biologis seperti pH tanah yang ekstrem (asam <5 atau basa >7), kadar garam tinggi, serta gangguan siklus nutrisi agar tanah kembali produktif (Sheoran, 2010); (Wong, 2003). Kegiatan ini sering difokuskan pada timbunan *overburden* yang menampung limbah tambang, yang selain menurunkan nilai estetika, juga memiliki stabilitas yang rendah.

Dalam proses pemulihan, pengembangan vegetasi penutup lahan (*phytocapping*) sangat krusial untuk meningkatkan stabilitas tanah gersang dan mengurangi dampak lingkungan (Wong, 2003). Vegetasi membantu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah melalui metode fitoremediasi dan fitostabilisasi, terutama pada tanah yang terkontaminasi logam berat, (Karaca, 2019). Reklamasi biasanya melibatkan perataan tanah pucuk (*topsoil*) yang diikuti penanaman rumput atau legum cepat tumbuh untuk membentuk lapisan tebal. Penanaman pohon pada tahap selanjutnya bertujuan mempercepat pembentukan tanah, mengendalikan erosi, dan mengembalikan unsur mikro serta bahan organik. Program ini diarahkan untuk mempertahankan media tanam yang mendukung pertumbuhan jangka panjang (Mukhopadhyay *et al.*, 2013).

Keberhasilan reboisasi sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah dan pemilihan jenis vegetasi (Groninger *et al.*, 2007). Sebagai contoh, pada area yang sebelumnya didominasi hutan pinus, restorasi dapat dilakukan dengan menanam spesies yang mendekati kondisi alami atau pohon pionir yang cepat tumbuh seperti poplar kuning atau akasia hitam. Jika terjadi gangguan yang menghilangkan penutup lahan, revegetasi dilakukan secara bertahap menggunakan tumbuhan pionir seperti rumput dan tanaman herbal. Kombinasi penanaman rumput, rotasi polong-polongan, dan penggunaan spesies lokal serta tanaman hiperakumulator terbukti efektif memulihkan kesuburan tanah, meningkatkan kualitas lingkungan, serta mempercepat suksesi ekologis (Wong, 2003).

4.5 Tata Kelola, Partisipasi dan Keberlanjutan

Penggunaan sumber daya mineral sebagai bahan baku perlu dilakukan secara efisien dengan mengarah pada implementasi daur ulang dan pemulihan limbah yang dihasilkan. Pengelolaan sumber daya mineral juga bertujuan untuk memastikan keamanan pasokan, karena pengelolaan sumber daya harus dilihat dari perspektif risiko dan mencakup tiga dimensi pembangunan yaitu ekonomi, lingkungan dan sosial (Smol *et al.*, 2020).

Dari aspek ekonomi, pengelolaan sumber daya diarahkan untuk meningkatkan daya saing melalui kolaborasi antara pelaku bisnis, konsumen, dan organisasi masyarakat sipil; mendorong inovasi dan pengembangan model bisnis; Menerapkan desain produk ramah lingkungan untuk mengurangi dampak ekologis; mengembangkan pasar bahan baku sekunder melalui praktik daur ulang; menjaga keseimbangan antara harga produk dan biaya penggunaan sumber daya bagi masyarakat; dan mendukung pengembangan teknologi daur ulang melalui instrumen pembiayaan inovatif.

Dari perspektif lingkungan, pengelolaan sumber daya menekankan implementasi desain ramah lingkungan yang lebih akurat mencerminkan biaya lingkungan, pengukuran dampak lingkungan yang berkelanjutan, pemanfaatan limbah yang aman, dan implementasi teknologi ramah lingkungan melalui sistem verifikasi yang andal. Selain itu, kita harus mendorong inovasi dalam proses daur ulang dan penggunaan kembali, menciptakan solusi untuk menghilangkan kontaminan limbah, meningkatkan alat pemodelan untuk menilai bagaimana ekonomi sirkular dalam menurunkan emisi gas rumah kaca, dan memperkuat upaya pengelolaan limbah yang mencakup pencegahan, penggunaan kembali, dan daur ulang.

Sementara itu, dari aspek sosial, pengelolaan sumber daya diarahkan pada penguatan ekonomi kolaboratif, pengembangan layanan yang memenuhi kebutuhan konsumen, penyediaan informasi yang akurat dan relevan, perlindungan konsumen terhadap produk berkelanjutan dan lingkungan, pemberian insentif dan dukungan untuk pengurangan dan pemilahan limbah berkualitas tinggi, dan peningkatan pendidikan bagi berbagai kelompok pemangku kepentingan.

Secara keseluruhan, pengelolaan sumber daya alam memiliki peran strategis dalam menjaga dan memulihkan ekosistem sebagai upaya mitigasi perubahan iklim. Selain itu, aspek sosial pengelolaan lingkungan bergantung prinsip-prinsip tata kelola yang baik, terutama dengan meningkatnya keterlibatan masyarakat (Muhammad Syaiful Anwar, 2022). Hal ini selaras dengan temuan (Ilham, 2024) yang menunjukkan bahwa keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan sumber daya alam memberikan dampak positif yang signifikan, terutama dalam meningkatkan akses terhadap informasi, memperkuat pemberdayaan masyarakat, serta mengembangkan mekanisme penyelesaian konflik guna mengoptimalkan partisipasi publik. Pengelolaan sumber daya alam diharapkan mampu memberikan manfaat optimal bagi kesejahteraan masyarakat tanpa mengesampingkan prinsip keberlanjutan dan kelestarian lingkungan. Salah satu solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas implementasi kebijakan adalah melalui peningkatan koordinasi antar instansi pemerintah dan penguatan kapasitas kelembagaan. Selain itu, keterlibatan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan menjadi faktor kunci dalam mewujudkan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan (Bonaraja Purba, Eva Juli Yanti Situmorang, M.Abdan Syakura Annurradi, Hernita Siagian, 2024).

Lingkungan pertambangan mencakup dimensi alam, sosial, dan ekonomi yang saling terkait sejak sebelum operasi dimulai hingga pasca-penutupan tambang. Mengingat kegiatan ini berpotensi mengubah ekosistem secara drastis, pengelolaan yang komprehensif menjadi mutlak diperlukan. Strategi ini mencakup pengendalian pencemaran, konservasi sumber daya, hingga pelaksanaan reklamasi berdasarkan dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) sebagai landasan pencegahan dampak negatif.

Untuk menjamin keberlanjutan pelestarian lingkungan, diperlukan pendekatan tata kelola kolaboratif (*collaborative governance*) yang melibatkan partisipasi aktif seluruh pemangku kepentingan. Menurut (Novita, 2018) proses kolaborasi ini dibagi ke dalam tiga fase krusial:

1. Tahap Eksplorasi: Melakukan dialog untuk mengidentifikasi potensi dampak, menentukan peran setiap pihak dalam menjaga keamanan lingkungan, serta membangun sistem pemantauan eksternal yang inklusif.
2. Tahap Eksploitasi: Fokus pada pemantauan real-time dan evaluasi dampak yang muncul, serta membangun aksi kolektif untuk mitigasi dampak di lapangan.
3. Tahap Penutupan Tambang (*Mine Closure*): Menyepakati poin-poin teknis reklamasi dan berkolaborasi dalam pemulihan sumber daya air serta lahan.

Meskipun kerangka kebijakan telah disusun, implementasinya sering kali menghadapi kendala serius. (Nurfatimah, 2023), melaporkan bahwa kegiatan pertambangan berkontribusi signifikan terhadap 87% pencemaran air, tanah, dan udara. Dampak ini mencakup kerusakan keanekaragaman hayati akibat pembukaan lahan serta pencemaran logam berat dan Air Asam Tambang (AAT) (Prasetyo *et al.*, 2025). Menurut (Febri Yuliani, 2023), hambatan utama di lapangan biasanya dipicu oleh ketidakpatuhan individu terhadap *Standard Operating Procedure* (SOP) serta keterbatasan keterlibatan tenaga kerja

lokal dalam pengawasan lingkungan. Pencapaian pertambangan yang ideal memerlukan sinergi kuat antara tiga pilar utama:

- Pemerintah: Bertanggung jawab atas regulasi, pengawasan ketat, dan penegakan hukum sesuai standar lingkungan.
- Perusahaan: Wajib mengadopsi teknologi bersih, efisiensi sumber daya, serta transparansi dalam pelaporan lingkungan.
- Masyarakat: Berperan sebagai pengawas sosial dan partisipan aktif dalam program pengelolaan lingkungan.

Pendidikan dan sosialisasi yang berkelanjutan menjadi faktor penting agar pelaku industri maupun masyarakat menyadari risiko jangka panjang akibat pengelolaan tambang yang tidak tepat. Dengan penerapan prinsip-prinsip praktik pertambangan yang baik (GMP) di setiap tahapan, sumber daya alam dapat digunakan secara maksimal untuk mendukung pertumbuhan ekonomi tanpa mengurangi hak generasi mendatang dalam menikmati lingkungan yang bersih, sehat, dan berkelanjutan.

Sebagai contoh, dalam penambangan timah, menurut (Putri Oktaviani, Meri Erawati, 2023), kegiatan pertambangan mengubah lingkungan setelah operasi berlangsung. Bentang alam berubah, kualitas tanah bekas tanggul menurun, dan struktur tanah lapisan atas rusak. Tanah yang subur digantikan oleh lapisan bawah yang miskin hara, sementara populasi organisme tanah di lapisan atas tertimbun dan kehilangan fungsinya.

Penegakan hukum dan implementasi peraturan di sektor pertambangan saat ini masih menghadapi tantangan besar, terutama terkait meningkatnya aktivitas penambangan ilegal dan keterbatasan kapasitas pengawasan. Menurut (Amalia *et al.*, 2024) menekankan pentingnya

sinergi antar pemangku kepentingan untuk menyeimbangkan kepentingan ekonomi dengan upaya konservasi, mengingat aktivitas pertambangan berpotensi menimbulkan dampak negatif jangka panjang seperti kerusakan lingkungan dan degradasi vegetasi yang mengancam keanekaragaman hayati.

Dalam merespons tantangan tersebut, konsep pembangunan berkelanjutan hadir untuk menekankan keseimbangan antara pertumbuhan sosial-ekonomi dengan penguatan perlindungan lingkungan dan pencegahan polusi. Meminimalkan dampak merugikan seperti kebisingan, debu, dan gangguan lalu lintas menjadi tujuan utama dalam pengelolaan operasional. (Hilson & Nayee, 2002) menambahkan bahwa manajemen lingkungan yang efektif harus mencakup identifikasi potensi dampak dari setiap aktivitas, penetapan tujuan lingkungan yang terukur, serta pengembangan program untuk mencapai target perusahaan secara konsisten.

Praktik manajemen lingkungan ini umumnya diimplementasikan oleh perusahaan melalui penggunaan teknologi pengendalian polusi dan program pendidikan lingkungan (Nikolaou & Evangelinos, 2010). Selain itu, penerapan sistem manajemen lingkungan yang holistik sangat krusial untuk memulihkan area operasional yang rusak melalui pengendalian penggunaan sumber daya alam, pengelolaan limbah produksi, dan mitigasi dampak lingkungan lainnya. Karena pertambangan merupakan salah satu penyebab utama degradasi lahan, kegiatan ini wajib dilakukan secara bijaksana dan bertanggung jawab dengan memprioritaskan prinsip manajemen yang komprehensif (Odeku, 2017).

Lebih lanjut, kebijakan lingkungan yang dirumuskan oleh pemerintah maupun organisasi harus mampu mencegah kerusakan ekosistem dan melindungi masyarakat di sekitar area tambang melalui pengendalian polusi dan konservasi

keanekaragaman hayati. Menurut (Hilson & Murck, 2000) menyatakan bahwa kebijakan pertambangan harus selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan, yang mencakup aspek kesehatan dan keselamatan kerja (K3), reklamasi tambang, serta penilaian dampak lingkungan. Dari perspektif operasional, hal ini diwujudkan dengan memastikan ketersediaan air dan kualitas udara yang baik, menjaga lahan produktif dengan membatasi pembukaan lahan yang berlebihan, serta menciptakan lingkungan kerja yang sehat guna meminimalkan risiko lingkungan yang mungkin timbul selama proses produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes ,Treatment and Case Studies. *Journal of Cleaner Production*, 14((2006)), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Aldiyansyah, Y., Rianto, D. J., Permana, I. S., Kutni, D., & Marwadi, A. (2025). Perspektif Masyarakat Terhadap Dampak dari Aktivitas Pertambangan. *Journal of Social Science Research*, 5(4), 4998–5009.
- Amalia, K., Dandi, S., & Wahyuningsih, Y. (2024). Kebijakan Lingkungan Terhadap Permasalahan Tambang Pasir di Moro Kepulauan Riau Yang Berdampak Pada Lingkungan Masyarakat Moro. *Poisight*, 1(2), 139–158. <https://doi.org/10.62771/pk.v1i2.21>
- Aullia Vivi Yulianingrum, Absori, R. A. H. (2021). Kebijakan Pengelolaan Sumberdaya Alam Berbasis Kesejahteraan Profetik (Studi Analitik Regulasi Mineral dan Batubara di Indonesia). *Prosiding Seminar Nasional "Hukum Dan Pembangunan Yang Berkelanjutan,"* 2(September), 1–24.
- Bennett, N. J. (2016). Using Perceptions as Evidence to Improve Conservation and Environmental Management. *Conservation Biology*, 30(3), 582–592. <https://doi.org/10.1111/cobi.12681>
- Bochori, A Suherman, D. P. (2021). Desain Teknis Peledakan Batu Kapur Untuk Mereduksi Efek Getaran Tanah. *Jurnal Pertambangan*, 5(1), 33–37.

- Bonaraja Purba, Eva Juli Yanti Situmorang, M.Abdan Syakura Annurradi, Hernita Siagian, M. H. (2024). Kebijakan Pemerintah dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam : Studi Kasus Indonesia. *Economic Reviews Journal*, 3(3), 2145–2150. <https://doi.org/10.56709/mrj.v3i3.316>
- Bridge, G. (2004). Contested Terrain: Mining and The Environment. *Annu. Rev. Environ Resour*, 29, 205–259. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.011503.163434>
- Chang, X., & Li, Y. X. (2020). Lead distribution in urban street dust and the relationship with mining, gross domestic product GDP and transportation and health risk assessment. *Environmental Pollution*, 262, 114307. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114307>
- Corder, G., & Golev, A. (2017). The Role of the Mining Industry in a Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 00(0), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jiec.12596>
- Dubiński, J. (2013). Sustainable Development of Mining Mineral Resources. *Journal of Sustainable Mining*, 12(1), 1–6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>
- Durucan, S., Korre, A., & Munoz-melendez, G. (2006). Mining Life Cycle Modelling : a Cradle-to-Gate Approach to Environmental Management in the Minerals Industry. *Journal of Cleaner Production*, 14((2006)), 1057–1070. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.12.021>
- Epstein, R., Goic, M., Weintraub, A., Catalán, J., Santibáñez, P., Urrutia, R., Cancino, R., Gaete, S., Aguayo, A., & Caro, F. (2012). Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines. *Operations Research*, 60(1), 4–17.
- Febri Yuliani, S. S. (2023). Implementasi Kebijakan Pertambangan Batubara di Kota Sawahlunto. *Jurnal Administrasi Publik*, 5(2), 11–22.

- Gorman, M. R., & Dzombak, D. A. (2018). A Review of Sustainable Mining and Resource Management: Transitioning from the Life Cycle of the Mine to the Life Cycle of the Mineral. *Resources, Conservation and Recycling*, 137(June), 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>
- Groninger, J., Skousen, J., Angel, P., Barton, C., Burger, J., & Zipper, C. (2007). Chapter 8: Mine Reclamation Practices to Enhance Forest Development through Natural Succession. In *Mine Reclamation Practices to Enhance Forest Development Through Natural Succession* (Issue 5, pp. 8(1-7)).
- Gumanti, S., & Permatasari, S. E. (2024). Evaluation of Technical Handling of Coal Spontaneous Combustion in Stockpiles at Pit E of PT Satria Bahana Sarana Tanjung Enim , South Sumatra. *Pondasi: Journal of Applied Science Engineering*, 2(1), 146–152.
- Hadi, M. H., & Amin, R. (2025). Pemulihan Fungsi Ekosistem Lahan Reklamasi Bekas Tambang Di Area Roto Samurangau PT . Kideco Jaya Agung. *Environmental Insight Journal*, 1(2), 79–89.
- Haryandi, Veno Rori Setiawan, M. (2020). Implementasi Hearing Conservation Program Industri Pertambangan sebagai Upaya Pencegahan Penyakit Akibat Kerja (PAK) Akibat Resiko Kebisingan; Studi Kasus di Area Grinding, Process Plant di PT. ABC Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Teknik Dan Sains*, 1(2), 1–8.
- Hasanudin, Hanum Sasmita, E. A. S. (2021). Gambaran Kebisingan dan Keluhan Masyarakat di Sekitar PT . Martadinata Indah Tambang Alindau Kabupaten Donggala. *Banua: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 1(2), 40–45. <https://doi.org/10.33860/bjkl.v1i2.630>

- Hatayama, H., Tahara, K., & Daigo, I. (2014). Worth of Metal Gleaning in Mining and Recycling for Mineral Conservation. *Minerals Engineering*, (2014), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.012>
- Hilson, G., & Murck, B. (2000). Sustainable Development in the Mining Industry: Clarifying the Corporate Perspective. *Resources Policy*, 26(2000), 227–238.
- Hilson, G., & Nayee, V. (2002). Environmental Management System Implementation in the Mining Industry : A key to Achieving Cleaner Production. *International Journal of Mineral Processing*, 64((2002)), 19–41.
- Hudson-edwards, K. (2020). True Cost of Coal : Coal Mining Industry and its Associated Environmental Impacts on Water Resource Development. *Journal of Sustainable Mining*, 19(3), 1–17.
- Ilham, M. (2024). Pengelolaan Sumber Daya Alam Dalam Perspektif Hukum Tata Negara Indonesia. *Indonesia of Journal Business Law*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.47709/ijbl.v3i1.4147>
- Jolo, A., Gautama, R. S., Magister, P., Pertambangan, R., & Teknik, F. (2018). Pengelolaan dan Pemanfaatan Sumberdaya Mineral Berwawasan Lingkungan. *Techno: Jurnal Penelitian*, 07(01), 128–142.
- Kaku, D. U., Cao, Y., Al-masnay, Y. A., & Nizeyimana, J. C. (2021). An Integrated Approach to Assess the Environmental Impacts of Large-Scale Gold Mining : The Nzema-Gold Mines in the Ellembele District of Ghana as a Case Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 1–20.

- Karaca, O. (2019). *Environmental Impact of Mine Wastes : An Overview of Problems with Mining Sites in Turkey , Remediation Possibilities , and an Example from Turkey*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7010-6>
- Laurence, D. (2011). Establishing a Sustainable Mining Pperation : an Overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.019>
- Linggasari, S., Mawardi, A., & Rianto, D. J. (2025). Pengaruh Penambangan Pasir terhadap Kualitas Air Sungai Progo, Yogyakarta. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 11(1), 62-68.
- Luan, J., Zhang, Y., Tian, J., Meresa, H., & Liu, D. (2020). Coal Mining Impacts on Catchment Runoff. *Journal of Hydrology*, 589(May), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125101>
- Marbun, J., Rahsia, S. A., Widodo, M. L., Bhakti, U. P., & Barat, K. (2024). Strategi Pengelolaan Lingkungan di Daerah Aliran Sungai Tayan Dalam Mengurangi Pencemaran Sungai. *Jurnal Lingkungan Dan Sumberdaya Alam (JURNALIS)*, 7(2), 120-136.
- Muhammad Busyairi, A. O. (2011). Dampak Peledakan (Blasting) Terhadap Kesehatan Keselamatan Kerja dan Pemukiman Penduduk di Sekitar Lokasi PT. Safhira Gifha Kota Bangun-Kutai Kartanegara. *Jurnal Manajemen Dan Teknik Industri Produksi*, 10(2), 92-108.
- Muhammad Syaiful Anwar, S. Y. (2022). Kebijakan Pengelolaan Lingkungan PascaTambang di Wilayah Pesisir Kepulauan Bangka Belitung Berbasis Good Governance. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat*, 36-40.

- Mukhopadhyay, S., Maiti, S. K., & Masto, R. E. (2013). Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for Screening of Tree Species for Reclamation of Coal Mine Degraded Land. *Ecological Engineering*, 57((2013)), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.017>
- Mulligan, D. R., Franks, D. M., Boger, D. V, & Claire, M. C. (2011). Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resource Policy*, 36((2011)), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
- Nikolaou, I. E., & Evangelinos, K. I. (2010). A SWOT Analysis of Environmental Management Practices in Greek Mining and Mineral Industry. *Resources Policy*, 35(3), 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.02.002>
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G. M., Weng, Z., & Giurco, D. (2014). Modelling Future Copper Ore Grade Decline based on a Detailed Assessment of Copper Resources and Mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83((2014)), 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.005>
- Novita, A. A. (2018). Collaborative Governance dan Pengelolaan Lingkungan Hidup di Kawasan. *Jurnal Ilmiah Administrasi Publik (JIAP)*, 4(1), 27–35.
- Nurfatimah. (2023). Potensi Pencemaran Lingkungan Akibat Aktivitas Pertambangan. *Plano Madani*, 12(April), 58–64.
- Odeku, K. O. (2017). Effective Implementation of Environmental Management Plan for Sustainable Mining. *Enviromental Economics*, 8(1), 26–35.

- Olena Hasii, G. G. (2024). Coal Mining and Water Resources : Impacts , Challenges , and Strategies for Sustainable Coal mining and Water Resources: Impacts , Challenges , and Strategies for Sustainable Environmental Management. *V International Conference "Essays of Mining Science and Practice*, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012017>
- Ortiz-Castillo, J. E., Mirazimi, M., Mohammadi, M., Dy, E., & Liu, W. (2021). The Role of Microorganisms in the Formation, Dissolution, and Transformation of Secondary Minerals in Mine Rock and Drainage: A review. *Minerals*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/min11121349>
- Prasad, S., Reddy, T. B., & Vadde, R. (2015). Environmental Aspects and Impacts its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11((2015)), 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.002>
- Prasetyo, M. H., Baderan, D. W. K., & Hamidun, M. S. (2025). Dampak Kerusakan Lingkungan Akibat Eksploitasi Sumber Daya Mineral dari Kegiatan Pertambangan. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(2), 01–11.
- Putri Oktaviani, Meri Erawati, R. Y. (2023). Aktivitas Tambang Timah di Desa Sekuning Kabupaten Bintang dan Dampaknya Terhadap Masyarakat (2010-2020). *Kalpataru*, 9(1), 54–60.
- Salieiev, I. (2024). Organization of Processes for Complex Mining and Processing of Mineral Raw Materials From Coal Mines in the Context of the Concept of Sustainable development. *Mining of Mineral Deposits*, 18(1), 54–66. <https://doi.org/10.33271/mining18.01.054>

- Setiawati, H. V. R. (2021). Analisis Tingkat Kebisingan dan Upaya Pengendalian Penyakit Akibat Kerja di Area Mining PT XZY, Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Kedokteran*, 06(02), 176–187.
- Sheoran, V. (2010). Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation : A Review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2), 1–21.
- Smol, M., Marcinek, P., Duda, J., & Szoldrowska, D. (2020). Importance of Sustainable Mineral Resource Management in Implementing the Circular Economy (CE) Model and the European Green Deal Strategy. *Resources*, 9(55), 1–21.
- Sonter, L. J., Ali, S. H., & Watson, J. E. M. (2018). Mining and Biodiversity : key Issues and Research Needs in Conservation Science. *Proceedings B*, 1–9.
- Vladimir Lapcik, Ondrej Kohut, Petr Novak, A. K. (2018). Environmental Impacts Of Mining Of Mineral Resources. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, (2018), 253–263.
- Wahyudi Pratama Putra Sangadji, M Fadil Bellico, M. A. (2022). Manajemen Getaran Dampak Peledakan Terhadap Bangunan Pada Tambang Terbuka. *Indonesia Mining Profesional Journal*, 4(1), 11–20.
- Waller-Hunter, J. (2001). *OECD Environmental Indicators Towards Sustainable Development*. Organisation For Economic Co-Operation and Development (OEC.
- Weatherstone, N. (2005). The Role of the Mineral Reserve Estimator in Promoting Sustainable Development in the Mining Industry. *Applied Earth Science*, 114(March), 14–23.
<https://doi.org/10.1179/037174505X45478>

- Wong, M. H. (2003). Ecological Restoration of Mine Degraded Soils , with Emphasis on Metal Contaminated Soils. *Chemosphere*, 50((2003)), 775–780.
- Worrall, R., Neil, D., Brereton, D., & Mulligan, D. (2009). Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1426–1434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.013>
- Wulandari, W., Studi, P., Syariah, A., Ekonomi, F., Bisnis, D., Negeri, I., Intan, R., Sisdianto, E., Studi, P., Syariah, A., Ekonomi, F., Bisnis, D., Negeri, I., & Intan, R. (2025). Praktik Terbaik Tata Kelola Lingkungan dalam Industri Pertambangan di Kalimantan. *Jurnal Ilmiah Ekonomi Bisnis Dan Akuntansi*, 2(1), 232–244.
- Yaqutunnafis, L., Studi, P., Biologi, P., Studi, P., Inggris, B., Nahdlatul, U., Mataram, W., Studi, P., Ekonomi, P., Wathan, U. N., Berwawasan, A., Lokal, K., Sosialisasi, M., Kesadaran, P., Pada, L., Desa, M., Timur, B. P., Timur, L., Pasir, T., ... Timur, B. P. (2021). Konservasi Sumberdaya Alam Berwawasan Kearifan Lokal Melalui Sosialisasi Peningkatan Kesadaran Lingkungan Pada Masyarakat Desa Bagik Payung Timur, Lombok Timur. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 4(3), 328–333.
- Zalukhu, F. A. Y. (2019). Dampak dan Pengaruh Pertambangan Batubara terhadap Masyarakat dan Lingkungan di Kalimantan Timur. *Jurnal Legalitas*, 4(1), 42–56.
- Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., & Lv, C. (2015). Catena Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena*, 128, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>

BIODATA PENULIS



Ahmad Iskandar, S.Pd., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang

Penulis lahir di Serang, 11 Maret 1985, merupakan dosen tetap Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada Program Studi Pendidikan Teknik Mesin dengan konsentrasi keahlian Teknik Mesin Produksi dan Perancangan di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI), kemudian melanjutkan pendidikan Magister (S2) di Universitas Pancasila pada jurusan Manufacture System.

Selain berkiprah di dunia akademik, penulis juga merupakan praktisi industri dengan pengalaman lebih dari satu dekade di sektor otomotif dan manufaktur. Saat ini penulis menjabat sebagai HCGA Manager di Otoproject Group, perusahaan yang bergerak di bidang aksesoris otomotif.

Penulis memiliki kompetensi lintas bidang, tidak hanya pada teknik manufaktur dan sistem produksi, tetapi juga sebagai praktisi di bidang Sumber Daya Manusia yang meliputi Recruitment Management, People Development, Talent Management, Training Management, hingga Industrial Relation. Pengalaman tersebut memperkuat pendekatan penulis dalam mengintegrasikan aspek teknis, manajerial, dan pengembangan SDM dalam implementasi sistem produksi di dunia industri.

Bidang keahlian dan minat penulis meliputi teknik manufaktur, pembentukan logam, CAD/CAM, mekatronika, sistem kendali, aerodinamika kendaraan, serta *continuous improvement* untuk peningkatan efisiensi dan produktivitas proses produksi. Penulis aktif dalam kegiatan pendidikan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, serta penulisan buku dan karya ilmiah sebagai kontribusi terhadap pengembangan ilmu teknik dan penerapannya secara praktis di industri.

BIODATA PENULIS



Jance Murdjani Supit, Amd., S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Universitas Papua

Penulis lahir di Merauke pada tanggal 19 Januari 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan D3 Teknik Pertambangan dan langsung melanjutkan S1 pada Jurusan yang sama di Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, kemudian melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Penulis, selain sebagai dosen tetap, juga secara aktif terlibat dalam pengelolaan INTAN Jurnal Penelitian Tambang sejak 2018 sampai saat ini, baik sebagai editor maupun mitra bestari.

BIODATA PENULIS



Anselma Diksita Prajna Duhita, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Pertambangan

Fakultas Teknik Universitas Gorontalo

Penulis lahir di Batam tanggal 22 Mei 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada dan melanjutkan S2 pada Magister Teknik Pengelolaan Bencana Alam Universitas Gadjah Mada. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: anselmadiksita@unigo.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ir. Doli Jumat Rianto, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Pertambangan (S1)

Fakultas Teknik Universitas Muara Bungo

Penulis lahir di Bangko, 08 Desember 1989, yang bertempat di Kabupaten Merangin Provinsi Jambi. Penulis adalah Dosen Tetap pada Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Muara Bungo. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Muara Bungo dan Melanjutkan S2 pada Prodi Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta dengan Konsentrasi Teknik Lingkungan Pertambangan. Untuk pendidikan Profesi Insinyur diperoleh dari Universitas Muslim Indonesia dengan Konsentrasi Erosi pada Lahan Bekas Tambang. Penulis menekuni bidang ilmu Lingkungan Pertambangan, Pengantar Pertambangan Mineral dan Batubara, Reklamasi dan Pascatambang, Pemeriksaan dan Penilaian Tambang serta K3L Pertambangan.